

Conservação de Energia

Eficiência Energética
de Equipamentos e Instalações



Conservação de Energia

**Eficiência Energética
de Equipamentos e Instalações**

3ª Edição

Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Itajubá

FUPAI

Itajubá, 2006

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações

Coordenação

Milton César Silva Marques (Eletrobrás/PROCEL)

Jamil Haddad (Universidade Federal de Itajubá)

André Ramon Silva Martins (Universidade Federal de Itajubá)

Autores*

Afonso Henriques Moreira Santos

Alexandre Augusto Simões

André Ramon Silva Martins

Augusto Nelson Carvalho Viana

Cláudio Ferreira

Edson da Costa Bortoni

Eduardo Crestana Guardia

Electo Eduardo Silva Lora

Fábio José Horta Nogueira

Flávio Neves Teixeira

Jamil Haddad

José Antônio Cortez

Luiz Augusto Horta Nogueira

Manuel da Silva Valente de Almeida

Marcelo José Pirani

Marcos Vinícius Xavier Dias

Milton César Silva Marques**

Oswaldo Venturini

Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama

Pedro Paulo de Carvalho Mendes

Roberto Akira Yamachita

Valberto Ferreira da Silva

* *Professores e Pesquisadores da Universidade Federal de Itajubá*

** *Eletrobrás / PROCEL*

Conservação de Energia

Eficiência Energética
de Equipamentos e Instalações



Minas e Energia
Ministério de Minas e Energia

Educação
Ministério da Educação

Eletrobrás 



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE ITAJUBÁ**



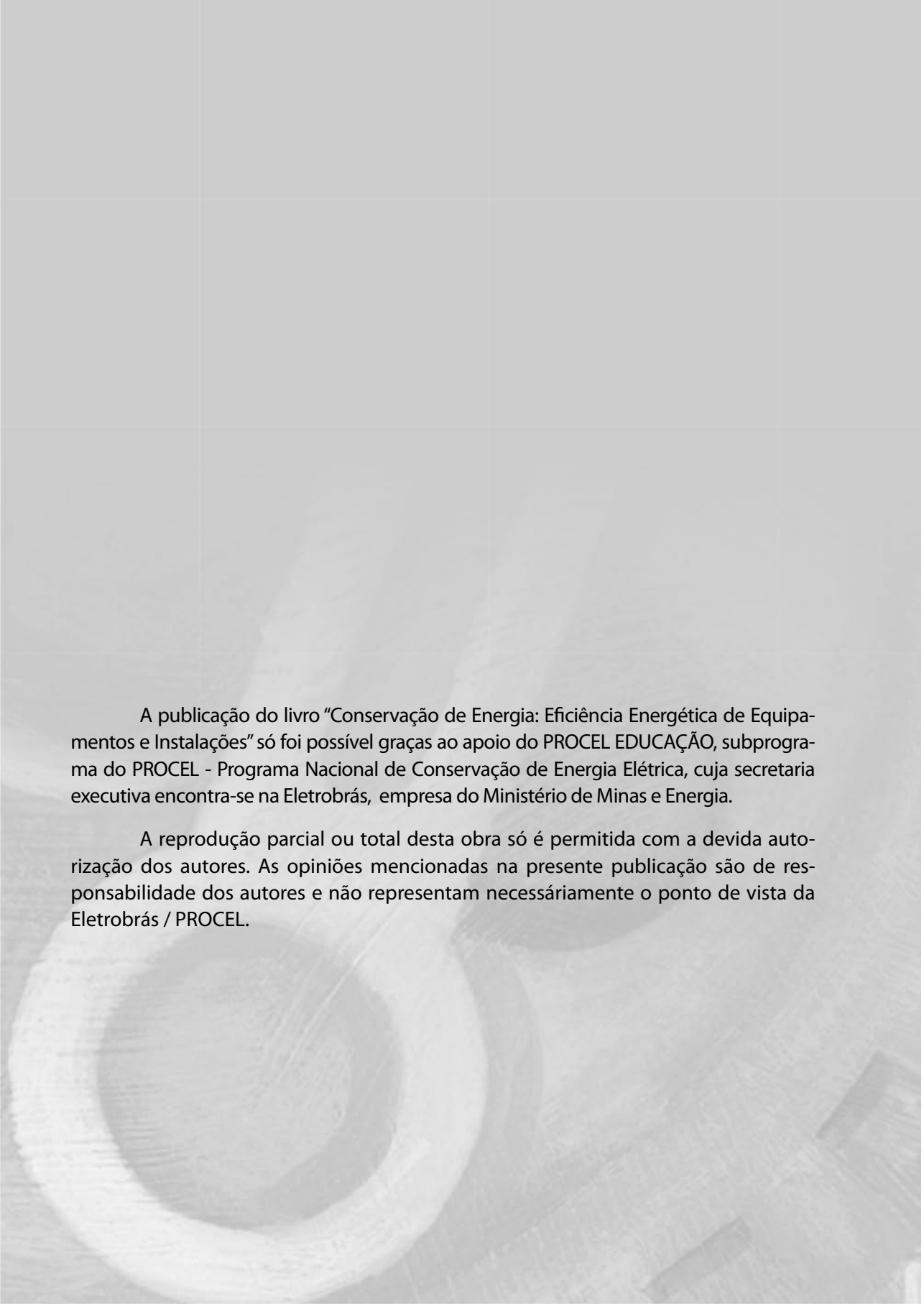
Equipe de diagramação e criação de capa:

Marcos Vinícius Xavier Dias

Mariângela Dieb Farah

Revisão de texto:

Patrícia Machado Silva



A publicação do livro “Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações” só foi possível graças ao apoio do PROCEL EDUCAÇÃO, subprograma do PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, cuja secretaria executiva encontra-se na Eletrobrás, empresa do Ministério de Minas e Energia.

A reprodução parcial ou total desta obra só é permitida com a devida autorização dos autores. As opiniões mencionadas na presente publicação são de responsabilidade dos autores e não representam necessariamente o ponto de vista da Eletrobrás / PROCEL.

Ficha Técnica

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro

Silas Rondeau Cavalcante Silva

DEPARTAMENTO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

Diretora

Laura Cristina da Fonseca Porto

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Ministro

Fernando Haddad

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. - Eletrobrás

Presidente

Aloísio Vasconcelos

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- PROCEL

Secretário Executivo

João Ruy Castelo Branco de Castro

Supervisão

Luiz Eduardo Menandro de Vasconcellos
Hamilton Pollis

Coordenação Geral

Milton César Silva Marques

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Reitor

Renato de Aquino Faria Nunes

FUPAI

Presidente

Djalma Brighenti

Índice

Prefácio	XV
Apresentação	XVII

Capítulo 1 – O PROCEL EDUCAÇÃO

Milton César Silva Marques

1.1. PROCEL na educação básica	2
1.2. PROCEL EDUCAÇÃO nas instituições de ensino superior (IESS)	7
1.3. PROCEL EDUCAÇÃO nas escolas técnicas de nível médio	8

Capítulo 2 – ENERGIA: CONCEITOS E FUNDAMENTOS

Luiz Augusto Horta Nogueira

2.1. Definições	13
2.2. As formas de energia	15
2.3. As leis das conversões energéticas.....	21
2.4. Recursos energéticos.....	29
2.5. Terminologia energética	31
2.6. Referências bibliográficas	37

Capítulo 3 – ENERGIA E MEIO AMBIENTE

Electo Eduardo Silva Lora e Flávio Neves Teixeira

3.1. Introdução	43
3.2. Consumo e reservas de energia no mundo	45
3.3. Consumo e reservas de energia no Brasil	55
3.4. A energia e o efeito estufa	59
3.5. O protocolo de Kyoto	69

3.6. A energia e a chuva ácida	77
3.7. A poluição do ar nas megacidades	79
3.8. A geração termelétrica e a poluição do ar	80
3.9. Padrões de qualidade do ar e de emissão	89
3.10. Controle de emissões de poluentes durante a conversão energética...	95
3.11. A prevenção da poluição durante a conversão de energia: conservação e eficiência.....	110
3.12. Referências bibliográficas.....	123

Capítulo 4 – AUDITORIA ENERGÉTICA

Luiz Augusto Horta Nogueira

4.1. Introdução	129
4.2. Uma questão de terminologia	130
4.3. A auditoria energética e a eficiência dos sistemas energéticos.....	131
4.4. A auditoria energética na prática.....	134
4.5. Comentários e sofismas finais	144
4.6. Referências bibliográficas	146

Capítulo 5 – TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Jamil Haddad, Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama e Eduardo Crestana Guardia

5.1. Introdução	149
5.2. Sistema elétrico	153
5.3. Definições e conceitos	154
5.4. Tensão de fornecimento.....	160
5.5. Estrutura tarifária	162
5.6. Faturamento	164

5.7. ETST – Energia temporária para substituição.....	170
5.8. ICMS: cobrança e sua aplicação.....	171
5.9. Cobrança de multa e seu percentual.....	171
5.10. Fator de potência ou energia reativa excedente.....	171
5.11. Análise do perfil de utilização de energia elétrica.....	177
5.12. A importância dos indicadores de eficiência energética.....	186
5.13. Comercialização de energia.....	189
5.14. Referências bibliográficas.....	193

Capítulo 6 – ANÁLISE ECONOMICA EM CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Edson da Costa Bortoni e Afonso Henriques Moreira Santos

6.1. Introdução.....	195
6.2. O fluxo de caixa.....	195
6.3. Critérios para tomada de decisão.....	198
6.4. Tópicos avançados.....	209

Capítulo 7 - ILUMINAÇÃO

Roberto Akira Yamachita, Jamil Haddad e Marcos Vinícius Xavier Dias

7.1. Introdução.....	213
7.2. Definições.....	213
7.3. Lâmpadas incandescentes.....	225
7.4. Lâmpadas de descarga.....	227
7.5. Cálculo de iluminação.....	238
7.6. Referências bibliográficas.....	246

Capítulo 8 – BOMBAS DE FLUXO E VENTILADORES

Augusto Nelson Carvalho Viana

8.1. Introdução	249
8.2. Conceitos e definições	250
8.3. Comportamento das bombas de fluxo e ventiladores	267
8.4. Análise da bomba operando com rotação constante e variável	273
8.5. Balanço de energia no conjunto moto-bomba ou moto-ventilador	274
8.6. Laboratórios de ensaios de bombas	276
8.7. Considerações e comentários	287
8.8. Referências bibliográficas	290

Capítulo 9 – REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO

Marcelo José Pirani, Osvaldo Venturini, Alexandre Augusto Simões e Manuel da Silva Valente de Almeida

9.1. Introdução	293
9.2. Conceitos importantes	294
9.3. Refrigeração por compressão de vapor	300
9.4. Refrigeração por absorção de vapor	313
9.5. Bombas de calor	315
9.6. Ar condicionado	320
9.7. Fluidos refrigerantes	330
9.8. Termoacumulação	340
9.9. Conservação de energia em sistemas de refrigeração	344
9.10. Referências bibliográficas	347

Capítulo 10 – CALDEIRAS E FORNOS

André Ramon Silva Martins e Fábio José Horta Nogueira

10.1. Introdução	349
10.2. Conceitos básicos	349
10.3. Combustíveis	356
10.4. Combustão	363
10.5. Fornos e caldeiras.....	371
10.6. Isolantes térmicos e refratários	384
10.7. Eficiência térmica	388
10.8. Referências bibliográficas.....	394

Capítulo 11 – ACIONAMENTOS COM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Edson da Costa Bortoni e Afonso Henriques Moreira Santos

11.1. Introdução	397
11.2. A máquina “Motor de Indução”	398
11.3. Motor de alto rendimento.....	402
11.4. Partida de motores	414
11.5. Análise térmica.....	420
11.6. Aplicação eficiente.....	424
11.7. Fatores de influência no desempenho de motores	427
11.8. Análise econômica.....	430
11.9. Economia de energia com o uso de controles de velocidade	432
11.10. Referências bibliográficas	435

Capítulo 12 – COMPRESSORES E AR COMPRIMIDO

Fábio José Horta Nogueira

12.1. Introdução	439
12.2. Histórico.....	439
12.3. Importância do ar comprimido.....	441
12.4. Compressores	442
12.5. Tópicos básicos sobre termodinâmica.....	449
12.6. Instalações de ar comprimido	461
12.7. Aumento da eficiência energética	467
12.8. Referências bibliográficas.....	473

Capítulo 13 – TRANSFORMADORES

Edson da Costa Bortoni, Pedro Paulo de Carvalho Mendes, Cláudio Ferreira e Roberto Akira Yamachita

13.1. Características construtivas	477
13.2. Perdas elétricas em transformadores.....	481
13.3. Cálculo das perdas em um transformador	485
13.4. Cálculo da eficiência de um transformador.....	487
13.5. Operação de transformadores em paralelo.....	489
13.6. Novas tecnologias.....	490
13.7. Operação otimizada	494
13.8. Referências bibliográficas.....	501

Capítulo 14 – INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Valberto Ferreira da Silva e José Antônio Cortez

14.1. Introdução	503
14.2. Diagrama em blocos	503
14.3. Sentido do fluxo de potência.....	504
14.4. A técnica de geração das tensões	505
14.5. Outras técnicas.....	505
14.6. Funcionamento interno	509
14.7. Inversor trifásico	510
14.8. Características do MIT.....	514
14.9. Aplicações	515
14.10. Inversores microprocessados	518
14.11. Tendências.....	521
14.12. Referências bibliográficas	523

Capítulo 15 - QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama

15.1 Introdução	525
15.2. Os programas de conservação de energia elétrica e seus impactos sobre a qualidade da energia elétrica	563
15.3. Exemplos de medidas de distorções harmônicas causadas por algumas medidas de conservação	572
15.4. Quantificação e contabilização das perdas devido aos harmônicos.....	582
15.5. Referências bibliográficas.....	589

Prefácio

Para definir estratégias, como a de mobilizar a sociedade para o uso responsável e eficiente da energia elétrica, combatendo seu desperdício, o Governo Federal, por intermédio do Ministério de Minas e Energia, criou, em 1985, o PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, cuja Secretaria Executiva é exercida pela Eletrobrás.


Ao economizar energia, estamos adiando a necessidade de construção de novas usinas geradoras e sistemas elétricos associados, disponibilizando recursos para outras áreas e contribuindo para a preservação da natureza.

A partir de sucessivas crises nacionais e internacionais, afetando o abastecimento, durante as quais a economia de energia passou a fazer parte de um grande esforço nacional de combate ao desperdício, o PROCEL ampliou sua área de atuação, desenvolvendo uma série de projetos, dirigidos para as classes de consumo industrial, comercial, residencial, iluminação pública, rural e poder público, com ênfase em prédios públicos.

Concomitantemente, dentre outras iniciativas relevantes, o Programa contribuiu para a melhoria do rendimento energético de materiais e equipamentos elétricos de uso final, por meio da outorga do Selo de Economia de Energia, capacitou tecnologicamente centros de pesquisa e laboratórios, visando à implementação da Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295 de 17 de outubro de 2001), além de interagir com a Educação Formal do País em conformidade com a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, com o objetivo de retirar o consumo perdulário do Brasil, avaliado em cerca de 20% do consumo total de energia elétrica do país.

A interação com o processo educativo se fez, a partir de 1993, por meio de um Acordo de Cooperação Técnica entre os Ministérios de Minas e Energia e o da Educação, estabelecendo, para cada nível de ensino, uma forma apropriada de abordar as questões da conservação de energia.

Na Eletrobrás/PROCEL, o núcleo denominado PROCEL EDUCAÇÃO se organizou para atender à nova demanda, estabelecendo parcerias com competências técnicas educativas que pudessem desenvolver um produto adequado à Educação Básica, à Educação Média Técnica e à Educação Superior.



A conservação de energia, como conceito socioeconômico, tanto no uso final como na oferta de energia, está apoiada em duas ferramentas, para conquistar sua meta: mudança de hábitos e eficiência energética. Na área educativa, o foco “mudança de hábitos” ficou sediado na Educação Básica (Infantil, Fundamental e Média). Nas Escolas Técnicas (nível médio) e nas Instituições de Nível Superior, ficaram sediadas as questões da eficiência energética, diretamente ligadas às técnicas e tecnologias disponíveis para a conservação de energia.

A eficiência energética, como instrumento de conservação de energia, cada vez mais se aproxima das necessidades do cidadão brasileiro, notadamente, aqueles que compõem os corpos docentes e discentes de nossas universidades. Assim sendo, é preciso que sistemas, metodologias, tecnologias, materiais e equipamentos, que possibilitem melhoria da eficiência eletro energética, sejam conhecidos por professores e alunos do ensino superior, principalmente os de engenharia e os de arquitetura, os quais estão diretamente conectados ao tecnicismo envolvido com esse tema.

É com esse intuito que esta publicação, resultado da parceria entre a Eletrobrás/PROCEL e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI-MG), se renova para continuar atendendo às disciplinas de eficiência energética nas Instituições de Ensino Superior e aos profissionais que, porventura, trabalhem ou se interessem por esse assunto.


Luiz Eduardo Menandro de Vasconcellos
Eletrobrás/PROCEL

Apresentação

Esta obra, revisada e ampliada, busca apresentar os fundamentos e as tecnologias para o uso racional da energia, para os setores industrial e de serviço. De fato, nunca se falou tanto de energia e de como conservá-la como agora, seja como decorrência da crise energética brasileira de 2001 ou das preocupações ambientais e geo-políticas mundial relacionadas aos combustíveis fósseis e seus prováveis substitutivos. Assim, o surgimento de um quadro de dificuldades para o atendimento do mercado de energia elétrica a partir de maio de 2001, impondo diversas ações governamentais e de toda a sociedade restituíram ao tema energia a verdadeira dimensão que lhe foi subtraída desde que os efeitos dos choques do petróleo dos anos setenta foram diluídos ao longo das décadas seguintes.

Embora esse assunto tenha ganhado repercussão e chegado às páginas dos jornais, não se trata de um tema novo, pois há anos engenheiros, economistas e executivos envolvidos com sistemas energéticos têm sido frequentemente clamados a conservar energia e reduzir desperdícios nos mais variados níveis de produção e consumo. De fato, usar bem a energia é uma forma inteligente de gerir adequadamente as demandas e melhorar a produtividade em qualquer contexto, com benefícios ambientais e econômicos, tanto em escala local como para toda a nação. Usar bem energia talvez seja uma das poucas alternativas para enfrentar racionalmente as preocupantes expectativas de expansão da demanda.

Um primeiro momento onde a conservação de energia se destacou foi exatamente a partir dos choques de petróleo ocorridos na década de 70, que impuseram a necessidade de se economizar petróleo e seus derivados como consequência da elevação brusca dos preços internacionais deste insumo. Nesse sentido, pode-se citar como um primeiro esforço institucional de conservação de energia, com metas claramente definidas e na área de combustíveis líquidos, o Protocolo assinado, em 1979, entre o então Ministério da Indústria e do Comércio e a ANFAVEA, prevendo uma redução de 20% do consumo de combustíveis através de automóveis a álcool. Enquanto a primeira fase do PROÁLCOOL após 1973 tratava do álcool aditivado, a segunda fase, após 1979, necessitava de motores desenvolvidos para funcionarem com álcool hidratado (não apenas com a adição do álcool a gasolina). Com esse programa se colocava a questão da introdução de novas tecnologias e não apenas o aperfeiçoamento dos automóveis que já existiam. Também nesta época, o governo federal ofereceu estímulos à conservação e substituição do óleo combustível




consumido na indústria, criando em 1981 o programa CONSERVE no âmbito do Ministério da Indústria e Comércio.

À conjuntura recessiva da década de oitenta seguiu-se uma redução no consumo de energia elétrica, gerando um excedente que seria comercializado sob a denominação de Energia Garantida por Tempo Determinado - EGTD. Esta iniciativa combinou-se perfeitamente com a anterior, sendo verificado uma crescente utilização da eletricidade para fins térmicos. A eletrotermia contribuiu significativamente para redução do consumo dos derivados, introduzindo novos patamares de eficiência na indústria e abrindo um mercado até então inexplorado pelas concessionárias de energia. Ultrapassando o limite até então estabelecido pelo “medidor de energia”, as companhias distribuidoras passam a entrar nas instalações dos consumidores, diagnosticando seus equipamentos, propondo tecnologias eficientes e contribuindo para a venda de novos produtos mais eficientes energeticamente. Inúmeros institutos de pesquisa tiveram atuação relevante tanto no âmbito do Conserve como na comercialização da EGTD, onde se destacaram o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, em São Paulo, e o Instituto Nacional de Tecnologia - INT, no Rio de Janeiro.

Ocorre que aqueles excedentes de eletricidade não eram perenes e o aviltamento das tarifas combinou-se perversamente com a retomada do crescimento da economia, anunciando desde então a crise que eclodiria quinze anos após. Naquela ocasião, o Ministério das Minas e Energia - MME procurando adiantar-se à escassez, assumiu a liderança do processo de fomento à eficiência energética e implantou, em fins de 1985, o Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL).

Uma das iniciativas pioneiras patrocinadas pelo Programa foram os projetos de Diagnóstico do potencial de conservação de energia elétrica nas empresas dos setores industrial e comercial. Data desta época, também, o Manual de auto-avaliação dos pontos de desperdício de energia elétrica, patrocinado pela então Agência de Aplicação de Energia de São Paulo.

Desenvolvendo estudos aplicados em sistemas energéticos desde 1980, um grupo de professores da Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), hoje Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), com o apoio primeiro da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e hoje também do PROCEL, criaram em 1988,




o Curso sobre Estudos de Otimização Energética (COENE). Era preocupação dos coordenadores do curso que os então estudos de diagnóstico energético fossem complementados por projetos de otimização energética, buscando contemplar os diversos usos da energia, integrando as várias formas da energia. Um dos objetivos deste curso era -e continua sendo- capacitar técnicos na elaboração de estudos específicos e setoriais de racionalização energética, propondo soluções integrais de conservação de energia.

Um diferencial importante desta iniciativa foi o desenvolvimento de trabalhos de campo, em estabelecimentos comerciais e industriais da região, onde os participantes do curso puderam colocar em prática os ensinamentos teóricos vistos nas aulas e nos laboratórios da UNIFEI. Ao final de duas semanas de treinamento, as equipes apresentavam para os professores e representantes das empresas envolvidas nos projetos, os resultados encontrados nos estudos de otimização energética.

Durante as várias edições do COENE desenvolveu-se um extenso material didático, utilizado como apoio nas aulas. Os artigos e apostilas produzidas deram origem a este livro, agora disponível para todos profissionais interessados em introduzirem-se ou aprofundarem-se nas técnicas da eficiência energética. Chega em hora extremamente oportuna, portanto.

É importante registrarmos o apoio que sempre tivemos dos funcionários e dirigentes da FUPAI bem como dos colegas e corpo administrativo da UNIFEI.

Este trabalho ao mesmo tempo estimulante e gratificante, tornou-se possível somente devido à confiança do PROCEL e da CEMIG depositada naquele grupo de professores e alunos da então EFEI. Gostaríamos, então, de expressar nossa gratidão, inicialmente à CEMIG, representada na época pelos Engenheiros Jaime Antônio Burgoa e Ricardo Cerqueira. O apoio da Eletrobrás e do PROCEL foram fundamentais para viabilizar este projeto. Destas entidades recebemos o incentivo de vários colegas e entusiastas da eficiência energética, tanto ao nível da sua Diretoria, na pessoa do seu presidente, Dr. Firmino Ferreira Sampaio Neto e, bem como do Dr. Mário Fernando de Melo Santos, então diretor de operação de sistemas e secretário executivo do PROCEL. Não poderíamos deixar de mencionar o apoio efetivo de Paulo Cezar Coelho Tavares, Geraldo da Silva Pimentel, José de Alencar Medeiros Filho e Marcos Luiz Rodrigues Cordeiro, então dirigentes do Programa. Da mes-



ma forma, os atuais diretores da Eletrobrás e executivos do PROCEL continuaram depositando sua confiança em nossas ações, onde fazemos questão de agradecer o apoio do atual Presidente, Dr. Aloisio Marcos Vasconcelos Novais, do Diretor de projetos especiais e desenvolvimento tecnológico e industrial, Dr. João Ruy Castelo Branco de Castro , do chefe do departamento de planejamento e estudos de conservação de energia, Dr. Luiz Eduardo Menandro de Vasconcellos e os responsáveis das divisões de suporte técnico Dr. Emerson Salvador e Hamilton Pollis.

Este rol de agradecimentos ficaria incompleto se não registrássemos o efetivo comprometimento dos responsáveis pela coordenação dos projetos na área educacional, por parte do PROCEL, Engº Milton Marques. É importante também citarmos profissionais do PROCEL que sempre nos apoiaram, como Renato Pereira Mahler, Ronaldo de Paula Tabosa, Marina Godoy Assunção, Paulo Augusto Leonelli, George Alves Soares, Fernando Pinto Dias Perrone, Sônia Guilliod, Vanda Alves dos Santos, Edivaldo Carneiro Rodrigues, Fernando Luiz Conde de Figueiredo, de quem tivemos imprescindível confiança, apoio e estímulo necessários ao desenvolvimento dos trabalhos em conservação de energia. A eles e tantos outros que conosco participam desta cruzada em prol da eficiência energética, considerem-se, portanto, co-autores desta obra, pois a mesma é fruto do trabalho e dedicação coletiva.

Afonso Henriques Moreira Santos

Jamil Haddad

Luiz Augusto Horta Nogueira

Itajubá, outubro de 2006

Capítulo 1

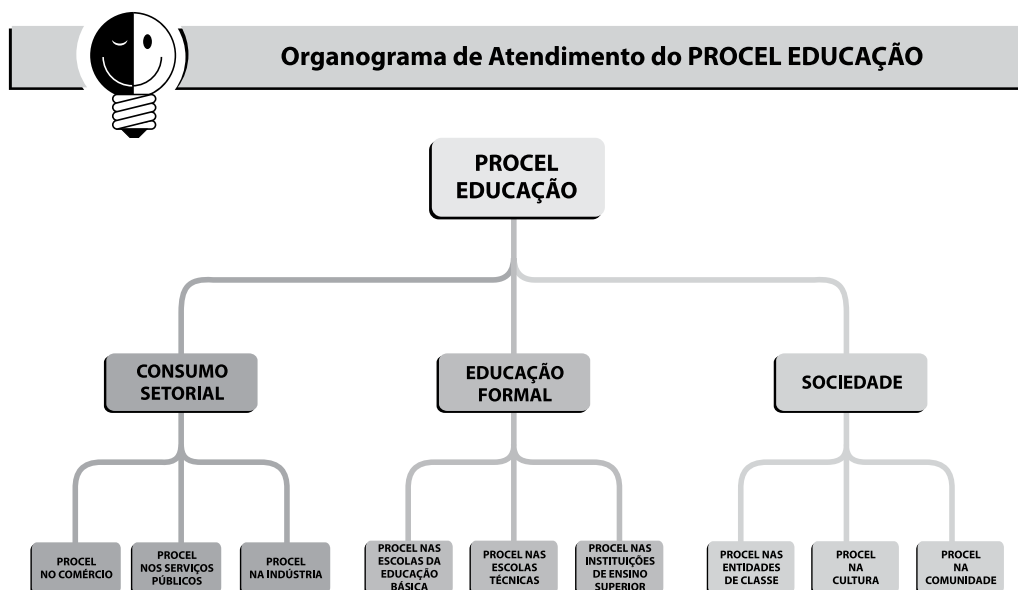
O PROCEL EDUCAÇÃO

O PROCEL EDUCAÇÃO é um dos subprogramas do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL.

Trata-se de um subprograma que disponibiliza informações para os diversos níveis de ensino da educação formal do Brasil, visando ao perfeito entendimento das ferramentas da conservação de energia: a Mudança de Hábitos e a Eficiência Energética.

Cada nível formal de ensino está sujeito à Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional - LDB e, tudo que é levado à área educativa deve estar em conformidade com a LDB e com os Parâmetros Curriculares Nacionais - PCNs.

Por isso, sendo o PROCEL, por meio do PROCEL EDUCAÇÃO, um canal e um manancial informativo, dirigido à área educativa, toda essa informação deve respeitar a LDB e os PCNs e, dessa forma, cada nível de ensino é trabalhado de maneira específica.



1.1. PROCEL NA EDUCAÇÃO BÁSICA

HISTÓRICO

O Ministério de Minas e Energia - MME, o Ministério da Educação e do Desporto - MEC e a Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobrás assinaram um Acordo de Cooperação Técnica em 09/12/93, que foi renovado em 05/06/96 e retomado em julho de 2005. Esse acordo tem o objetivo de estabelecer uma parceria efetiva entre as áreas de Energia e da Educação, para dar caráter institucional às atividades de Combate ao Desperdício de Energia, em todos os níveis de ensino do País.

Atualmente, as Concessionárias de Energia Elétrica, em parceria com a Eletrobrás/PROCEL, têm implantado o PROCEL EDUCAÇÃO na Educação Básica do País. Além disso, desenvolve cursos de capacitação para professores, com carga horária de 12 horas, ministrados pelos seus técnicos multiplicadores, com posterior acompanhamento das atividades dos professores através de reuniões periódicas anuais.

O PROCEL NA EDUCAÇÃO BÁSICA (Infantil, Fundamental e Média), é um projeto que tem como objetivo capacitar professores desses níveis de Ensino para o Combate ao Desperdício de Energia. Para isso utiliza como canal de comunicação um Programa de Educação Ambiental denominado "A Natureza da Paisagem – Energia", que se desenvolve sob determinados princípios fundamentais como processo permanente, totalidade, teoria e prática, resolução de problemas imediatos, mudança de hábitos e qualidade de vida, de forma que os professores possam desenvolver atividades interdisciplinares, junto a seus alunos, dentro do tema transversal Meio Ambiente.

Desenvolver novos hábitos relativos ao uso da energia elétrica através de um programa de educação nas escolas traz benefícios imediatos, como a redução do desperdício de energia na residência dos alunos-alvos do programa. De médio e longo prazos, visa-se formação de um cidadão consciente sobre a importância de utilizar a energia elétrica sem desperdício, postergando a construção de usinas, os impactos ambientais e preservando a qualidade de vida tanto da geração atual, como da futura.

PONTOS CHAVES

- Sensibilizar a área de Educação para que o projeto seja disseminado no maior número possível de escolas Municipais e Estaduais;
- Introduzir e difundir os conceitos de Conservação de Energia, e de Uso Eficiente de Energia através do projeto PROCEL na Educação Básica;

- Fomentar a parceria entre a área de Educação e a Concessionária de Energia Elétrica;
- Incentivar a inserção do tema Combate ao Desperdício de Energia Elétrica em feiras ou seminários escolares;
- Criar uma associação lógica do aluno ao Ambiente onde vive, de forma que ele compreenda este Ambiente como um todo, não se dissociando dele.

ESTRUTURA E COMPONENTES

O PROJETO

A proposta da metodologia “A Natureza da Paisagem - Energia” do PROCEL na Educação Básica, consiste em desenvolver dentro de um programa de Educação Ambiental, atividades de combate ao desperdício de energia elétrica, nas Escolas, através dos professores da Educação Básica. Procura abordar a questão em um contexto mais amplo, envolvendo aspectos da qualidade de vida, mudanças de hábitos de consumo de energia elétrica, com a utilização de tecnologias energeticamente eficientes, entre outros. O objetivo deste projeto é sensibilizar os alunos para uma postura diferente em relação ao uso de energia elétrica, utilizá-la sem desperdício.

O MATERIAL DIDÁTICO

O material didático/pedagógico foi desenvolvido pelo Centro de Cultura, Informação e Meio Ambiente – CIMA, por meio das parcerias entre a Eletrobrás/PROCEL, o MME, o MEC, contando com o apoio fundamental do Ministério do Meio Ambiente, da Memória da Eletricidade, da UNDIME – União Nacional dos Dirigentes Municipais de Educação, do PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e da UNICEF e das Concessionárias de Energia Elétrica. “A Natureza da Paisagem – Energia”, é o resultado prático dessa interação positiva.

Trata-se de um Programa de Educação Ambiental que possui os princípios fundamentais da Educação Ambiental, estabelecidos na Conferência Intergovernamental sobre Educação Ambiental de Tbilisi (Geórgia - CEI) em outubro de 1977 e é aplicada de comum acordo com a LDB e com os PCNs.

O Material didático/pedagógico é composto de 7 (sete) livros, 1(hum) jogo educativo, 1(hum) álbum seriado, 1(hum) programa em vídeo, 1(hum) software para o sistema de acompanhamento e de avaliação e o folder.

Cada item possui uma identidade e destinação específicas. Cada escola que se envolve no projeto recebe cerca de 600(seiscentos) itens, da relação a seguir:

LIVRO O CLIQUE (EDUCAÇÃO INFANTIL)

Destina-se aos alunos do Ensino Infantil, aquele que antecede ao Ensino Fundamental. É fartamente ilustrado, linguagem de ZIRALDO, apresenta o conteúdo em forma de estrofes rimadas.

LIVRO 1

Dirige-se aos alunos de 1ª e 2ª séries do ensino fundamental. É escrito em prosa agradável e vincula o tema a um conteúdo ligado à realidade pueril dos leitores.

LIVRO 2

Dirige-se aos alunos de 3ª e 4ª séries do ensino fundamental. É escrito em prosa literária agradável e vincula o tema a um conteúdo ligado à realidade familiar dos leitores.

LIVRO 3

Dirige-se aos alunos de 5ª e 6ª séries do ensino fundamental. É escrito em prosa literária agradável e vincula o tema a um conteúdo ligado à realidade da sala de aula dos leitores.

LIVRO 4

Dirige-se aos alunos de 7ª e 8ª séries do ensino fundamental. É escrito em prosa literária agradável e vincula o tema a um conteúdo ligado à realidade do aprendizado dos leitores.

LIVRO 5

Dentre os volumes destinados aos alunos, este é o mais denso. Sua linguagem é acessível a qualquer aluno do Ensino Médio. Concentra informações técnico-científicas. Fonte de consulta do professor, enriquece as pesquisas dos alunos.

LIVRO DO PROFESSOR

Oferece embasamento conceitual e metodológico, além de uma série de atividades que podem ser realizadas pelos alunos e orientadas pelo professor

ÁLBUM SERIADO

Apresenta imagens sugestivas e textos curtos que, em conjunto, formam um roteiro de explanação do assunto.

JOGO LÚDICO EDUCATIVO

Envolve os jogadores na brincadeira, enquanto veicula importantes dicas, sobretudo quanto à mudança de hábitos.

“FOLDER” INSTITUCIONAL

Prospecto orientador do programa PROCEL NAS ESCOLAS de níveis fundamental e médio.

PROGRAMA EM VÍDEO

Apresenta uma visão panorâmica da energia e sensibiliza os espectadores para o combate ao desperdício de energia.

FICHAS:

De cadastro da Escola	01/ Escola
De acompanhamento da Escola	01/ Escola
De cadastro da Residência	10/ Turma que queira participar
De acompanhamento da Residência	10/ Turma que queira participar

A distribuição do material é gratuita para as Escolas. O material é encaminhado, pela Concessionária, às Escolas, em atenção de seu Diretor, através de um documento-compromisso (carta) e, fica à disposição dos professores e alunos, em quantidade suficiente para que 2 (duas) turmas de alunos possam trabalhar simultaneamente.

Como utilizar o material didático/pedagógico, os professores aprendem no curso de 12 (doze) horas, em que eles são capacitados.

COMO É OPERACIONALIZADO

O projeto define como estratégia de ação sua disseminação por meio de profissionais das Concessionárias de Energia Elétrica, previamente treinados pelo PROCEL. Estes profissionais estabelecem um relacionamento com a área de Educação capacitando os professores, que incluem o tema Energia e o combate ao seu desperdício no plano de curso de sua disciplina.

A capacitação dos chamados multiplicadores se faz por meio de um curso de 32 horas de carga horária, para que todas as informações necessárias ao desenvolvimento do projeto sejam discutidas de forma interativa.

Toda a parceria educativa é conquistada por técnicas e conteúdos que possam sensibilizar a parceria. Os multiplicadores habilitam-se a capacitarem os professores e acompanhar o processo durante um determinado período.

A parceria entre a Concessionária de Energia Elétrica e a área de educação se faz de forma institucional, através de um Acordo de Cooperação Técnica, onde o objetivo e as responsabilidades de cada parte ficam claramente definidos.

ACOMPANHAMENTO E DE AVALIAÇÃO

O acompanhamento do trabalho do professor é realizado através de um cronograma previamente definido pelas partes envolvidas. Planejam-se as ações e buscam-se os resultados. As fichas de cadastro da residência e de acompanhamento da residência permitem obter os kWh/aluno de desperdício evitado.

Para se avaliar e computar os resultados, utiliza-se um software especialmente desenvolvido para isso. Ele permite estabelecer um novo paradigma de consumo de energia, em que se evita o desperdício, por meio de uma grande amostragem, no país, por aluno participante do projeto.

ATUAÇÃO DOS PROFESSORES NOS VÁRIOS NÍVEIS DO ENSINO

Os professores, devidamente capacitados e motivados, são elementos centrais do projeto, responsáveis por transmitir o tema, de forma interdisciplinar, o que facilita a obtenção de resultados em relação às metas previamente estabelecidas pelo projeto.

Os professores capacitados recebem informações compatíveis aos níveis de Ensino em que atuam.

ATRIBUIÇÕES DAS CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Definir, em conjunto com a área de Educação, as ações a serem desenvolvidas;

Sensibilizar os Diretores das Escolas a serem envolvidas no projeto, por meio de reuniões específicas;

Capacitar os professores, acompanhar suas atividades e dar suporte às necessidades adicionais dos professores em suas ações de combate ao desperdício de energia elétrica nas escolas da Educação Básica;

Fornecer o material didático/pedagógico necessário para as atividades previstas no item anterior;

Fazer o monitoramento das ações implantadas com o apoio e critério da Área de Educação.

ATRIBUIÇÕES DA ÁREA DA EDUCAÇÃO

Disponibilizar as Escolas, os Diretores e Professores para o desenvolvimento do projeto;

Através das Escolas, incentivar, coordenar e planejar a aplicação da metodologia de combate ao desperdício de energia do PROCEL EDUCAÇÃO na Educação Básica, destinada aos professores que, por sua vez, a repassarão aos alunos deste nível de ensino;

Estabelecer critérios de monitoramento da implementação, de acompanhamento e de avaliação da metodologia junto aos professores e alunos para apropriação de resultados com o PROCEL.

O QUE DEVE FAZER UMA ESCOLA QUE DESEJE INGRESSAR NO PROJETO PROCEL NA EDUCAÇÃO BÁSICA?

Deve procurar a Secretaria de Educação Municipal ou Estadual, no caso de escola pública, ou o SINEPE - Sindicato de Escolas Particulares de cada Estado – em caso de escolas particulares, para que, através destes órgãos, em contato direto com a Concessionária de Energia Elétrica, a escola possa participar do projeto.

1.2. PROCEL EDUCAÇÃO NAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR (IESS)

No Ensino superior o PROCEL EDUCAÇÃO visa fornecer aos alunos dos cursos de engenharia, uma visão clara da situação energética do País e do Mundo, proporcionando a esses alunos ferramental apropriado para o combate ao desperdício através do uso eficiente da energia.

Nesse campo de atuação o aluno deve se aproximar das novas técnicas e tecnologias disponíveis para os equipamentos que consomem energia e de alternativas para os processos de fabricação de bens de consumo.

Para isso é necessário disseminar a disciplina “Conservação e Uso Eficiente de Energia” para os cursos de graduação de engenharias elétrica, mecânica e de produção e outras, com carga horária média de 60 horas, envolvendo as IESs, para a mudança de atitudes e aquisição de informações técnicas e tecnológicas em relação à conservação de energia, relacionando-a às questões ambientais e sócio-econômicas do País.

Consolidar essa mudança de hábitos e do uso eficiente da energia elétrica, de forma que essa nova atitude se concretize, também, no aspecto global de desenvolvimento sustentado é uma necessidade premente.

A transformação do Professor no elemento central para o desenvolvimento da disciplina é de fundamental importância, sendo ele o responsável em transmitir aos alunos, os temas relativos à conservação de energia, no segmento eficiência energética;

Para facilitar o acesso à fonte de consulta foram desenvolvidos, pela Universidade Federal de Itajubá-MG - UNIFEI, em parceria com a Eletrobrás/PROCEL, dois livros de apoio. Um livro texto, que aborda os assuntos técnicos, consequência do primeiro elaborado, totalmente revisado e outro, que mostra casos de sucesso, no país, de auditorias energéticas que foram implementadas e trouxeram resultados bastante significativos em relação à conservação de energia.

1.3. PROCEL EDUCAÇÃO NAS ESCOLAS TÉCNICAS DE NÍVEL MÉDIO

No Ensino Médio Técnico o PROCEL EDUCAÇÃO tem a oferecer aos alunos uma visão clara da situação energética do país e do mundo, mostrando a esses alunos a existência de ferramental apropriado para a conservação de energia por meio, também, do uso eficiente da energia.

Nesse campo de atuação o aluno deve se aproximar das novas técnicas e tecnologias para os equipamentos que consomem energia e de alternativas para os processos de fabricação de bens de consumo.

Para isso existe um procedimento especial de conformidade com a LDB que possibilita ao aluno deste nível de ensino das áreas de eletrotécnica, mecânica, civil, eletrônica e outras, ter acesso aos conteúdos de conservação de energia por meio da interdisciplinaridade, com ênfase na eficiência energética. As Escolas Técnicas e os Centros Federais de Educação Tecnológica - CEFETs são o público alvo para essa esperada mudança de atitudes e aquisição de informações técnicas e tecnológicas à conservação de energia, relacionando-a às questões ambientais e sócio-econômicas do País.

Consolidar essa mudança de hábitos e do uso eficiente da energia elétrica, de forma que essa nova atitude se concretize, também, no aspecto global de desenvolvimento sustentado é uma necessidade premente.

A transformação do Professor no elemento central para o desenvolvimento da disciplina é de fundamental importância, sendo ele o responsável em transmitir aos alunos, os temas relativos à conservação de energia, no segmento eficiência energética;

Para facilitar o acesso à fonte de consulta, foi desenvolvido pelo Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia – CEFERT-BA, em parceria com a Eletrobrás/PROCEL, o livro texto que aborda os assuntos técnicos e práticos como resultado da interação de professores de outras Escolas Técnicas do País.

GLOSSÁRIO

AMBIENTE

É compreendido como todo e qualquer espaço, seja ele natural ou construído pelo homem, no qual ocorrem as interações que permitem a vida.

Essas interações estabelecem uma interdependência entre os seres vivos e, também destes com os elementos abióticos, como por exemplo, o ar, o clima, etc. Como consequência desta interdependência, qualquer prejuízo ao ambiente compromete as formas de vida nele existentes.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL

É o processo educativo voltado para desenvolver conhecimentos e hábitos que levem em conta o respeito ao ambiente.

É a forma de garantir uma boa qualidade de vida, tanto para as atuais, como para as futuras gerações.

Tendo-se a clareza de que os recursos naturais não são inesgotáveis, o combate ao desperdício passa a ser um de seus objetivos fundamentais.

“Processo educativo orientado para a resolução dos problemas concretos do meio ambiente através de enfoques interdisciplinares e de uma participação ativa e responsável de cada indivíduo e da coletividade”. (Conferência de Tbilisi 14 a 26/10/77 - Geórgia - CEI)

QUALIDADE DE VIDA

Conjunto de parâmetros que determina as condições de vida de uma pessoa, proporcionando-lhe bem estar físico e mental e satisfação pessoal.

Ar puro, saneamento básico, consumo de energia, moradia, segurança, trabalho, lazer e acesso aos bens de consumo, são, entre outros, parâmetros que nos permitem avaliar a qualidade de vida de um indivíduo.

A qualidade de vida está diretamente ligada à qualidade do ambiente. Cuidar do ambiente pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida de muitos.

CIDADANIA

É a qualidade do indivíduo de gozar seus direitos civis e políticos e de desempenhar seus deveres.

É uma qualidade desejável em uma democracia em que os cidadãos têm garantidos seus direitos constitucionais e em contrapartida agem de acordo com seus deveres sociais.

Ao assumir suas responsabilidades, Estado e Cidadão, contribuem para melhorar a qualidade de vida da comunidade.

A educação constitui o mais importante instrumento para a formação desta mentalidade e, assim sendo, um povo que não tem educação qualitativa, não vive a cidadania.

Alguns Sociólogos dizem que, para se alcançar a Cidadania Plena, é necessário, antes, atingir um nível de Cultura que possibilite um claro discernimento dos direitos e dos deveres do Cidadão.

ENERGIA

É a capacidade de realizar trabalho.

Para a realização de qualquer tarefa é necessário fazer uso de uma capacidade interna ou externa ao homem, que chamamos de energia.

Ou, ainda, “aquilo que permite a mudança na configuração de um sistema, vencendo a força que se opõe a essa mudança” (Maxwell – 1872).

USO EFICIENTE DE ENERGIA ELÉTRICA

Conceito de conteúdo tecnológico voltado para a utilização de processos e equipamentos que tenham o melhor desempenho na produção dos serviços com um menor consumo de eletricidade.

Utilizando-se, por exemplo, equipamentos eficientes, estaremos contribuindo para o combate ao desperdício de eletricidade.

RACIONAMENTO DE ENERGIA

Conceito mutilador da qualidade de vida tem duração determinada e é implantado em situações emergenciais quando há crise de abastecimento de energia, por algum motivo qualquer.

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

O PROCEL, sendo um programa de conservação de energia, nada tem a ver com racionamento de energia. Ao PROCEL interessa combater o desperdício de energia através da mudança de hábitos e do uso eficiente de energia. Vale a pena tecer mais reflexões sobre esta palavra que traduzida do Inglês, tem significado dúbio.

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA:

Conceito sócio-econômico que traduz a necessidade de se retirar do planejamento da expansão do sistema elétrico, a componente referente ao desperdício. Isso permite a redução dos investimentos no setor elétrico, sem comprometer o fornecimento de energia e a qualidade devida.

COMO CONSERVAR A ENERGIA?

Dois caminhos:

1) Vertente humana:

O cidadão recebe informações compatíveis, que o auxiliam a se inserir no contexto da nova situação, induzindo-o à mudança de hábitos, atitudes e futura mudança de comportamento.

2) Vertente tecnológica:

Através de treinamento específico, o técnico é inserido nas questões da eficiência energética, entrosando-se com novas técnicas e tecnologias, tanto de equipamentos como de processos, reduzindo significativamente o consumo de energia de uma instalação, sem comprometer o produto final.

Capítulo 2

ENERGIA: CONCEITOS E FUNDAMENTOS

Das mais diversas maneiras, a energia está presente em nosso dia a dia. É assim, por exemplo, quando usamos motores ou músculos, quando acendemos o queimador de um fogão, quando nos alimentamos ou mesmo quando nos informamos pela televisão ou nos jornais, que freqüentemente se referem a alguma questão energética no Brasil ou no mundo. Por tal diversidade, o campo dos estudos energéticos é bastante vasto, cobrindo desde o uso dos recursos naturais até os aspectos relacionados ao desempenho das modernas tecnologias, bem como permitindo uma abordagem que considere apenas os temas de caráter técnico ou envolva seus componentes sócio-econômicos e ambientais, inclusive quanto à sua evolução histórica e suas perspectivas futuras. Para este largo campo do saber, cuja extensão é também uma medida de sua fronteira com o desconhecido, procura-se nestas notas efetuar uma revisão das definições, das leis básicas e da terminologia empregada, fornecendo elementos para os posteriores estudos e avanços na área energética, em particular buscando fundamentar a racional utilização dos fluxos de energia.

2.1. DEFINIÇÕES

Poucas palavras suportam tantos sentidos e definições como energia. Já no Século IV A.C. , Aristóteles em sua obra *Metafísica*, identificava energia (*"energeia"*) como uma realidade em movimento. Na acepção moderna, energia corresponde essencialmente a um conceito desenvolvido a partir de meados do Século XIX, tendo sido criado juntamente com a Termodinâmica e utilizado atualmente para descrever uma ampla variedade de fenômenos físicos. A definição mais usual, que quase corresponde ao senso comum e é encontrada em muitos livros, afirma que *"energia é a medida da capacidade de efetuar trabalho"*. Entretanto, a rigor, esta definição não é totalmente correta e aplica-se apenas a alguns tipos de energia, como a mecânica e a elétrica, que, em princípio, são totalmente conversíveis em outras formas de energia. Este modo de se definir energia perde o sentido ao ser aplicado ao calor, pois esta forma de energia é apenas parcialmente conversível em trabalho, como se verá adiante. De fato, quando está a temperaturas próximas à do ambiente, o calor pouco vale como trabalho. E, portanto, a definição anterior não é completa.



Figura 2.1 - James Clerk Maxwell (1831-1879)

Em 1872, Maxwell propôs uma definição que pode ser considerada mais correta do que a anterior: *“energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste à esta mudança”*. Esta definição refere-se a mudanças de condições, a alterações do estado de um sistema e inclui duas idéias importantes: as modificações de estado implicam em vencer resistências e é justamente a energia que permite obter estas modificações de estado. Assim, para elevar uma massa até uma determinada altura, aquecer ou esfriar um volume de gás, transformar uma semente em planta, converter minério em ferramentas, jogar futebol, ler este texto, sorrir, enfim, qualquer processo que se associe a alguma mudança, implica em se ter fluxos energéticos. Cabe observar que na terminologia termodinâmica denomina-se *sistema* à região de interesse, delimitada por uma fronteira, que pode existir fisicamente ou ser uma superfície idealizada, que a separa do ambiente, que nesse caso significa portanto tudo aquilo que está fora da região de interesse. Desta forma, o universo, o todo, resulta da soma do sistema com o ambiente.

Por ser um conceito tão fundamental, definir energia é sem dúvida mais difícil e menos importante do que sentir e perceber sua existência, como a causa e origem primeira de todas as mudanças. Não obstante, depois que aprendemos sua definição mais abrangente e rigorosa, como visto acima, passa a ser um pouco mais simples entender as permanentes mudanças que acontecem em nosso mundo e suas regras. Boa parte das leis físicas que governam o mundo natural são no fundo variantes das leis básicas dos fluxos energéticos, as eternas e inescapáveis leis de conservação e dissipação, que estruturam todo o Universo, desde o micro ao macrocosmo.

Um conceito freqüentemente associado à energia é o da *potência*, que corresponde ao fluxo de energia no tempo, de enorme importância ao se tratar de processos humanos e econômicos, onde o tempo é essencial. Por exemplo, a taxa na qual um material é oxidado pode levar a uma grande diferença, desde representar a possibilidade de sua utilização como combustível ou apenas a formação lenta de um resíduo, como é caso respectivamente da queima de madeira e da formação da fer-

rugem. Ambos são processos energéticos, mas de sentido totalmente diverso devido às distintas taxas ou velocidades nas quais ocorrem. Em geral, estamos preocupados em atender uma dada demanda energética, medida em kWh, kJ ou kcal, mas sob uma imposição de tempo, ou seja, com dado requerimento de potência, avaliada em kW.

Em princípio, qualquer capacidade instalada poderia atender qualquer necessidade de energia, desde que lhe seja dado tempo suficiente, o que evidentemente não atende às necessidades impostas pela realidade. Por isso, podemos afirmar que a sociedade moderna, que busca atender suas demandas energéticas de forma rápida, é tão ávida em potência quanto em energia. Para explorar um pouco mais estes conceitos, poderia se pensar em nossos usos diários de energia e verificar se para seu atendimento o tempo importa ou não. Será imediato verificar que a taxa de utilização dos fluxos energéticos é tão importante quanto sua mera disponibilidade.

Adicionalmente, poderia ser notado também que o próprio tempo só pode ser definido rigorosamente a partir dos fluxos energéticos reais, mas detalhar isto escapa aos propósitos destas notas.

2.2. AS FORMAS DA ENERGIA

A energia, entendida como a capacidade de promover mudanças de estado, pode apresentar-se fisicamente de diversas formas. De uma maneira geral, um potencial energético corresponde sempre ao produto entre uma variável extensiva, cujo módulo depende da quantidade considerada, e uma variável de desequilíbrio, expressando uma disponibilidade de conversão entre formas energéticas. É importante observar ainda que apenas nos processos de conversão se identifica a existência de energia, que, então, se apresenta, na fronteira do sistema, como calor ou como trabalho.

De um modo sucinto, pode-se definir *calor* como o fluxo energético decorrente de diferença de temperatura, enquanto por *trabalho* se entende todo processo análogo à elevação de um peso. Esta distinção é fundamental e será posteriormente melhor explorada, podendo desde já se reconhecer que o trabalho corresponde a uma variação ordenada de energia, enquanto o calor apresenta-se desordenado. Descrevem-se a seguir as principais formas de energia.

Fundamentais para os processos básicos de conversão energética no Universo, em nível atômico, podem ser identificadas as *energias nuclear e atômica*. No interior das estrelas, inclusive no Sol, a energia nuclear resulta da fusão dos núcleos de átomos leves, como do hidrogênio, em um processo físico onde ocorre uma diferença (déficit) de massa, entre os reagentes e os produtos de reação, que corresponde a significativas quantidades de energia liberada. Trata-se de um processo de sedutoras possibilidades para a geração de energia comercial, mas de difícil controle

e, na atualidade, na escala das realizações humanas, sua única aplicação tem sido destrutiva, nas bombas de hidrogênio. Já a energia atômica relaciona-se com processos de fissão de átomos pesados, como urânio, tório e plutônio, em decorrência da instabilidade natural ou provocada de alguns isótopos destes materiais, que tendem a converter-se em outros materiais com número atômico mais baixo, com liberação de energia devido à perda de massa observada. A energia resultante destes processos também é elevada e se apresenta, essencialmente, como calor, mas o controle das reações tem sido conseguido, e, assim, além das bombas atômicas, a energia da fissão tem sido empregada como fonte energética para geração de energia elétrica e para mover navios e submarinos, mediante ciclos térmicos.

A dependência entre a variação de massa observada nos processos de fusão nuclear ou fissão atômica e a energia liberada, é dada pela conhecida expressão proposta em 1922 por Einstein, mostrada a seguir, onde m refere-se à diferença de massa na reação e, c , à velocidade da luz. Deve-se observar que, como a velocidade da luz é bastante elevada (3×10^8 m/s), pequenas variações de massa correspondem a grandes disponibilidades de energia.

$$E = m \cdot c^2 \tag{2.1}$$

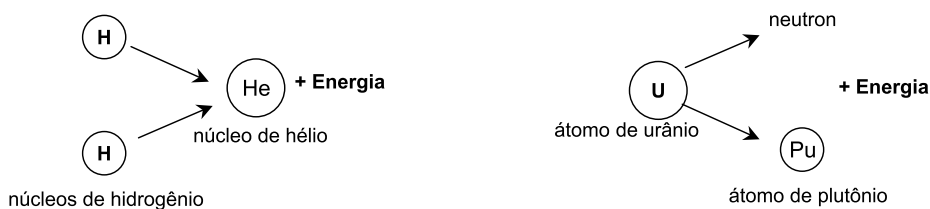


Figura 2.2 - Energia nuclear e atômica

Dependendo de reações químicas e da liberação da energia acumulada na forma de ligações entre os átomos e moléculas, a *energia química* apresenta grande interesse por sua extensa aplicação. Por exemplo, a energia dos combustíveis é, na realidade, energia química. De um modo sucinto, pode-se afirmar que, nas reações espontâneas, as ligações químicas existentes nas moléculas dos reagentes, contêm mais energia do que as ligações observadas nas moléculas dos produtos. Sua aplicação típica associa-se aos processos de combustão nos motores, fornos e caldeiras, onde a energia química de materiais como gasolina, álcool, óleo combustível e lenha é convertida em energia térmica, na forma de gases, sob altas temperaturas. O conteúdo energético dos combustíveis é medido por seu Poder Calorífico, um parâmetro que fornece a quantidade de calor disponível por unidade de massa ou de volume do combustível. Também nas baterias químicas e nas pilhas elétricas se observam processos envolvendo energia química e eletricidade.

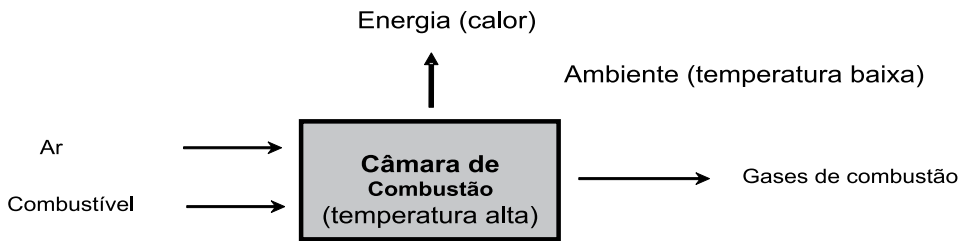


Figura 2.3 - Energia química nas reações de combustão

Para disponibilizar a energia química dos combustíveis, além das tecnologias empregando combustão, existem, na atualidade, perspectivas promissoras para as técnicas de conversão direta, aplicadas nas chamadas “*células de combustível*”, que produzem diretamente energia elétrica a partir de combustíveis, com alta eficiência, mediante reações isotérmicas a temperaturas relativamente baixas. Reações similares são realizadas nos músculos dos animais e do homem, permitindo a transformação da energia química dos alimentos, uma espécie de combustível, em energia mecânica nos músculos para suas atividades vitais, em processos de baixa temperatura.

Embora seja correto considerar-se a existência de *energia elétrica* nas cargas estacionárias, como se observa nas nuvens eletricamente carregadas e na iminência de uma descarga atmosférica ou ainda nos capacitores elétricos, a energia elétrica é mais freqüentemente associada à circulação de cargas elétricas através de um campo de potencial elétrico, sendo definida assim pelo produto entre a potência elétrica e o tempo durante o qual esta potência se desenvolve. Por sua vez, a potência elétrica é dada como o produto entre a corrente e a tensão medida entre os dois pontos onde circula tal corrente. Os dois tipos básicos de corrente elétrica são a *corrente contínua*, quando seu valor é constante com o tempo, como ocorre nas baterias, ou a *corrente alternada*, que varia de modo senoidal com o tempo, no caso brasileiro e americano com freqüência de 60 Hz, enquanto na Europa adota-se 50 Hz. A corrente alternada é mais usada por ser a forma mais simples para produzir, transportar e utilizar em motores elétricos.

No caso particular da corrente alternada trifásica, onde uma carga é alimentada por três condutores com corrente alternada equilibrada, a potência fornecida é dada pela expressão abaixo;

$$P_{e3} = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \quad (2.2)$$

onde V e I correspondem respectivamente à tensão entre as fases e à corrente em uma das fases. Outra particularidade importante da corrente elétrica alternada é a possibilidade de separar sua potência em dois componentes básicos: a *potência ativa*, associada às cargas de caráter resistivo e portanto à sua efetiva utilização, e a *potência reativa*, decorrente da formação periódica de campos elétricos e magnéticos no circuito, sem efeito útil.

A *energia térmica*, às vezes equivocadamente denominada de calor, pode apresentar-se essencialmente de duas formas: *radiação térmica* ou *energia interna*. A rigor, e como já comentado, o calor corresponde a um fenômeno observável apenas na fronteira de um sistema onde existe uma diferença de temperaturas, como mostrado na Figura 2.3, onde a energia térmica resulta da conversão da energia química, mediante uma reação de combustão. Vale notar que um fluxo de calor pode resultar tanto de uma variação de energia térmica como de outra forma energética, energia nuclear por exemplo.

Como radiação térmica, por exemplo, na radiação solar, a energia térmica não apresenta qualquer meio material de suporte, já que se trata de uma radiação eletromagnética, com magnitude e distribuição espectral dada basicamente em função da temperatura do corpo emissor. A figura abaixo mostra como pode ser esta distribuição para corpos a duas temperaturas diferentes. Vale observar que a radiação térmica é de fato uma potência e a energia associada pode ser determinada por sua integral no tempo.

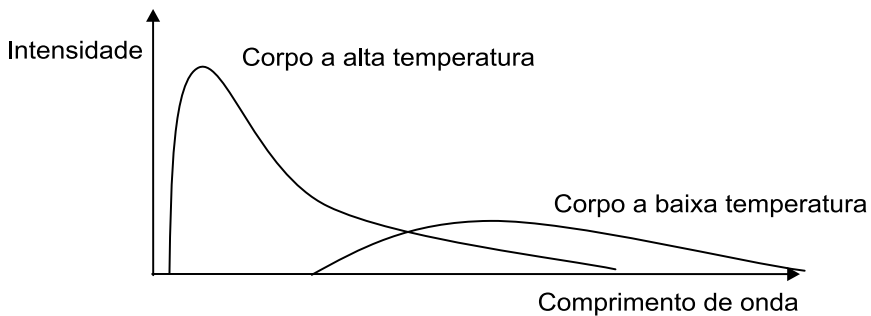


Figura 2.4 - Distribuição espectral da radiação térmica

A energia interna corresponde à capacidade de promover mudanças, associada à agitação térmica de um material, que pode ser medida por sua temperatura. No caso de sistemas monofásicos, onde a variação da energia interna implica em variação de temperatura, o calor específico expressa a relação entre esta energia e a variação de temperatura. No caso de sistemas em mudança de estado (fusão, evaporação, etc.) e portanto com duas fases, o calor latente indica esta variação isotérmica. Nomes como calor latente e calor específico, ainda hoje extensamente usados, são uma lembrança do tempo em que se acreditava, equivocadamente, que calor se armazenava nas substâncias. Particularmente para gases, a variação da energia interna ∂U relaciona-se com a variação da temperatura ∂T através do Calor Específico a volume constante, como mostra a expressão a seguir.

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \quad (2.3)$$

A transferência de energia interna de um corpo para outro se dá mediante os processos de *condução de calor*, quando a energia flui através de meios estáticos, ou processos de *convecção térmica*, quando o fluxo de energia está necessariamente associado à movimentação de um fluido, que pode ocorrer de modo forçado ou natural, nesse último caso com o escoamento sendo uma decorrência das variações de densidade do fluido em função da temperatura. Uma panela com água sendo aquecida na chama de um fogão a gás pode ser um interessante exemplo da variedade de processos energéticos envolvidos desde a combustão do gás até a acumulação de energia na água.

Outra forma energética com importantes variações é a *energia mecânica*, que pode ser *potencial* ou *cinética*. No primeiro caso, a energia mecânica associa-se diretamente a uma força estática e pode ser *potencial elástica*, tal como se acumula em molas ou em gases comprimidos, ou *gravitacional*, dependendo da posição de uma massa em um campo gravitacional. Um bom exemplo desta última forma de energia é a energia hidráulica na água acumulada em uma represa. A potência associada à utilização da energia hidráulica pode ser definida pela expressão a seguir;

$$P_{\text{hidr}} = \gamma \cdot \dot{V} \cdot \Delta h \quad (2.4)$$

onde γ corresponde ao peso específico da água, \dot{V} à vazão volumétrica e Δh à altura disponível da queda. A energia mecânica cinética, que se associa à inércia das massas em movimento, pode considerar velocidades lineares, como é o caso da energia eólica, ou movimentos rotacionais, como dos volantes de inércia.

As formas anteriormente apresentadas não esgotam todas as maneiras de se considerar a energia, que existirá sempre que houver possibilidade de promover alguma mudança de estado, em uma ampla acepção. Assim, poderiam, por exemplo, ser definidas a *energia magnética*, acumulada na forma de campos magnéticos e utilizada de modo prático na transformação de energia elétrica em transformadores, a *energia elástica associada à tensão superficial* de um líquido e que se mostra na formação de bolhas de sabão, a *energia difusiva decorrente da diferença de concentrações* entre gases, líquidos e sólidos solúveis, e diversas outras formas de menor importância.

As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam alguns valores para a energia e a potência associados a processos reais, naturais ou tecnológicos, cobrindo uma ampla gama de situações (Smil, 1990 e Culp, 1991). Os valores de duração apresentados na Tabela 2.2 são basicamente uma referência para comparar as magnitudes energéticas envolvidas, não se aplicando em todos os casos. Como pode ser observado, as va-

riáveis energéticas permitem traduzir em uma mesma linguagem fenômenos aparentemente sem qualquer semelhança como poderiam ser o movimento da Terra em torno do Sol e o consumo anual de gasolina de um veículo, ou um terremoto e o metabolismo basal de um homem adulto. Sempre que existir algo em transformação, crescendo ou diminuindo, mudando de aspecto ou de condição, existem fluxos energéticos se manifestando.

Tabela 2.1 - Energia disponível em sistemas reais

Sistema	Energia (J)
Energia cinética da translação da Terra em torno do Sol	$2,6 \times 10^{34}$
Energia total (radiação térmica) emitida pelo Sol durante 24 horas	$3,0 \times 10^{32}$
Radiação solar recebida pela Terra durante 24 horas	$5,5 \times 10^{24}$
Energia química nos recursos globais de carvão mineral	$2,0 \times 10^{23}$
Energia química na cobertura vegetal terrestre	$2,0 \times 10^{22}$
Energia química fixada fotossinteticamente em um ano na vegetação terrestre	$2,0 \times 10^{21}$
Energia térmica e mecânica em um furacão típico do Caribe	$3,8 \times 10^{19}$
Energia elétrica total anual em descargas atmosféricas	$3,2 \times 10^{18}$
Maior bomba-H testada em 1961	$2,4 \times 10^{17}$
Bomba atômica lançada em Hiroshima em 1945	$8,4 \times 10^{13}$
Energia química em 100 ton. de carvão mineral	$2,5 \times 10^{12}$
Uma boa colheita em um hectare de milho (8 ton.)	$1,2 \times 10^{11}$
Consumo anual de gasolina de um carro compacto	$4,0 \times 10^{10}$
Energia química em um barril de petróleo	$6,5 \times 10^9$
Energia química na alimentação diária de um homem adulto	$1,0 \times 10^7$
Energia química em uma garrafa de vinho branco	$2,6 \times 10^6$
Energia cinética em uma bola de tênis (50 g) servida a 25 m/s	$1,5 \times 10^1$
Energia cinética em uma gota de chuva caindo a 6 m/s	$7,5 \times 10^{-5}$
Energia para o salto de uma pulga	$1,0 \times 10^{-7}$
Energia média na fissão de um átomo de urânio (U235)	$1,0 \times 10^{-10}$
Energia cinética média dos elétrons de átomos a 20°C	$1,0 \times 10^{-20}$

Tabela 2.2 - Níveis de potência de processos reais

Processo ou fenômeno	Duração (s)	Potência (W)
Potência liberada pelo Sol	-	$3,4 \times 10^{27}$
Radiação solar interceptada pela Terra	-	$1,7 \times 10^{17}$
Ondas geradas no mar pelo vento	-	$9,0 \times 10^{16}$
Terremoto (magnitude 8 graus Richter)	30	$1,6 \times 10^{15}$
Produção fotossintética primária média na Terra	-	$1,0 \times 10^{14}$
Grande erupção vulcânica	10^4	$1,0 \times 10^{14}$
Relâmpago gigante	10^{-5}	$2,0 \times 10^{13}$
Fluxo de calor latente de uma tempestade	1200	$1,0 \times 10^{12}$
Potência cinética de uma tempestade	1200	$1,0 \times 10^{11}$
Grande "raid" de bombardeio aéreo da II Guerra Mundial	3600	$2,0 \times 10^{10}$
Tornado de médio porte	160	$1,7 \times 10^9$
Turbogerador a vapor de grande porte	-	$1,0 \times 10^9$
Transporte ferroviário pesado	10^4	$5,0 \times 10^6$
Consumo de um supermercado típico de médio porte	-	$1,5 \times 10^6$
Potência de eixo de um carro de corrida, F-1	-	$8,0 \times 10^5$
Transporte rodoviário em caminhão de grande porte	10^4	$3,0 \times 10^5$
Percurso de 20 km em um veículo a gasolina	1200	$4,0 \times 10^4$
Corrida de 100 m rasos	10	$1,3 \times 10^3$
Ciclo simples em uma máquina de lavar	1500	$5,0 \times 10^2$
Metabolismo basal de um homem de 70 kg	-	$8,0 \times 10^1$
CD-player tocando a última Sinfonia de Mozart	2238	$2,5 \times 10^1$
Uma vela queimando até o final	1800	$3,0 \times 10^0$
Produtividade média de um m ² de floresta tropical	-	$1,0 \times 10^0$
Vôo de um beija-flor	300	$7,0 \times 10^{-1}$
Coração de um recém-nascido	-	$4,0 \times 10^{-1}$

2.3. AS LEIS DAS CONVERSÕES ENERGÉTICAS

Uma característica essencial dos potenciais energéticos, sempre entendidos como os potenciais para a promoção de mudanças, é a sua possibilidade de interconversão. Isto é, uma forma energética eventualmente pode ser convertida em outra, de modo espontâneo ou intencional, permitindo nesse último caso adequar-se a alguma utilização desejada. Frequentemente se empregam as expressões "processos

de geração de energia” ou “sistemas de consumo de energia”, quando o mais correto, a rigor, seria falar em “processos de conversão de energia”. A figura a seguir apresenta as principais formas de conversão entre seis formas básicas de energia (adaptado de Tronconi, 1987), podendo se observar que, enquanto alguns processos foram desenvolvidos e aperfeiçoados pelo homem, outros só são possíveis mediante processos naturais, como a conversão energética muscular e a fotossíntese. Nesta figura pode-se também notar como são bastante variados os processos que resultam em energia térmica e como a energia mecânica está envolvida em diversos processos tecnológicos.

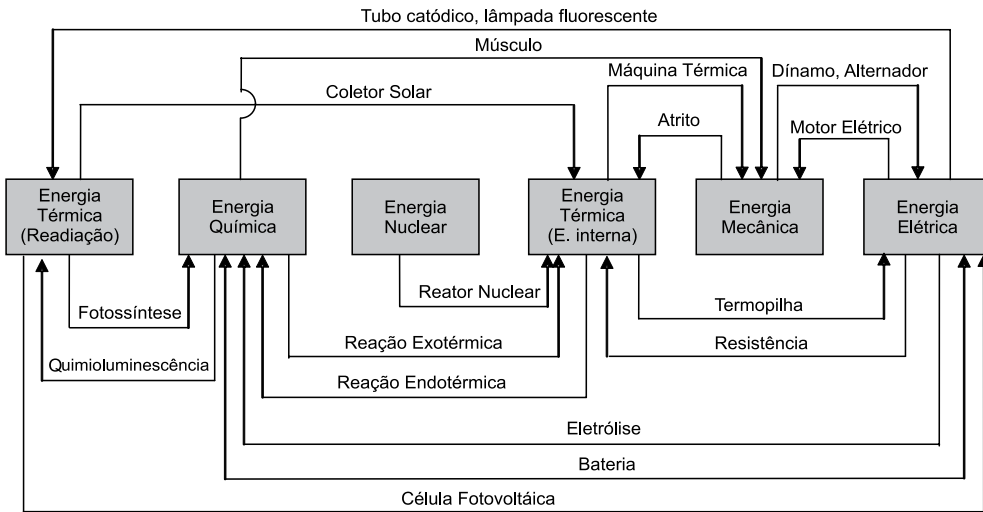


Figura 2.5 - Processos de conversão energética

Quaisquer que sejam os sistemas considerados e as formas de energia envolvidas, todos processos de conversão energética são regidos por duas leis físicas fundamentais, que constituem efetivamente o arcabouço essencial da ciência energética. A História da Ciência se refere freqüentemente ao caráter revolucionário destas formulações e à dificuldade de sua assimilação pelos estudiosos ao longo do tempo, como decorrência do impacto de seus conceitos. Estas relações físicas de enorme importância, que se sustentam apenas pela observação de processos reais desde o microcosmo até a escala das estrelas, são apresentadas a seguir.

A primeira lei básica é a *Lei da Conservação da Energia*. Segundo este postulado, energia não se cria nem se destrói, salvo nos casos em que ocorrem reações atômicas ou nucleares e então podem se observar transformações de massa em energia. Assim, pode-se mostrar que a soma da energia e da massa do universo é uma constante. Como na grande maioria das situações, tal dualidade massa-energia não precisa ser considerada, é suficiente afirmar que, em um dado período de tempo, a

somatória dos fluxos e estoques energéticos em um processo ou sistema é constante, como se apresenta na expressão abaixo;

$$\sum E_{\text{entra}} = \sum E_{\text{sai}} + \Delta E_{\text{sistema}} \quad (2.5)$$

Por exemplo, seja uma panela com água em aquecimento. A elevação da temperatura do líquido é a manifestação sensível de sua mudança de estado e está correlacionada diretamente com o incremento de energia no sistema, resultante de um aporte de energia pela chama do gás sob a panela. Em outras palavras, há uma entrada de energia mais elevada que a saída, determinada pelas perdas para o ambiente. Note-se que a aplicação desta lei pressupõe uma convenção de sinais para os fluxos energéticos, convencionando-se como positivo o que tende a aumentar a energia do sistema.

Para um processo em regime permanente, no qual não ocorrem variações no tempo, não ocorrerão variações de estoque, $\Delta E_{\text{sistema}}$, e, naturalmente, a soma dos fluxos energéticos na entrada e na saída devem ser iguais. Esta situação tem grande interesse prático, pois na maioria dos casos estamos interessados em sistemas operando em condição normal ou estável.

A Lei da Conservação de Energia também é conhecida como Primeira Lei da Termodinâmica e foi formalmente estabelecida em torno de 1840 por Joule e Meyer, trabalhando de modo independente. Ela permite efetuar balanços energéticos, determinar perdas, quantificar enfim, fluxos energéticos. Baseia-se também nesta lei, o conceito de desempenho ou eficiência energética de um sistema energético, η_{energ} , relacionando o efeito energético útil com o consumo energético no sistema, como se explicita na figura e equações abaixo, válida para um sistema em regime permanente. Lembre-se que, como energia nunca desaparece, mas apenas muda de forma, a palavra "consumo" refere-se efetivamente ao aporte de energia.

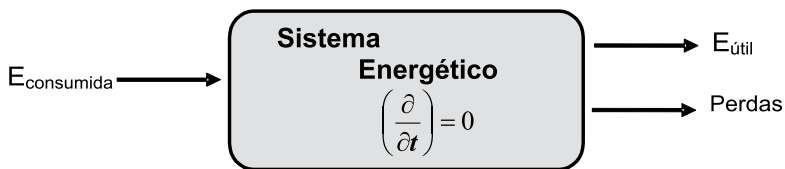


Figura 2.6 - Sistema energético generalizado

$$\eta_{\text{energ}} = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{consumida}}} = \frac{E_{\text{consumida}} - \text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} = 1 - \frac{\text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} \quad (2.6)$$

A outra relação física básica dos processos energéticos é a *Lei da Dissipação da Energia*, segundo a qual, em todos os processos reais de conversão energética, sempre deve existir uma parcela de energia térmica como produto. Por exemplo, se o objetivo do processo é transformar energia mecânica em calor, tal conversão pode ser total, aliás como ocorre nos freios, mas se o propósito for o inverso, a conversão de energia térmica em energia mecânica será sempre parcial, pois uma parcela dos resultados deverá sempre ser calor. Em outras palavras, existem inevitáveis perdas térmicas nos processos de conversão energética, que se somam às outras perdas inevitáveis decorrentes das limitações tecnológicas e econômicas dos sistemas reais, tais como isolamento térmico imperfeito, atrito, perdas de carga e inércias, entre outras.

Como mostrou Clausius em 1865, as imperfeições nos processos de conversão energética determinam o incremento líquido da entropia no Universo. Assim, a entropia tende sempre a aumentar no mundo real, já que apenas nos processos energéticos idealmente perfeitos ou reversíveis, não ocorre esta geração de entropia. Esta lei física, também conhecida como Segunda Lei da Termodinâmica, apresenta especial relevância no caso dos ciclos térmicos de potência, nos quais a conversibilidade dos fluxos de calor em energia mecânica depende da temperatura da fonte térmica, conforme a expressão do rendimento máximo da máquinas térmicas, desenvolvida por Carnot em 1824 e mostrada a seguir:

$$\eta_{\text{revers}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.7)$$

Nesta expressão, válida para máquinas térmicas reversíveis, T_1 e T_2 correspondem respectivamente à temperaturas absolutas das fontes térmicas de alta e baixa temperatura, cuja existência é imprescindível para a produção de potência mecânica. Além disso, deve-se observar que este rendimento é sempre inferior a 100%, incrementando-se com a elevação de T_1 e a redução de T_2 , indicando que os fluxos de calor apresentam um potencial de conversão em trabalho que depende das temperaturas envolvidas. Como o trabalho sempre é totalmente conversível em qualquer outra forma de energia e o calor sempre mostra esta limitação, considera-se que aquelas energias diretamente conversíveis em trabalho são energias nobres, enquanto as energias térmicas correspondem a energias de baixa qualidade.



Figura 2.7 - Rudolf Clausius (1822-1888)

De fato, o conceito de qualidade da energia associa-se a sua capacidade de conversão em trabalho, que pode ser fornecida pela *exergia*, denominação sugerida por Rant (1956) para a parcela “útil” dos fluxos energéticos. Deste modo, um fluxo de energia elétrica ou mecânica corresponde totalmente a exergia, ao passo que a exergia de um fluxo de calor depende de sua temperatura e da temperatura do ambiente. Nos processos reais de conversão energética sempre ocorre alguma destruição de exergia, que de modo distinto da energia, não se conserva.

Como já comentado, um conceito muito importante relacionado com a dissipação energética e as perdas em processos de conversão energética é a entropia, cuja variação permite medir a perfeição de um processo qualquer. De um modo geral, tem-se que a variação da *entropia* em um processo pode ser calculada por:

$$\Delta S = \left(\frac{Q}{T} \right)_{\text{rever}} + S_{\text{gerada}} \quad (2.8)$$

onde se observam dois termos: uma parcela reversível, determinada pela troca de calor, e uma parcela irreversível ou gerada, de magnitude proporcional às perdas no processo. Assim, como já afirmado, a variação de entropia serve para avaliar a perfeição de processos de conversão energética. Por exemplo, em sistemas adiabáticos, isto é, sem troca de calor, os processos ideais devem ser isentrópicos (sem variação de entropia), apresentando portanto S_{gerada} nula. Como os processos reais sempre apresentam imperfeições e perdas, a entropia sempre tende a se incrementar, podendo-se afirmar que “a entropia do Universo tende para um máximo”. Na geração de entropia, é perdido como calor um potencial para produzir trabalho, ou seja, a energia se degrada em qualidade. O Teorema de Gouy-Stodola relaciona a entropia gerada e o trabalho perdido, também chamado de irreversibilidade;

$$W_{\text{perdido}} = T_0 \cdot S_{\text{gerada}} = \text{Irreversibilidade} \quad (2.9)$$

onde T_0 refere-se à temperatura ambiente. Em síntese, processos reais de conversão energética apresentam perdas, que podem ser avaliadas em termos da geração de entropia ou da destruição de exergia, correspondendo sempre à redução da qualidade do fluxo energético e produção de calor. A Tabela 2.3 compara os conceitos de energia e exergia.

Tabela 2.3 - Comparação entre Exergia e Energia

ENERGIA	EXERGIA
Obedece à lei da conservação	Não está sujeita a essa lei
É função do estado da matéria sob consideração	É função do estado da matéria sob consideração e da matéria no meio ambiente
É função do estado da matéria sob consideração	O estado de referência é imposto pelo meio ambiente, o qual pode variar
Aumenta com o crescimento da temperatura	Para processos isobáricos alcança um mínimo na temperatura do meio ambiente; nas temperaturas menores ela aumenta quando a temperatura diminui

Ao contrário do rendimento energético, baseado na Lei da Conservação da Energia e apresentado na equação 2.6, o rendimento exergético fundamenta-se em ambas leis básicas das conversões energéticas e apresenta várias formulações, algumas delas dadas a seguir, sendo-lhe atribuídos ainda diversos outros nomes, tais como grau de perfeição, efetividade, eficiência racional, rendimento isentrópico dentre outros. A figura a seguir apresenta um sistema genérico considerado para a determinação deste parâmetro de desempenho, devendo-se observar que como produto tem-se as parcelas de exergia utilizada, exergia perdida (associada a geração de entropia) e exergia não utilizada.

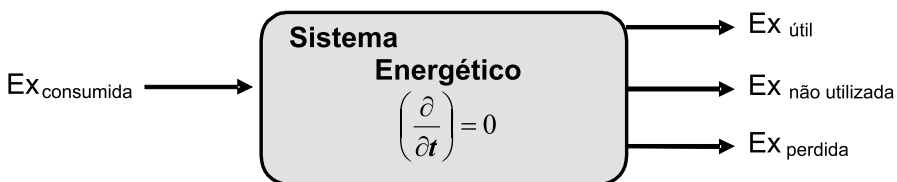


Figura 2.8 - Sistema energético generalizado, considerando os fluxos de exergia

As formulações mostradas a seguir são apresentadas por Lizarraga [1987]. A primeira considera a razão entre a exergia necessária para alcançar um determinado objetivo através de um processo totalmente reversível e a exergia consumida num processo real para atingir o mesmo objetivo. Essa formulação é similar ao rendimento isentrópico de uma turbina. A segunda é similar à definição do rendimento energético e indica que parcela da exergia fornecida ao processo é convertida. A terceira considera que a exergia empregada no processo é somente a diferença entre a exergia suprida e a exergia dos fluxos residuais.

$$\varepsilon_1 = \frac{Ex_{\text{util}}}{Ex_{\text{consumida}}} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{Ex_{\text{util}} + Ex_{\text{nautilizada}}}{Ex_{\text{consumida}}} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{Ex_{\text{util}}}{Ex_{\text{consumida}} - Ex_{\text{nautilizada}}} \quad (2.12)$$

O rendimento ε_2 , denominado grau de perfeição por Beyer e Fratzscher, citados em Szargut [1980], é usado sempre que se pode definir claramente um produto para o processo sendo analisado como é o caso da determinação do rendimento exergético de uma caldeira e de uma central termelétrica. Por outro lado, quando se está analisando partes de um processo, usa-se geralmente ε_3 no caso de fluxos residuais constituírem o suprimento de exergia da etapa seguinte do processo e ε_2 caso a etapa analisada seja terminal, com os fluxos residuais sendo lançados no meio ambiente. Nos processos puramente dissipativos, onde é impossível distinguir com clareza um produto, como é o caso dos processos de mistura, estrangulamento, etc., deve-se calcular o rendimento exergético através da formulação abaixo proposta por Bosnjakovic, citado por Souza [1967]. Nesses processos o rendimento energético perde seu sentido de ser, pois a energia é sempre conservada.

$$\varepsilon_4 = \frac{\sum Ex_{\text{saído processo}}}{\sum Ex_{\text{entranoprocso}}} = 1 - \frac{\text{Irreversibilidade}}{\sum Ex_{\text{entranoprocso}}} \quad (2.13)$$

Tabela 2.4 - Eficiências de energéticas e exergéticas (Gallo e Milanez, 1990)

Sistema	Rendimento	
	Energético	Exergético
Central a Vapor (200 MW)	0.41	0.40
Turbina a Gás (25 MW)	0.30	0.30
Motor Diesel (20.000 HP)	0.40	0.40
Motor Elétrico (5 HP)	0.70	0.70
Turbina a Vapor (50 MW)	0.90	0.85
Sistema de Cogeração (10 MW)	0.75	0.33
Queimador de GLP, doméstico	0.90	0.50
Aquecedor Elétrico de Água	0.60	0.10
Caldeira (200 ton./h)	0.93	0.08
Sistema de Ar Condicionado (COP = 2,5)	-	0.17
Refrigerador Doméstico (COP = 0,9)	-	0.10
Bomba de Calor (COP = 3,5)	-	0.60

A Tabela 2.4 apresenta uma comparação de rendimentos energético e exergético para alguns processos e equipamentos, apresentando valores semelhantes em alguns casos e muito diferentes em outros, como no aquecimento através de energia elétrica, onde apesar da conservação da energia, é evidente sua degradação, pela conversão de energia de alta qualidade como energia elétrica em calor de baixa temperatura. Em outros equipamentos, usados para a produção de baixas temperaturas, não se definem eficiências energéticas, pelo menos na forma apresentada na expressão 6, preferindo-se empregar o coeficiente de performance, COP, como indicador de desempenho, que relaciona o efeito frigorífico obtido pelo sistema e a demanda de potência eletromecânica associada. Em todos os casos estes números devem ser considerados como referências e valores típicos, podendo variar bastante caso a caso.

2.4. RECURSOS ENERGÉTICOS

Denominam-se recursos energéticos as reservas ou fluxos de energia disponíveis na Natureza e que podem ser usados para atender às necessidades humanas, podendo ser classificadas essencialmente como *recursos fósseis* ou como *recursos renováveis*. No primeiro caso, referem-se aos estoques de materiais que armazenam energia química, acumulada primariamente a partir da radiação solar em épocas geológicas, como é o caso do petróleo, carvão mineral, turfa, gás natural, xisto betuminoso, bem como podendo acumular energia atômica na forma de material físsil, por exemplo o urânio e o tório.

Enquanto as reservas de energia fóssil, quer sejam medidas, indicadas ou estimadas, são necessariamente finitas e portanto se reduzem à medida em que são consumidas, os recursos energéticos renováveis são dados por fluxos naturais, como ocorre na energia solar, em suas distintas formas, como na energia hidráulica, na energia eólica, na energia das ondas do mar e na energia da biomassa, bem como nos fluxos energéticos dependentes do movimento planetário, por exemplo, a energia talassomotriz, associada à variação do nível do mar nas marés e à energia geotérmica, que na escala das realizações humanas existe como potência disponível. É importante observar que a utilização inadequada de alguns potenciais energéticos renováveis pode determinar sua exaustão, como acontece em reservatórios geotérmicos sobreexplorados ou nos recursos de biomassa, quando explorados além de sua taxa natural de reposição. Assim, se uma reserva florestal for explorada acima de sua taxa típica de renovação sustentável, que para formações tropicais homogêneas é da ordem de 15 tEP por hectare e por ano, o recurso energético perderá seu caráter de renovabilidade.

A Tabela 2.5 apresenta os níveis das reservas energéticas brasileiras tal como constam do Balanço Energético Nacional e no Anuário da Agência Nacional do Petróleo, em valores para 1999. Observe-se que as reservas fósseis são dadas em termos de energia e podem se alterar com a descoberta de novos depósitos, enquanto a energia hidráulica, por ser renovável, é apresentada como potência. Isto torna mais complexa a comparação de sua magnitude relativa, que irá depender das taxas de extração assim como das qualidades da energia disponíveis. Certamente 1 kWh de energia hidráulica é mais nobre que a mesma quantia de energia na forma de petróleo ou outro combustível, cuja rota de utilização passa por conversão para energia térmica, reconhecidamente uma forma com limites de conversão, como já comentado.

Tabela 2.5 - Reservas energéticas brasileiras (BEN, 2000 e ANP, 2000)

Produto/Fonte	Reserva	Disponibilidade	Unidade
Petróleo	Mar, provadas	1.169.199	10 ³ m ³
	Mar, provadas+estimadas	1.984.522	
	Terra, provadas	127.074	
	Terra, provadas+estimadas	185.813	
	Total, provadas	1.296.273	
	Total, provadas+estimadas	2.170.335	
Gás natural	Mar, provadas	145.756	10 ⁶ m ³
	Mar, provadas+estimadas	252.706	
	Terra, provadas	85.477	
	Terra, provadas+estimadas	151.164	
	Total, provadas	231.233	
	Total, provadas+estimadas	403.870	
Óleo de xisto	conforme BEN	382.786	tEP
Gás de xisto	conforme BEN	104.340	tEP
Carvão mineral	in situ, conforme BEN	2.566.674	tEP
Turfa	conforme BEN	40.092	tEP
Energia Nuclear	conforme BEN	2.566.674	tEP
Energia Hidráulica	conforme BEN	1.347.780	tEP/ano

A Tabela 2.6 apresenta as estimativas para algumas reservas energéticas mundiais, valores dos quais, naturalmente, apenas uma fração é que pode ser considerada utilizável, por restrições econômicas e ambientais (Culp, 1991). É interessante observar que, mesmo com o contínuo esforço na reposição de reservas de petróleo e gás natural, essenciais para o mundo moderno, elas vêm se reduzindo nos últimos anos, sinalizando que nas próximas décadas se atingirá um pico de produção, antecedendo a transcendência para novas alternativas de suprimento, provavelmente baseadas em fontes renováveis. Contribuem para isto, além do desenvolvimento tecnológico das alternativas renováveis, as crescentes restrições ambientais para o uso de combustíveis fósseis.

Tabela 2.6 - Reservas energéticas mundiais (Culp , 1991)

Reserva	disponibilidade	unidade
Carvão Mineral	$200,0 \times 10^{21}$	J
Petróleo	$11,7 \times 10^{21}$	J
Gás Natural	$9,5 \times 10^{21}$	J
Xisto Betuminoso	$1,2 \times 10^{21}$	J
Urânio-235	$13,7 \times 10^{21}$	J
Energia Geotérmica recuperável	$0,4 \times 10^{21}$	J
Energia Hidráulica	300×10^{10}	W

2.5. TERMINOLOGIA ENERGÉTICA

O estudo dos sistemas energéticos não apenas se baseia em conceitos bastante específicos, mas também impõe o uso de uma linguagem e de parâmetros particulares, que convém apresentar, ainda que de forma sucinta, para facilitar o tratamento posterior dos problemas associados à racionalização dos fluxos energéticos.

Todas as atividades humanas requerem energia, seja na forma de fluxos energéticos como calor e energia elétrica, seja na forma de produtos e serviços, que de forma indireta, também correspondem a fluxos energéticos, sem o que eles não poderiam ser obtidos. Assim, denomina-se *energia direta* aos fluxos físicos de energia, consumidos como tal, e *energia indireta* ou embutida às demandas energéticas realizadas para atender aos fluxos de materiais e às demais atividades, sendo, às vezes, também citado como *custo energético* de bens e serviços. Esta abordagem permite avaliar melhor a importância da energia na sociedade e evidenciar a crescente demanda de energia indireta, associada a produtos com elevado consumo em sua produção. A Tabela 2.7 permite comparar a energia embutida em alguns materiais de extenso uso, como, por exemplo, o alumínio e o aço ou o papel e o polietileno, que eventualmente competem por usos comuns. Os valores foram tomados de Boustead e Hancock (1979), mas certamente podem variar de acordo com as matérias primas e tecnologias adotadas.

Tabela 2.7 - Energia embutida ou custo energético de alguns produtos

Material	(kJ/kg)	Observações
Aço	20-50	produto acabado, a partir de minério
Água tratada	0,001-0,01	a partir de reservatórios naturais
Alumínio	227-342	metal a partir da bauxita
Calcário	0,07-0,1	a partir de jazidas naturais
Cimento	5-9	a partir das matérias primas
Madeira serrada	3-7	a partir da árvore em pé
Oxigênio	6-14	a partir do ar
Papel	25-50	a partir da árvore em pé
Polietileno	87-115	a partir de petróleo
Tijolos	2-5	a partir da argila
Vapor de processo	3-4	a partir da água natural, baixa pressão
Vidro	18-35	a partir das matérias primas

Outra forma de apresentar o conceito da energia incorporada aos bens e serviços é referindo-se ao *consumo de energia no ciclo de vida*, isto é, a energia consumida por um sistema desde a sua concepção, construção, operação e descarte final, pois em todas estas atividades se demanda energia. Como exemplo, na Figura 2.9, baseada em dados americanos, mostra-se como a energia embutida em um veículo e a energia necessária para abastecê-lo não são desprezíveis face ao seu consumo direto (DeCicco et alli, 2000).

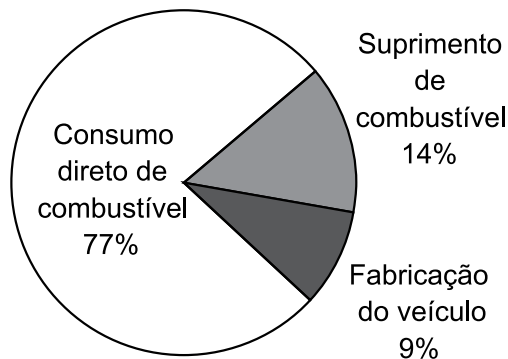


Figura 2.9 - Consumo de energia no ciclo de vida de um veículo típico (DeCicco et alli, 2000)

Nem sempre uma disponibilidade energética está na forma como se necessita, mas, felizmente, a energia pode ser convertida e armazenada. Na acepção mais geral, os sistemas energéticos constituem-se de uma seqüência de processos, através dos quais progressivamente obtém-se, converte-se e, eventualmente, armazena-se energia da Natureza, visando sua adequação em termos de tempo e disponibilidade para atender aos diversos usos na sociedade. Conforme sua posição nesta seqüência de processos podem ser definidos alguns tipos de energia, como se apresenta a seguir e se esquematiza na Figura 2.10.

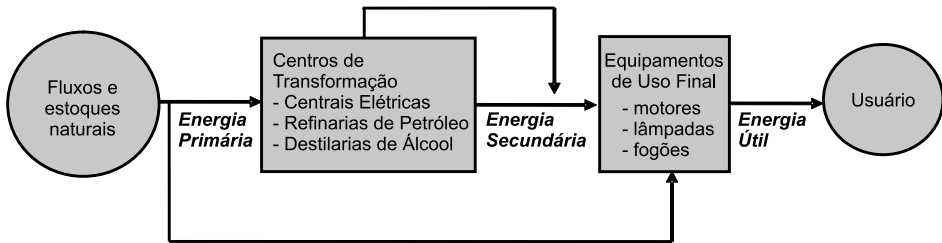


Figura 2.10 - Sistema energético

Energia Primária: energia fornecida pela Natureza, como a energia hidráulica, petróleo, lenha e cana-de-açúcar, podendo ser usada diretamente ou convertida em outra forma energética antes de uso.

Energia Secundária: corresponde à energia resultante de processos de conversão, no âmbito do setor energético, visando aumentar sua densidade energética, facilitar o transporte e armazenamento e adequação ao uso, como a eletricidade, combustíveis derivados de petróleo, álcool, carvão vegetal, etc. Eventualmente a energia secundária pode ser ainda convertida novamente em outras formas de energia secundária, como é o caso do óleo diesel utilizado em centrais elétricas.

Energia Útil: significa a forma energética última, efetivamente demandada pelo usuário, devendo ser algum fluxo energético simples, como calor de alta e baixa temperatura, iluminação, potência mecânica, etc. A relação entre a energia útil e a demanda correspondente de energia secundária depende da eficiência do equipamento de uso final.

No estudo dos sistemas energéticos e, particularmente, para o caso dos sistemas elétricos, são adotados alguns parâmetros que expressam o nível de utilização destes sistemas, como se apresenta a seguir, devendo ainda se observar que é prática comum em sistemas elétricos referir-se à *demanda* enquanto potência, avaliada em kW e ao consumo enquanto requerimento energético e avaliada em kWh:

Fator de carga: corresponde à relação entre a potência média consumida e

a potência máxima requerida, sendo uma característica importante para consumidores de energia. Tipicamente, consumidores residenciais e rurais apresentam fatores de carga inferiores a 10%, enquanto em indústrias de grande porte este fator pode estar acima de 90%. Uma conhecida expressão relaciona a energia consumida em base anual, E_{anual} , a demanda máxima de potência, P_{max} e o fator de carga, fc :

$$E_{\text{anual}} = 8760 \cdot fc \cdot P_{\text{max}} \quad (2.14)$$

Fator de capacidade: similar ao fator de carga e neste caso utilizado para sistemas de fornecimento energético, expressa a relação entre a potência média fornecida e a capacidade máxima de suprimento de energia. Em sistemas isolados, o fator de carga deve ser igual ao fator de capacidade.

Margem de reserva: utilizada para avaliar a folga na capacidade instalada de suprimento de energia frente à demanda máxima do consumidor, expressando percentualmente a relação de potências dada abaixo, onde P_{max} e C_{max} referem-se respectivamente à capacidade de geração e ao consumo máximo observado:

$$\text{Margem de reserva} = \frac{P_{\text{max}} - C_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} \quad (2.15)$$

Disponibilidade: indica a fração do tempo total, T_{total} , que se espera poder contar com um dado sistema de suprimento ou conversão energética, em função das paradas programadas e previstas para manutenção e ajustes, T_{parado} , conforme mostra a expressão a seguir:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{T_{\text{total}} - T_{\text{parado}}}{T_{\text{total}}} \quad (2.16)$$

Confiabilidade: indica qual a fração do tempo esperado para utilizar um dado sistema de suprimento ou conversão energética, T_{max} , que pode efetivamente ser utilizado, em função do tempo gasto em paradas imprevistas ou não programadas, T_{perdido} , conforme mostra a expressão a seguir:

$$\text{Confiabilidade} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{perdido}}}{T_{\text{max}}} \quad (2.17)$$

Fator de Diversidade: para um conjunto de consumidores expressa a não simultaneidade das cargas, conforme se mostra a seguir:

$$\text{Fator de Diversidade} = \frac{P_{\text{max, total}}}{\sum (P_{\text{max}})_{\text{consumidor}}} \quad (2.18)$$

Como a potência requerida por um consumidor qualquer sempre varia com o tempo, conforme se esquematiza na Figura 2.11a, é usual representar-se

esta variação na forma *de curva de duração* ou *monótona de carga*, apresentada na Figura 2.11b, onde, no eixo do tempo, pode ser colocado o período de tempo considerado em horas ou como percentual do tempo total. Neste tipo de curva perde-se a informação acerca do valor absoluto do tempo em que ocorre determinada demanda, contudo tal informação é, em geral, pouco reproduzível e tem escasso valor.

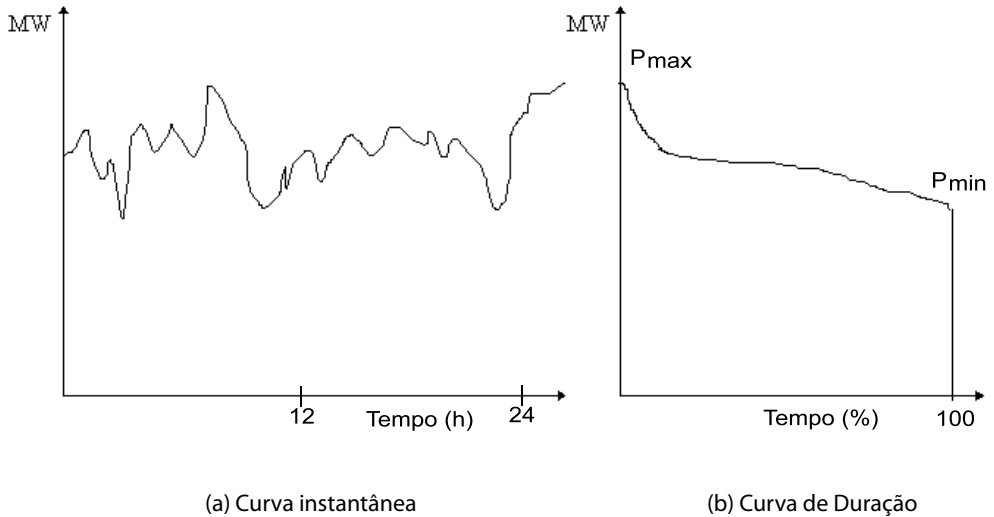


Figura 2.11 - Curvas de carga de consumo de energia

Em um sistema elétrico real, com muitos consumidores e geradores interligados, a operação mais econômica ocorre quando se colocam as centrais elétricas de melhor desempenho e portanto de menor consumo, gerando na base, isto é, durante a maior parte do tempo. Da mesma forma, por considerações de desempenho e flexibilidade ao acompanhar as variações de carga, existem as centrais de ponta. Sem que seja uma convenção muito rígida, admite que as plantas de geração que operem mais de 5.000 horas anuais são *centrais de base* (fatores de capacidade >57%), enquanto aquelas que gerem por menos de 2.000 horas são consideradas de *centrais de ponta* (fatores de capacidade <23%). As centrais que se situam nesse intervalo são as *centrais intermediárias*.

Um aspecto marcante para a adequada concepção e operação dos sistemas energéticos refere-se aos conceitos dos *custos de capacidade* e aos *custos de energia*. Entende-se por custos de capacidade os custos de investimento, relacionados com a necessária amortização do capital aplicado no sistema energético. Frequentemente estes custos são apresentados como custos unitários, dados como US\$/kW de capacidade instalada e dependem fortemente da tecnologia do sistema, com os custos mais elevados naturalmente para os sistemas de maior eficiência. Por sua vez, os custos de energia correspondem aos custos incorridos para a geração de uma unidade de energia e incluem a amortização do investimento e os

custos de operação e manutenção. É usual ainda, nos sistemas de geração de energia elétrica, separar-se os custos de operação e manutenção, em duas parcelas, uma correspondente ao combustível necessário para a geração e outra, relativa a todos os demais custos, como pessoal, manutenção, etc., que também podem ser dados, em termos anuais, como uma fração dos custos de investimento. Assim, o custo da energia para uma planta genérica qualquer observa a seguinte relação:

$$C_{\text{energia}} = \frac{I \cdot \text{FRC} \cdot (1 + F_{\text{O\&M}})}{8760 \cdot P \cdot \text{FCap}} + \frac{C_{\text{comb}}}{\eta_{\text{central}}} = \frac{(I/P) \cdot \text{FRC} \cdot (1 + F_{\text{O\&M}})}{8760 \cdot \text{FCap}} + \frac{C_{\text{comb}}}{\eta_{\text{central}}} \quad (2.19)$$

onde I corresponde ao investimento total necessário para o sistema, FRC é o fator de recuperação de capital, uma função da taxa de desconto adotada e do número de períodos considerados para a amortização, $F_{\text{O\&M}}$ a fração do investimento que corresponde aos custos de operação e manutenção, exclusive os combustíveis, P a capacidade instalada, Fcap o fator de capacidade, Ccomb o custo do combustível e η_{central} a eficiência da planta. Esta expressão, desenvolvida para sistemas de geração de energia e que pode ser imediatamente adaptada para qualquer sistema de conversão energética, permite obter uma conclusão geral importante: o nível de desempenho dos sistemas energéticos deve ser tanto maior quanto mais elevado for seu fator de carga (ou de capacidade), de modo a justificar os maiores valores de investimento. Outra aplicação deste raciocínio, agora para um consumidor de energia, é apresentada na Figura 2.12, onde a viabilidade da utilização de sistemas de iluminação mais eficientes e mais caros ocorre para maiores níveis de utilização, sendo equivocado portanto adotar sempre a opção de maior desempenho, sem que se considere seus custos e impactos operacionais.

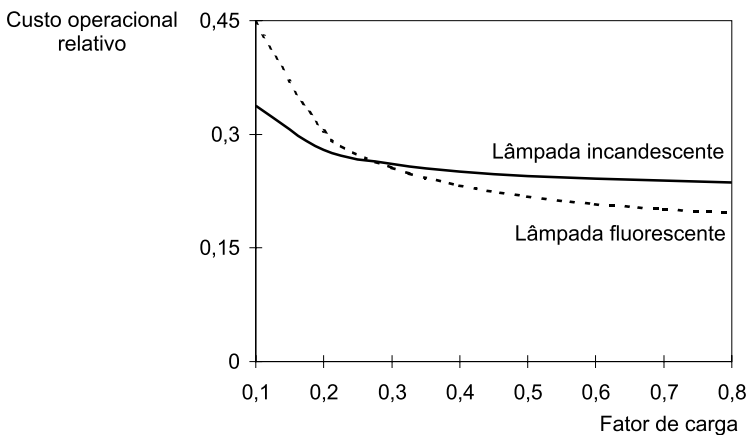


Figura 2.12 - Comparação dos custos operacionais de sistemas de iluminação

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP, **Anuário Estatístico da Indústria do Petróleo 1990-1999**, Agência Nacional do Petróleo, Rio de Janeiro, 2000
- BOUSTEAD, I., HANCOCK, G.F.; **Handbook of Industrial Energy Analysis**, Ellis Horwood, Chichester, 1979
- CULP, A.W., **Principles of Energy Conversion**, McGraw-Hill, New York, 1991
- DECICCO, J., KLIESCH, J., THOMAS, M., **ACEEE'S Green Book - The environmental Guide to Cars & Trucks**, American Council for na Energy-Efficiency Economy, Washington, 2000
- DNDE - Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético, **Balço Energético Nacional**, Ministério de Minas e Energia/Secretaria Nacional de Energia, Brasília, 2000
- ELETOBRÁS, Informações do Plano 2015 do Setor Elétrico, Rio de Janeiro, 1994
- GALLO, W.L.R.; MILANEZ, L.F.; **"Eficiência Exergética: conceitos e aplicações"**, III EN-CIT - Encontro Nacional de Ciências Térmicas, ABCM, Itapema, 1990
- KOTAS, T.J.; **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**, Butterworths, London, 1985
- LIZARRAGA, J.M.S.; **Termodinámica de Fluidos y el Metodo de Analisis Exergetico**, Editorial Universidad del Pais Vasco, Bilbao, 1987
- RANT, Z. ; **"Exergie, ein neus Wort für technische Arbeitsfähigkeit "**, Forsch Ingenieurwes, vol.22, 1956
- SMIL, V., **General Energetics: energy in biosphere and civilization**, Wiley, New York, 1990
- SOUZA, Z.; **Energia, Exergia e Anergia** , publicação interna, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1967
- TRONCONI, P., VALOTA, R., AGOSTINELLI, M., RAMPFI, F.; **Nerosubianco- riflessioni a colori sull'energia e società**, Associazioni Ambiente e Lavoro, Milão, 1987, citado por Sevá, A.O., Medeiros, J.X., Mammana, G.P., Diniz, R.H., "Renovação e Sustentação da produção Energética", in Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma sociedade sustentável, Cavalcanti, C., Fundação Joaquim Nabuco/Editora Cortez, São Paulo, 1987

Texto complementar

Vida e Energia : Uma Viagem de Ésquilo a Prigogine

Luiz Augusto Horta Nogueira

Como Senhora do Mundo, ela reina sobre nós com seu manto de entropia. Nas noites escuras e nas mais radiantes manhãs, está sempre presente, sem o que nada pode ser. Desde o interior das estrelas, no Big-Bang primordial, até nos recônditos mitocôndrias celulares, como instáveis ATP's, é a inexorável dualidade da Energia, conservação e dissipação, Eros e Tanatos, imperando sobre tudo. Mas afinal, o que é a Energia? De fato, não é trivial definir o óbvio, coisas que se sentem e que se vivem todo o tempo e em todos os lugares.

Talvez seja possível entender o sentido da Energia através das imagens de nosso inconsciente, de nossos mitos e poetas. E sem esquecer que uma das divindades tutelares da antiga Índia era Agni, a deusa do Fogo, que merece boa parte dos versos dos Vedas, vamos nos fixar em nossa cultura ocidental, onde nas raízes da Grécia surge um personagem maravilhoso, o titã Prometeu, o grande aliado da Humanidade no domínio da energia. Isso deve ter ocorrido por volta de 600 mil anos atrás, quando nossos antepassados, os então *Homo Habilis*, iniciaram a longa jornada para usar, conhecer e produzir o fogo, evento marcante na transcendência de animais para os *Homo Sapiens* que, pretensamente, hoje somos¹. Foram as chamas que permitiram ao Homem alimentar-se, aquecer-se e utilizar novos materiais, mas acima de tudo foram as primeiras fogueiras que o protegeram das feras, tornando-o um semi-deus. Foi este herói que, presenteando a Humanidade com tamanho dom, "*libertou os homens da obsessão da morte e fez nascer entre eles a cega esperança*", nas palavras de Ésquilo. Certamente que tamanho conhecimento é um privilégio divino, e Zeus não poderia tolerar passivamente o roubo de Prometeu, que por isso padeceu sem descanso, acorrentado e sob as tormentas do Cáucaso². E é pelo menos intrigante saber por Schaden que com os índios Guaranis de nossa terra sucedeu o mesmo: o seu fogo foi roubado dos deuses e ofertado aos homens, acarretando tremendo sofrimento, com abutres inclusive atormentando à Papá Miri, o herói benfeitor³.

Seria então Energia apenas esta benesse poderosa, de preço tão alto? Ou Energia seria algo mais, o elo vital em tudo, não apenas uma fonte de poder temporal para o Homem? Vale a pena conhecer a visão de Santa Hildegarda de Bingen, a "Sibila do Reno" e fascinante pensadora medieval, que afirmava: "*Sou esta força suprema e*

*ardente que libera todas as faíscas da Vida. A morte não me afeta, mas sou eu quem a distribui, e solto minha ciência como quem abre suas asas. Sou esta essência viva e ardente da substância divina que flui na beleza dos campos. Brilho nas águas, ardo no Sol, na Lua e nas estrelas. Minha é a força do invisível vento. Eu mantenho o alento em todos os seres vivos, respiro no verdor e nas flores, e quando as águas fluem como vivas, aí estou eu. Eu levantei as colunas que sustentam a Terra inteira...eu sou a força oculta no vento, eu sou a origem de tudo, e assim como o homem pode mover-se graças à sua respiração, o fogo arde graças ao meu ardor. Eu sou a sabedoria. Meu é o tronar da palavra que fez nascer todas as coisas. Eu impregno todas as coisas para que não morram. Eu sou a Vida”*⁴. Provavelmente esta religiosa não conheceu o termo, mas um cientista poderia dizer que ela definiu, inspiradamente, Energia.

Mas , seria ainda possível uma definição mais abrangente, que fosse além deste caracter natural e dissesse da plenitude interior a que os fluxos energéticos induzem? Talvez então seja melhor recorrer ao misticismo de Blake, que na efervescência fuliginosa da Revolução Industrial dizia; *“O Homem não tem um Corpo diferenciado de sua Alma; pois o denominado Corpo é uma porção da Alma, discernida pelos cinco Sentidos, as principais vias de entrada da Alma nesta era. A Energia é a única vida e procede do Corpo; e a Razão é a fronteira ou circunferência exterior da Energia. A Energia é o eterno Deleite”*⁵. E assim temos a fonte de poder e do prazer, o tónus vital e o Jardim das Delícias , como que repousando nos fluxos energéticos. Talvez não exista unidade maior. Energia ubíqua, sagrada e onipotente.

Mas afinal, é preciso lembrar da vã utopia de reduzir tudo a Energia, risco que se corre ao tentar expressar um mundo inquieto, sob permanente mutação. Nem tudo é Energia, e também falta algo importante nas poéticas reflexões anteriores. Agora quem sabe seja o momento de arriscar outro caminho, que busca a Nova Aliança proposta por Prigogine , e considerar a Energia com o auxílio do Tempo, escapando do mundo-relógio newtoniano, sempre equilibrado, e inserindo a inevitável irreversibilidade termodinâmica nos sonhos do porvir⁶. Urge se negar à tentação como aquela a que sucumbiu Engels em sua Dialética da Natureza, quando elucubrou uma improvável reflexão da Energia dissipada no final do Éter para contrapor-se à Segunda Lei da Termodinâmica⁷, cuja existência, a seu juízo, poderia reduzir as perspectivas para uma Revolução do proletariado..! Estas questões já não existem, a Termodinâmica está consolidada. No pensamento de Einstein, os postulados termodinâmicos são para sempre⁸ e conforme Eddington; *“a Lei do Aumento da Entropia possui a posição suprema entre as leis da Natureza”*⁹. Pois é hora de explicitar a flecha entrópica do Tempo em nossos cânones energéticos, e, como diz o grande termodinamicista de Bruxelas, *“assumir os riscos da Aventura Humana...”*¹⁰. Energia é tudo, mas pode ser nada.

REFERÊNCIAS:

- ¹ MIDDLETON, C., **A Aurora da Humanidade**, Time-Life Editores/Abril Livros, Rio de Janeiro, pg 54-55
- ² ÉSQUILO, **Prometeu Acorrentado**, Coleção Universidade de Bolso (Tragédias Gregas), Editora Tecnoprint, Rio de Janeiro, s/d, pg 119
- ³ SCHADEN, E., **“A origem e posse do fogo na Mitologia Guarani”**, in Leituras de Etnologia Brasileira, ed. E. Schaden, Cia. Editora Nacional, 1976, pg 311
- ⁴ MACLAGAN, D., **Mitos de la Creación**, Ed. Debate, Madrid, 1989, pg 31
- ⁵ BLAKE, W., **The Marriage of Heaven and Hell**, The Illustrated Poets Series, Aurun Press, London, 1986, pg 33
- ⁶ PRIGOGINE, I. E STENGERS, I., **A Nova Aliança**, Ed. Universidade de Brasília, 1988
- ⁷ ALEKSEEV, G.N., **Energy and Entropy**, Mir Publishers., Moscow, 1986, pg 174
- ⁸ KRICHEVSKI, I.R. E PETRIANOV, I.V., **Termodinámica para muchos**, Editorial Mir, Moscú, 1980, pg 173
- ⁹ COVENEY, P. E HIGHFIELD, R., **A Flecha do Tempo**, Editora Siciliano, São Paulo, 1993, pg 136
- ¹⁰ PRIGOGINE, I., **El Nacimiento del Tiempo**, Tusquets Editores, Barcelona, 1988, pg 13

FATORES DE CONVERSÃO

Na análise de sistemas energéticos é usual o emprego de uma variedade de unidades para energia e potência, bem como é comum o emprego de sufixos multiplicadores, como se apresenta nas tabelas a seguir.

ENERGIA

Unidade	Símbolo	Equivalência em Joule
caloria	cal	4,187 J
quilowatt-hora	kWh	$3,6 \times 10^6$ J
tonelada equivalente de petróleo	tEP	$41,87 \times 10^9$ J
Terawatt-ano	TW-ano	$31,5 \times 10^{18}$ J
British Thermal Unit	Btu	$1,055 \times 10^3$ J
barril de petróleo equivalente (159 litros)	bbl	$6,212 \times 10^6$ J
metro cúbico de gás natural	m ³	$41,23 \times 10^3$ J

POTÊNCIA

Unidade	Símbolo	Equivalência em Watt
caloria por minuto	cal/min	$68,8 \times 10^{-3}$ W
quilocaloria por hora	kcal/h	1,163 W
cavalo-vapor (métrico)	CV	735,49 W
horse power (inglês)	HP	746 W
British Thermal Unit por hora	Btu/h	0,293 W

PREFIXOS

Prefixo	Símbolo	Valor
exa	E	$\times 10^{18}$
peta	P	$\times 10^{15}$
tera	T	$\times 10^{12}$
giga	G	$\times 10^9$
mega	M	$\times 10^6$
quilo	k	$\times 10^3$

Capítulo 3

ENERGIA E MEIO AMBIENTE

3.1. INTRODUÇÃO

Com o homem e sua atividade industrial apareceu a poluição ambiental. A rápida industrialização e urbanização dos países em desenvolvimento têm levado a um aumento severo na poluição: água que está inapta para o consumo, altos níveis de concentração de poluentes no ar e aumento da quantidade de resíduos sólidos urbanos e resíduos perigosos, além disso dispostos inadequadamente. O consumo de energia é uma das principais causas da degradação do meio ambiente, como será mostrado adiante. Definamos primeiramente o conceito de poluição:

“É a degradação do ambiente, ou seja, mudanças nas características físico-químicas ou biológicas do ar, água ou solo que afetam negativamente a saúde, a sobrevivência ou as atividades humanas e de outros organismos vivos”.

É indiscutível que o desenvolvimento econômico, associado à aplicação da ciência e da tecnologia, têm conduzido à melhoria no nível de vida, pelo menos para uma parte da população do planeta, o que caracteriza-se por:

- Acréscimo da quantidade e qualidade da produção de alimentos;
- Desenvolvimento dos meios de transporte e comunicação;
- Disponibilidade de moradias;
- Mecanização e automação dos processos produtivos (aumento da produtividade e redução do tempo de trabalho);
- Desenvolvimento de sistemas para o fornecimento de água potável e para o tratamento de efluentes líquidos;
- Eliminação de muitas doenças contagiosas e desenvolvimento de tratamentos efetivos para outras;
- Aumento na qualidade de vida das pessoas, com a disponibilidade de variados equipamentos elétricos e eletrônicos domésticos.

Ao mesmo tempo, o desenvolvimento econômico, acompanhado de um in-

tensivo uso de recursos e geração de resíduos, têm provocado impactos nocivos no meio ambiente:

- Efeito estufa e mudanças climáticas;
- Perda de terras cultiváveis (desertificação);
- Desmatamento;
- Poluição de rios, lagos e mares;
- Perda da biodiversidade (extinção de muitas espécies de plantas e animais).
- Poluição do solo e das águas subterrâneas;
- O smog foto-químico e a poluição do ar nas cidades.

Assim, aparece como um problema vital conseguir conciliar o desenvolvimento e as vantagens de um modo de vida aceitável, com a conservação do meio ambiente. Este é objetivo que se persegue com a formulação de diferentes estratégias de desenvolvimento sustentável. Além disso, os combustíveis fósseis como fonte de energia trazem como uma inevitável consequência, alguma forma de dano ambiental, seja na sua exploração ou no seu consumo, e uma das soluções para atenuar e manter em limites aceitáveis este problema é a utilização racional das fontes primárias de energia e em geral a eficiência energética em todas as etapas do uso da energia.

A demanda mundial pela energia vem crescendo continuamente. Em parte, isso acontece porque as populações e suas necessidades estão crescendo, e, mais indústrias, serviços e empregos são gerados. Mas, outra parcela é constituída pelo desperdício de energia. *“O desenvolvimento do terceiro mundo e a proteção do meio ambiente são os dois maiores problemas globais que devem ser enfrentados pela humanidade nas próximas décadas. Estes dois problemas estão rigorosamente interligados. A energia, motor do crescimento econômico e a principal causa da degradação do meio ambiente, é a conexão”* (Colombo, 1992). A produção de energia tem grande influência sobre o meio ambiente por dois fatores:

- Desmatamento (alto consumo de lenha nos países em desenvolvimento);
- Emissão de poluentes, produtos da combustão de combustíveis fósseis (CO_2 , NO_x , SO_x , C_xH_y , particulados, etc.).

Vários estudos têm demonstrado que gerenciar a poluição urbana e industrial concentrando-se no tratamento “end-of-pipe”, ou seja, utilizando-se de métodos corretivos, em muitos dos casos não é só custoso como também insustentável. Expe-

riências dos Estados Unidos e outros países desenvolvidos têm demonstrado que, a longo prazo, a prevenção da poluição através da minimização de resíduos e de uma produção com tecnologias mais limpas e eficientes, é mais sensata tanto na relação custo-benefício, como também para o próprio meio ambiente, se comparado com as técnicas tradicionais. Além disso, técnicas de prevenção da poluição podem aplicar-se a qualquer processo de manufatura, variando desde mudanças operacionais relativamente fáceis até mudanças mais profundas, tais como, a substituição de matérias primas tóxicas, implementação de tecnologias mais limpas e eficientes ou instalação de equipamentos de recuperação de resíduos. Com a prevenção da poluição pode-se conseguir aumentar a eficiência da unidade industrial, reduzir a quantidade de energia e matéria prima utilizadas na produção de bens e serviços e reduzir custos de disposição final devido a diminuição drástica da quantidade de resíduos gerada. Além destes aspectos, a prevenção deve ser considerada na estratégia de ampliação de mercado, contando com a melhoria da imagem pública da empresa e de seus produtos perante os consumidores, o que pode propiciar uma atração maior de investidores e acionistas contando com financiamentos favorecidos.

3.2. CONSUMO E RESERVAS DE ENERGIA NO MUNDO

É quase unânime a definição de energia como sendo “a capacidade de um sistema de realizar trabalho ou de provocar mudanças”. Portanto, um sistema que possui grande quantidade de energia pode realizar uma grande quantidade de trabalho. Se considerarmos alguns exemplos de trabalho como o transporte de pessoas, o bombeamento de água, a construção de moradias e rodovias, a rotação das turbinas e geração de eletricidade nas termelétricas, etc., fica fácil entender a relação que existe entre consumo de energia e desenvolvimento. Finalmente podemos dizer que a energia está em todas partes e faz com que as coisas aconteçam. Ao falar de energia é preciso considerar que ela existe em diferentes formas: energia mecânica, térmica, elétrica, química, nuclear, etc., e que possui duas características importantes:

- Não se perde (Primeira Lei da Termodinâmica);
- A sua utilização é realizada mediante a conversão de uma forma de energia em outra, processo este que, no caso da conversão de calor em trabalho, não pode ser realizado com 100% de eficiência (Segunda Lei da Termodinâmica).

Considerando-se que a principal fonte de energia da sociedade moderna é o carbono (energia química), acumulado nos diferentes combustíveis fósseis (petróleo, carvão, gás natural, etc.), introduz-se como “tonelada equivalente de petróleo - tep” a unidade comum para expressar a quantidade de energia consumida e reservas disponíveis de combustíveis. Assume-se que, 1 tep libera durante a combustão 41.868,0

MJ, propriedade dos combustíveis que recebe o nome de poder calorífico. Uma tonelada de madeira ao queimar libera muito menos energia, por volta de 8000,0 MJ, equivalente termicamente a 0,191 tep. Analisando o assunto de outra maneira, diríamos que, 5,23 toneladas de madeira equivalente energeticamente a 1 tep.

A Figura 3.1 ilustra o comportamento do consumo de energia primária no mundo durante o século XX. Observa-se um rápido acréscimo neste consumo a partir do ano 1950. De acordo com dados da BP (2006) o consumo mundial de energia primária em 2006 chegará a $10,5 \times 10^6$ tep.

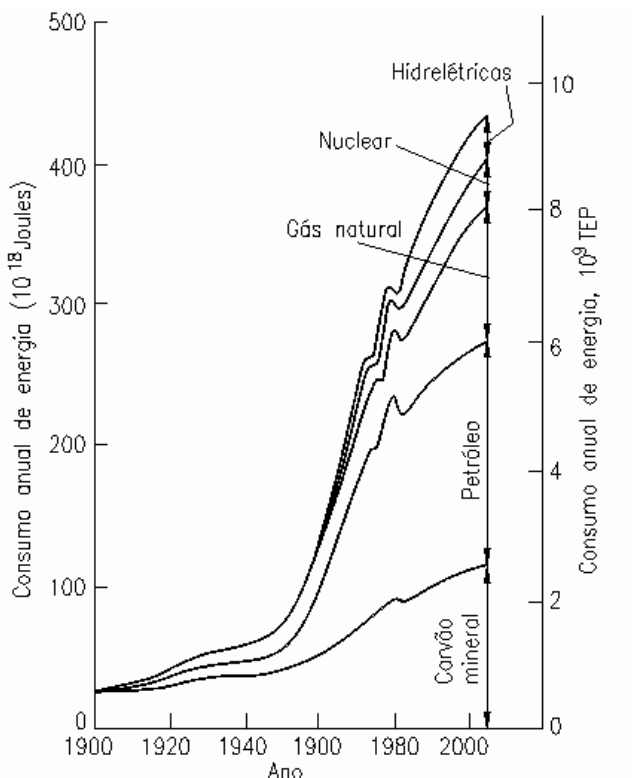


Figura 3.1 - Consumo mundial de energia primária durante o século XX (Atualizado a partir de Henry e Heinke, 1989, utilizando dados da EIA (2005) até 2003).

Nota: 1 ExaJoule = 1018 Joules.

A Figura 3.2 mostra, a partir de dados apresentados pela EIA (2005), a evolução do consumo de energia nos diferentes continentes e no mundo, representando um crescimento percentual no período entre 1980 e 2003 de 23,0% na América do Norte, 47,2% na América Central e do Sul, 20,5% na Europa Ocidental, 70,0% no Oriente Médio, 49,0% na África, 59,2% na Ásia & Oceania, uma retração de 11,4% na Europa Oriental & Antiga União Soviética e de aumento de cerca de 32,8% no mundo.

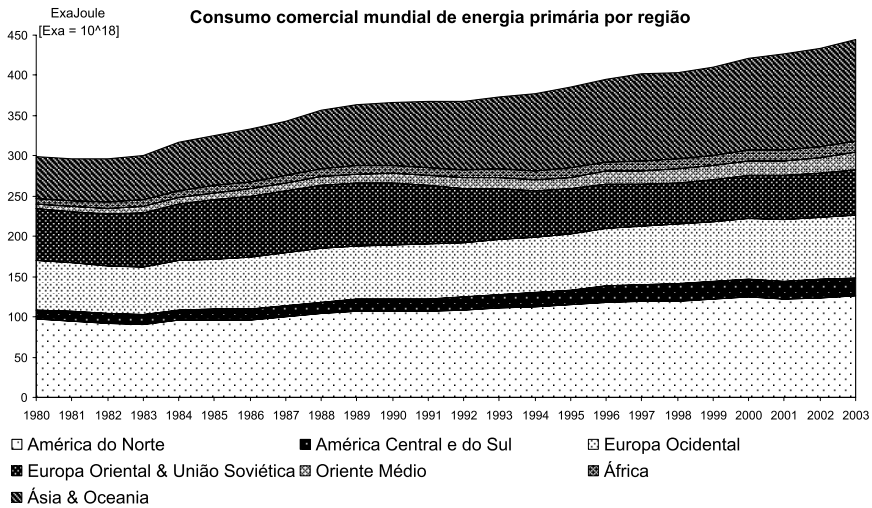


Figura 3.2 - Consumo comercial mundial de energia primária, por região, considerando o período de 1980-2003 (EIA, 2005)

A Figura 3.3 (EIA, 2005), permite avaliar a evolução do consumo comercial mundial de energia primária entre 1980-2003 para as diferentes fontes, observando-se um crescimento percentual neste período de 19,2% para o petróleo, 45,6% para o gás natural, 30,5% para o carvão mineral, 34,2% para a hidroeleticidade, 71,4% para a de origem nuclear, 48,4% para as outras restantes (geotérmica, solar, biomassa), levando a um aumento de cerca de 32,8% do consumo mundial total.

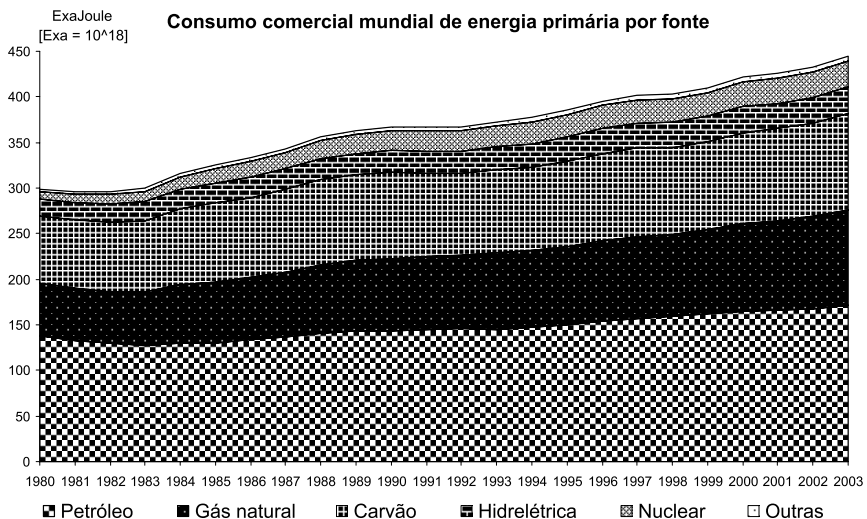


Figura 3.3 - Consumo comercial mundial de energia primária, por fonte, considerando no período de 1980-2003 (EIA, 2005)

Na Figura 3.4 é mostrado o consumo de energia per capita no mundo, diferentes continentes e regiões, em tep/ano. Como pode ser verificado, os países desenvolvidos são os maiores consumidores de energia e como consequência disto apresentam melhores padrões de vida (maior consumo de produtos e serviços per capita). Porém, isto também é, em alguns casos, um indicativo de desperdícios consideráveis de energia que, conseqüentemente, leva a uma maior geração de poluentes e resíduos.

Considerando o Produto Nacional Bruto – PNB como indicador de desenvolvimento é interessante construir graficamente a relação entre o consumo de energia e este indicador. A Figura 3.5 mostra esta relação para o PNB e o consumo de energia per capita, que permite visualizar a relação entre consumo de energia e desenvolvimento econômico. “A energia deve ser vista como um dos principais requerimentos para o crescimento econômico e as melhorias sociais, e não como uma consequência deste crescimento” (UN, 1996). Porém, uma qualidade de vida aceitável e sustentável pode ser atingida com um consumo de energia menor que o atual per capita dos países desenvolvidos o que fica evidenciada pela ampla faixa de variação do consumo per capita de energia nas sociedades mais desenvolvidas. Este consumo *per capita* no mundo deve convergir a um nível suportável pela terra. MARKHAM (1994) estima que o desenvolvimento tecnológico deve levar à redução do consumo de energia, nos países desenvolvidos, entre 30 - 70 % nas próximas décadas. Impõe-se aqui uma mudança radical no estilo de vida. A equidade no consumo de energia é uma condição vital para o desenvolvimento sustentável.

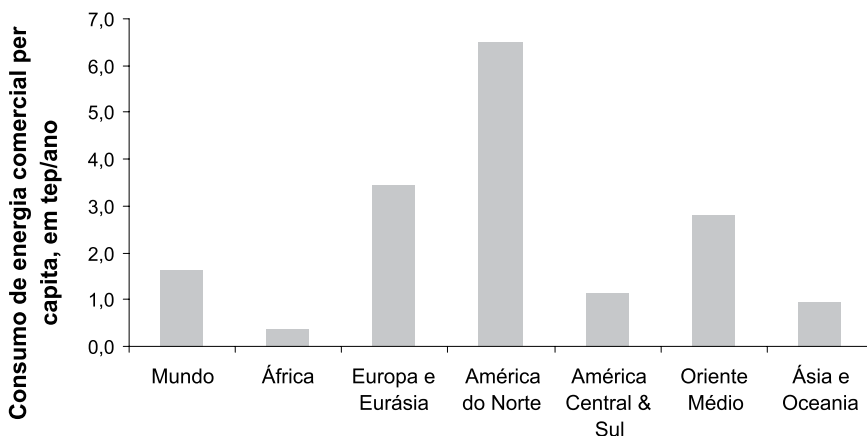


Figura 3.4 - Consumo de energia per capita no mundo e nos diferentes continentes e regiões (tep/ano) (Elaborado com base em dados correspondentes ao ano de 2005 do BP Statistical Review of World Energy, 2006)

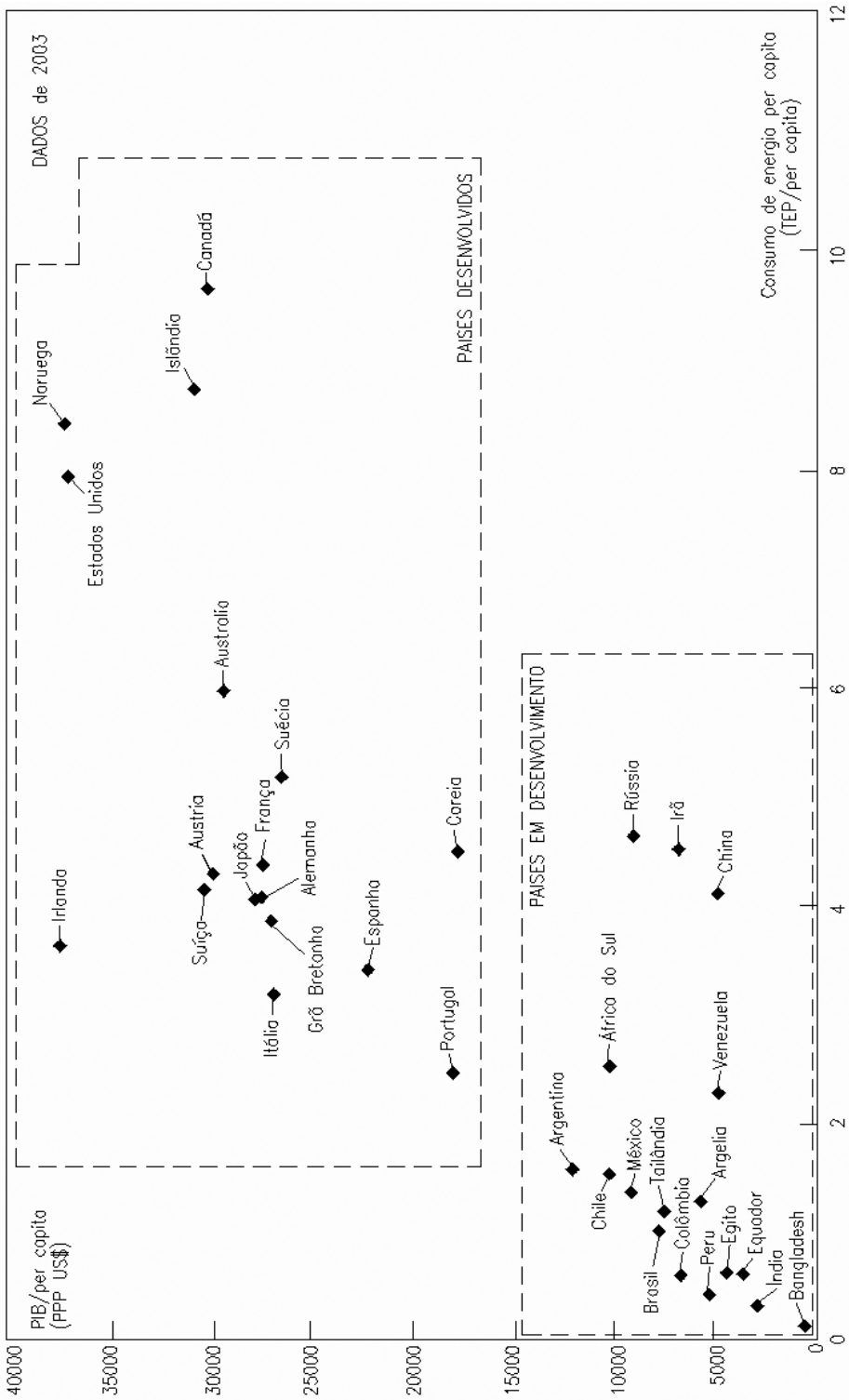


Figura 3.5 - Relação entre o PNB per capita (US\$/per capita/ano) e o consumo de energia primária per capita (tep/per capita), segundo dados do UNDP (2005) e BP-Amoco (2006) correspondentes a 2003

Existe uma inter-relação muito estreita entre o setor energético e a natureza. Assim, a litosfera constitui o meio de extração dos combustíveis fósseis, recebendo uma carga de poluentes como resultado da lixiviação e destinação final de resíduos. As etapas de elaboração, refino, conversão e consumo dos combustíveis descarregam poluentes na litosfera, hidrosfera e atmosfera, além de utilizarem de recursos naturais como a água e o ar (Figura 3.6).

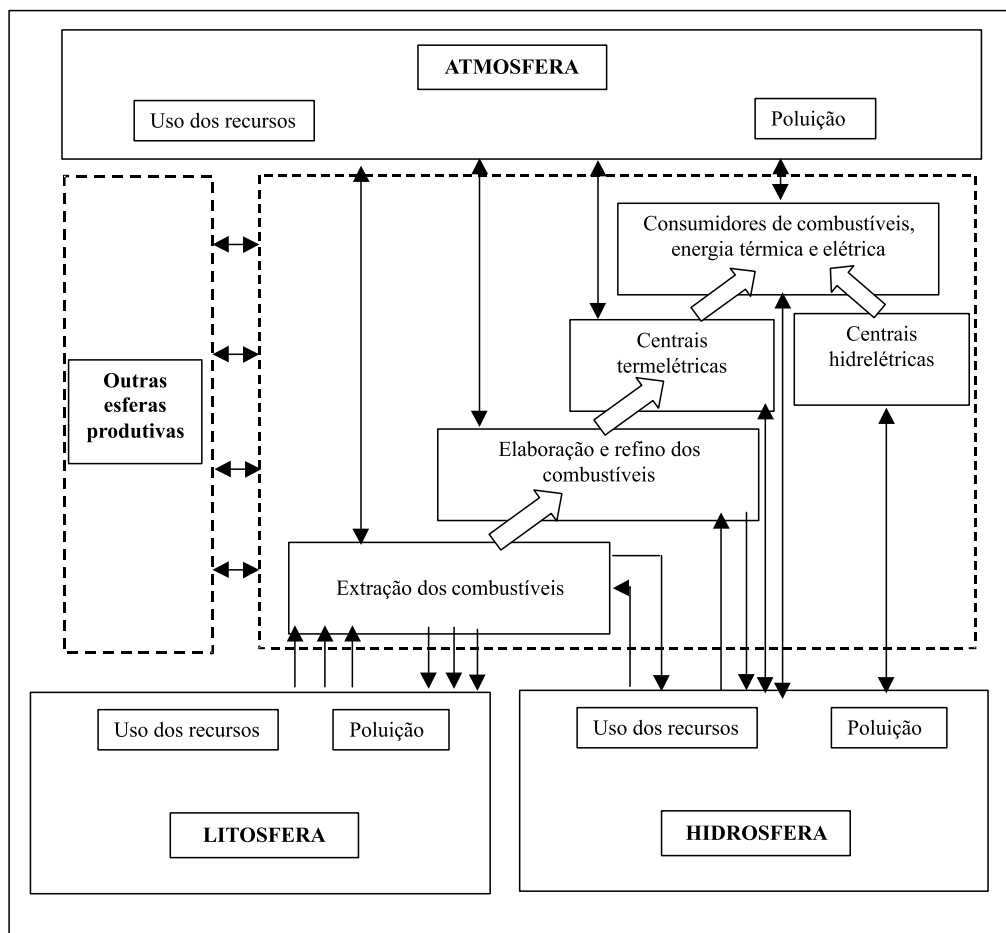


Figura 3.6 - Interrelação entre as empresas do setor energético e a natureza (Lora, 2002)

O crescimento no consumo mundial de energia cresceu em média entre 0 e 5% de um ano com relação ao anterior, e teve um crescimento praticamente nulo no início da década de 1990. Em 1980, consumiu-se cerca de 299,0 ExaJoules (Exa = 1×10^{18}), em 1990, 366,5 ExaJoules, em 1995, 385,7 ExaJoules, em 2000, 421,8 ExaJoules e em 2003, 444,7 ExaJoules, o que representa um aumento de 33% no período 1980-2003 (EIA, 2005). A Figura 3.7 mostra o crescimento do consumo de energia

no mundo ano a ano para este mesmo período. A energia nuclear apresentou crescimentos, em média, entre 5 e 10% ao ano na década de 1980, chegando a picos de 17,5% e 15% nos anos de 1984 com relação a 1983 e 1985 com relação a 1984, respectivamente. Porém houve uma redução para um máximo de 4% ao ano na década de 1990, e em 2002 com relação a 2001, este crescimento foi de 1,1%. No ano de 2003 houve uma redução no consumo mundial de 0,7% com relação a 2002.

As fontes “não convencionais de energia”, incluindo principalmente a biomassa, eólica, solar e geotérmica, apresentaram no período 1980-2003 uma variação média de crescimento de 4% ao ano, apresentando crescimentos de mais de 7% no ano de 1983 e 1989, reduzindo-se a uma queda de 8,5% no ano de 1990 e oscilando novamente em torno de 4% de crescimento anual até 2003. O consumo da eletricidade gerada nas hidrelétricas e de carvão mineral apresentaram um crescimento mais uniformes nas últimas duas décadas, e em média de 2% ao ano.

O gás natural, que no biênio 1983-1984 ultrapassou em 9% seu crescimento, nos demais anos manteve uma oscilação entre 0 e 5% ao ano. Porém, a crescente conscientização da necessidade de redução na emissão de gases precursores do efeito estufa, principalmente o CO_2 , aliada a um aumento nas reservas provadas mundiais, cujo valor que era de cerca de 92,7 trilhões de m^3 no fim do ano de 1983, saltou para 141,1 trilhões de m^3 no fim do ano de 1993, alcançando 175,2 trilhões de m^3 no fim do ano de 2003, além da expansão deste combustível pelos países em desenvolvimento, fazem com exista atualmente uma tendência de crescimento no consumo deste combustível.

Finalmente, o consumo de derivados de petróleo, após a crise de energia, nas décadas de 1970-1980, quando os preços elevaram-se muito, o crescimento foi nulo ou até mesmo houve uma redução em seu consumo de um ano para o outro. Após este período, os derivados de petróleo vem acompanhando os demais insumos energéticos com crescimento na faixa de 0 e 3% ao ano. Deve-se salientar que o histórico do consumo mundial de petróleo apresenta picos e baixas, sendo esta retração no consumo influenciada por picos momentâneos no preço do petróleo (Figura 3.8), e as medidas de eficiência energética tomadas em correspondência nos países desenvolvidos.

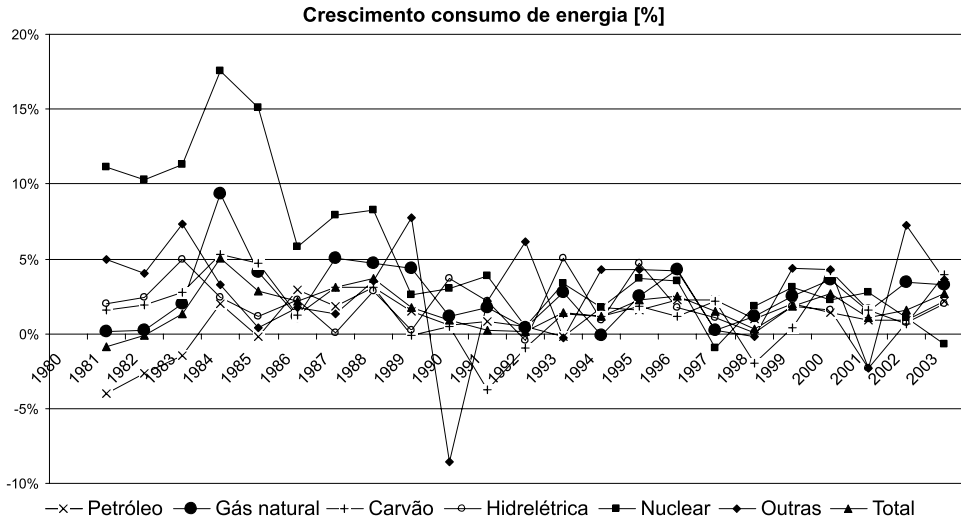


Figura 3.7 - Crescimento do consumo de diferentes fontes de energia no mundo de um ano com relação ao anterior para o período de 1980-2003 (EIA, 2005)

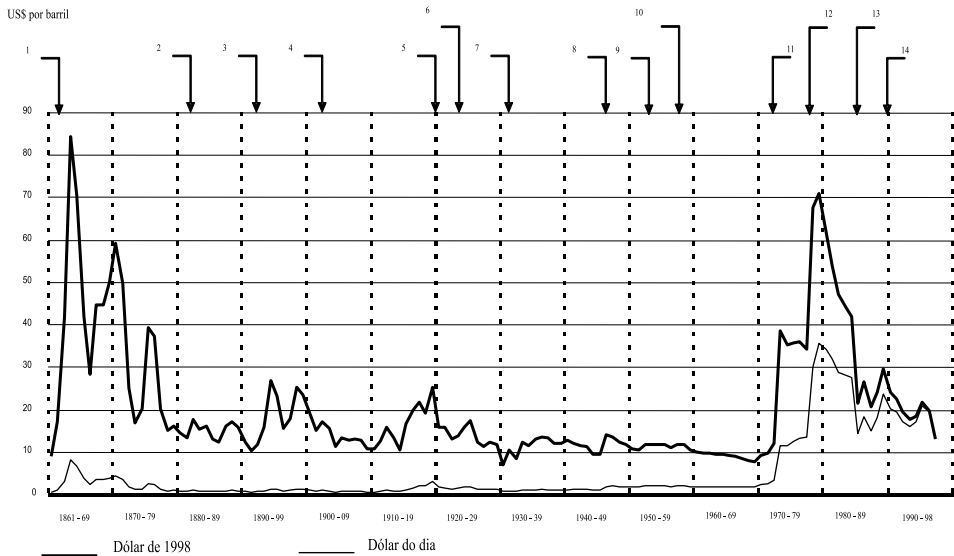


Figura 3.8 - Comportamento do preço do petróleo a partir de 1861 até 1998. (adaptado de BP Amoco, 1999)

1 - 'Boom' do petróleo na Pensilvânia; 2 - Início das exportações de petróleo na Rússia; 3 - Início de produção na Sumatra; 4 - Descoberta de jazidas em Spindletop, Texas; 5 - Medo de escassez nos EUA; 6 - Crescimento da produção na Venezuela; 7 - Descoberta de campos no leste do Texas; 8 - Reconstrução pós-guerra; 9 - Perda do fornecimento Iraniano; 10 - Crise no canal de Suez; 11 - Guerra de Yom-Kippur - 1a crise (1973); 12 - Revolução Iraniana - 2a crise (1979); 13 - Introdução do netback pricing; 14 - Invasão do Kuwait pelo Iraque.

Na Tabela 3.1 são apresentados dados sobre as reservas mundiais comprovadas de petróleo, gás natural e carvão, assim como a relação reserva/consumo que indica o número de anos em que se esgotariam as mesmas. Dessa forma, as reservas atuais de petróleo e gás, mantendo-se a relação entre a produção e o consumo existentes, se esgotariam em 40,6 e 67,8 anos, respectivamente (BP Statistical, 2004). O carvão mineral será o combustível mais utilizado nos próximos séculos, pois, com o ritmo de consumo atual, as suas reservas devem durar 236 anos (BP Statistical, 2004). Porém, cabe ressaltar que o carvão mineral, entre os combustíveis fósseis, é o mais poluente. Ainda baseado neste levantamento, apresenta-se na Tabela 3.2 a distribuição mundial das reservas de petróleo, gás natural e carvão mineral, bem como a produção anual destes combustíveis.

Tabela 3.1 - Reservas comprovadas de petróleo, gás natural e carvão mineral no mundo (BP Statistical, 2004)

Tipo de combustível	Reservas	Reservas/Produção, anos
Petróleo (10 ⁹ Barris)	1.147,7	40,6
Gás natural (10 ¹² m ³)	175,8	67,8
Carvão mineral (10 ⁹ tons)	984,5	192,3

Tabela 3.2 - Distribuição das reservas e da produção de petróleo e gás natural no mundo (BP Statistical, 2004)

	Petróleo			Gás Natural			Carvão Mineral		
	Reservas		Produção	Reservas		Produção	Reservas		Produção
	10 ⁹ barris	% mundo	10 ³ barris/dia	10 ¹² m ³	% mundo	10 ⁹ m ³ /ano	10 ⁹ tons	% mundo	10 ⁶ tons
América do Norte	63,6	5,5	14.229,0	7,3	4,2	766,3	257,8	26,2	1.042,7
América do Sul e Central	102,2	8,9	6.741,0	7,2	4,1	118,6	21,7	2,2	61,5
Europa e Eurásia	105,9	9,2	16.927,0	62,3	35,4	1.023,9	355,7	36,1	1.183,7
Oriente Médio	726,6	63,3	22.607,0	71,7	40,8	257,7	57,1	5,8	243,5
África	101,8	8,9	8.401,0	13,8	7,8	141,4	-	-	-
Ásia & Oceania	47,7	4,2	7.872,0	13,7	7,7	310,5	292,7	29,7	2.586,4
Mundo	1.147,7	100,0	76.777,0	175,8	100,0	2.618,5	984,5	100,0	5.118,8

Nota-se que as reservas de combustíveis fósseis, além de limitadas, estão distribuídas de uma maneira extremamente desigual entre os diferentes continentes e regiões do mundo, conforme pode ser observado na Figura 3.9. Isto constitui a causa de conflitos armados, como foram os casos mais recentes da ocupação de Afeganistão e do Iraque pelos Estados Unidos. É inte-

ressante ressaltar que a partir do ano de 2003, o valor do barril de petróleo tem-se elevado continuamente, passando de US\$ 30 para US\$ 40 no ano de 2004, e chegando-se a US\$ 70 em novembro de 2005, fechando o ano por volta de US\$ 60. Na segunda metade de 2006 observa-se de novo a tendência de acréscimo no preço do petróleo com valores recordes de aproximadamente US\$ 75 por barril.

No seu livro “O fim do petróleo: o grande desafio do século XXI” Howard (2006) apresenta uma visão apocalíptica, com enormes doses de pessimismo... e porque não de realismo?, da vida num mundo sem energia fóssil barata... O século passado já consumimos a metade do petróleo existente na terra. O que restou daria para 37 anos, caso se consiga extrair todo, o que dista de ser real... De acordo com Howard o futuro da civilização industrial vai ser turbulento, e devem acontecer mudanças econômicas, políticas e sociais a uma escala épica, que ele chama de “Longa Emergência”... Este período vai se caracterizar por uma redução de todas as atividades da vida cotidiana, o adeus aos carros, aviões, a alta incidência de conflitos e epidemias. O hidrogênio, a energia nuclear e as fontes renováveis, de acordo com Howard, não poderão sustentar a população e o modo de vida atual. A visão generalizada do assunto é um pouco mais otimista. Porém, esta publicação deve servir de alerta aos políticos e sociedades a fim de tomar as medidas requeridas, antes de que seja tarde demais.

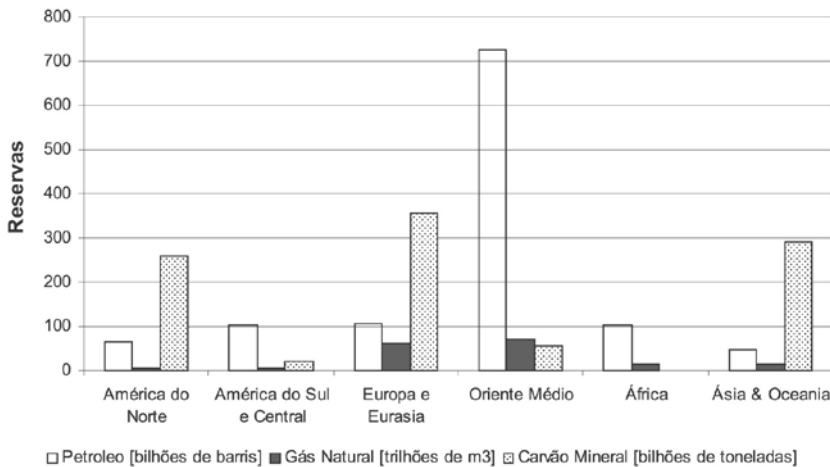


Figura 3.9 - Distribuição das reservas de combustíveis fósseis pelos diferentes continentes e regiões do mundo (BP Statistical, 2004)

A distribuição da geração de energia por tipo de central utilizada é apresentada na Figura 3.10. Nesta figura, fica claro a predominância da geração por centrais termelétricas. A maior parte dos combustíveis utilizados nestas centrais são fósseis (óleos, gás natural ou carvão mineral) sendo a utilização de combustíveis renováveis

(bagaço de cana, licor negro, cascas de madeira) menos sensitivos. A geração hidroelétrica vem em segundo lugar, seguido das nucleares e com pouca representação aparecem as centrais geotérmicas, solar e eólicas com 1 % da faixa de geração.

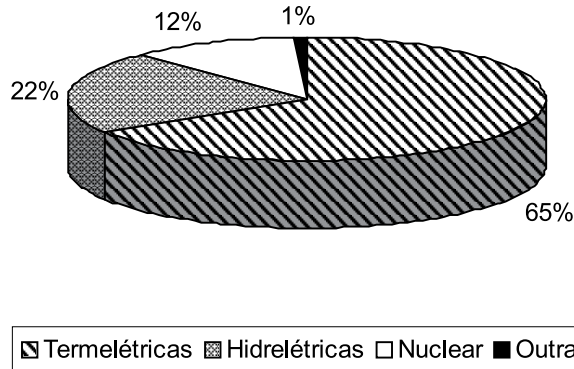


Figura 3.10 - Distribuição da geração de energia no mundo, segundo a tecnologia empregada (OLADE, 1999)

3.3. CONSUMO E RESERVAS DE ENERGIA NO BRASIL

A Tabela 3.3 mostra diferentes dados do setor energético brasileiro, bem como sua evolução. No Brasil o consumo de energia *per capita* em 2004 apresenta um valor na ordem de 1,2 tep/hab (aproximadamente igual à média mundial) e que vem apresentando um leve aumento. Um ponto interessante é a redução da dependência externa em energia sendo em 1997 de 29% e em 2004 de 13%. Quanto a potência elétrica instalada no Brasil, nota-se um crescimento mais consistente da termoeletricidade, devido sobre tudo à maior disponibilidade de gás natural, aumentando-se a capacidade destas centrais de 13% em 1990 para 22% do total instalado em 2004.

Como particularidade do setor energético brasileiro pode-se indicar a alta porcentagem correspondente à fontes renováveis, que já foi de cerca de 60% em 1970 e de 42,0 % em 2004 (BEN, 2005). Deve-se salientar que uma parcela desta redução foi efeito da redução do consumo de álcool automobilístico e, conseqüentemente, aumento no consumo de gasolina. A biomassa e os combustíveis derivados como lenha, carvão vegetal, bagaço e álcool etílico, representam 26% do consumo total de energia do Brasil em 2004, enquanto que a hidroeletricidade representa 16%. A Figura 3.11 permite avaliar o comportamento do consumo final de energia por fontes, onde deve-se mencionar que “outras fontes” inclui o coque de carvão mineral, gás de coqueria e alcatrão. Nota-se que nos últimos 30 anos acontece uma substituição da lenha por derivados de petróleo (principalmente o óleo combustível).

Tabela 3.3 - Dados representativos do setor energético Brasileiro (BEN, 2005)

Item	Ano	Valor		
Oferta Interna de Energia no País [10^6 tep]	1970	66,9		
	1980	114,8		
	1990	142,0		
	2000	190,0		
	2004	213,4		
Consumo per capita de energia [tep/habitante]	1990	0,969		
	2000	1,113		
	2004	1,175		
Dependência externa em energia [%]	1997	29,0		
	2000	22,2		
	2002	14,1		
	2004	12,8		
Produção Nacional de petróleo [10^3 barris/dia]	1970	164,3		
	1980	182,0		
	1990	630,5		
	2000	1.238,0		
	2004	1.485,4		
Fontes renováveis na matriz energética brasileira [%] (hidroeletricidade, lenha e carvão vegetal, produtos da cana-de-açúcar)	1970	59,3		
	1980	43,3		
	1990	45,5		
	2000	38,8		
	2004	42,0		
Potência elétrica instalada no Brasil [MW] UHE - Usina hidrelétrica; UTE - Usina termelétrica; UN - Usina nuclear		1990	2000	2004
	UHE	45.558	61.063	68.999
	UTE	6.835	10.642	19.727
	UN	657	2.007	2.007

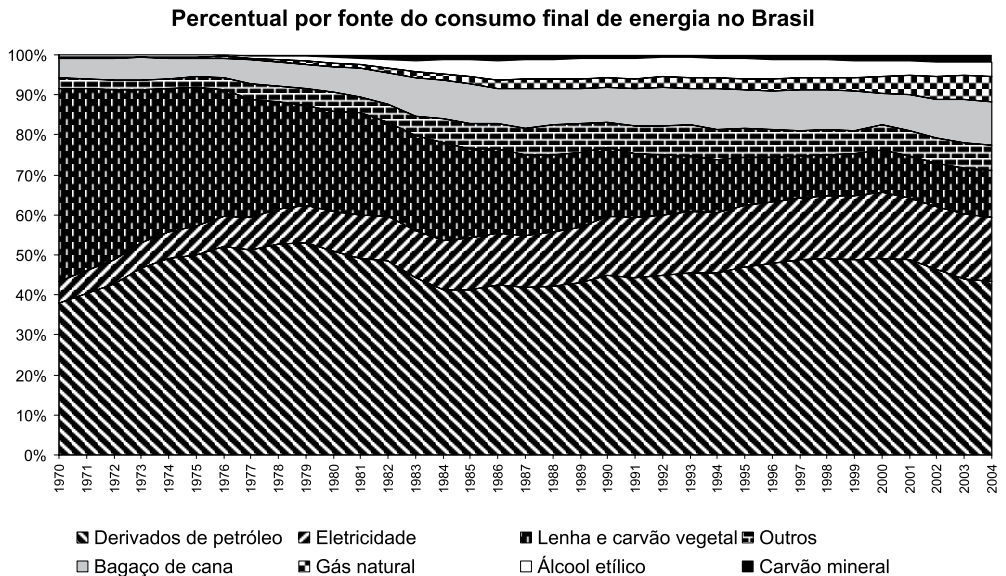


Figura 3.11 - Consumo final de energia por fontes no Brasil (BEN, 2005)

Em 1995, o setor elétrico estava diante de uma grave crise, com riscos de déficit de energia crescentes que poderiam comprometer o pleno atendimento de mercado e, conseqüentemente, inviabilizar o desenvolvimento econômico do País. Até este momento, este era um setor monopolizado pelo estado, e no período 1995-2000, passou por profundas mudanças, sendo as principais:

- Privatização das concessionárias que não dispunham de recursos para investir na expansão do sistema;
- Limitação do monopólio da Petrobrás nas esferas de extração e distribuição de combustíveis;
- Desregulamentação do setor;
- O Estado passa a realizar funções de órgão regulador através da Agência Nacional de Petróleo - ANP e da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL;
- Aparece a figura dos produtores independentes, autoprodutores e concessionários de serviço público.

Estas medidas visavam aumentar a atratividade do setor energético e conseguir, no setor privado, os recursos necessários para satisfazer a crescente demanda de energia. Como conseqüência, se esperava que a sociedade acabaria se beneficiando com a retomada dos projetos paralisados e a viabilização de novos projetos, já com recursos oriundos da iniciativa privada, visando, não só o atendimento das

crecentes demandas dos consumidores, como também a recuperação dos atrasos existentes no programa de obras. A realidade ressaltou muito mais complicada: vários investidores abandonaram o país ante incertezas de todo tipo em vista, o licenciamento ambiental da maioria das novas usinas hidrelétricas ficou parado por causa das demandas de grupos ambientalistas e os preços da eletricidade no mercado atacadista de energia mantiveram um nível muito baixo. Isto, em paralelo com a continuidade no crescimento econômico do país, poderia levar a uma nova crise no fornecimento de energia nos próximos anos.

As reservas de combustíveis fósseis de boa qualidade no Brasil não são grandes. As reservas de petróleo são avaliadas como suficientes para 22 anos, considerando-se a mesma relação entre a produção e o consumo atuais. Os maiores potenciais correspondem à energia hidráulica e ao carvão mineral (Figura 3.12 - note-se que o potencial hidráulico está expresso em tep/ano, ou seja, enquanto as demais fontes são representadas por reservas provadas, a hidroeletricidade considera apenas a capacidade de geração anual). Porém, as duas fontes apresentam restrições ambientais fortes.

O potencial hidrelétrico do País, aproveitado somente em 23 %, tem a sua maior capacidade na região amazônica, onde a inundação de enormes áreas para a construção dos reservatórios das hidrelétricas poderia trazer como resultado uma catástrofe ambiental de conseqüências imprevisíveis. Por outro lado, o carvão brasileiro, caracterizado por altos teores de enxofre e cinzas, precisaria do amadurecimento das “tecnologias limpas” para seu aproveitamento energético em grande escala. O gás natural deve ter um maior preço no futuro, como conseqüência da nacionalização da indústria do gás na Bolívia. A disponibilidade e preço do mesmo dependerá nos avanços na exploração da Bacia do Santos.

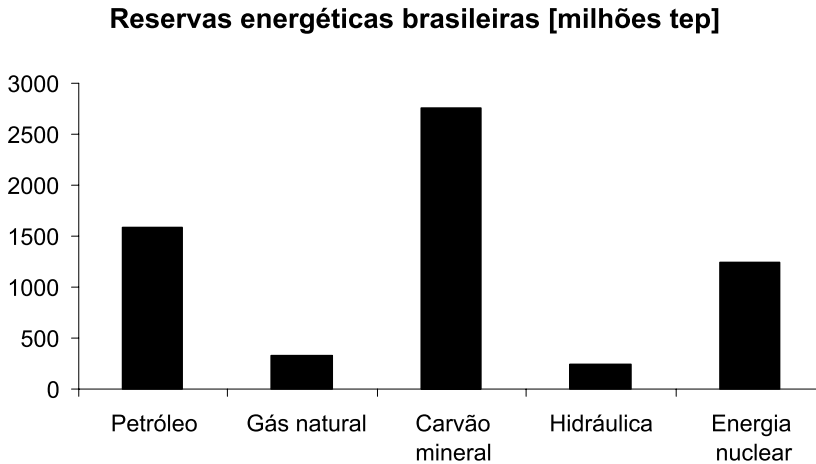


Figura 3.12 - Recursos e reservas energéticas brasileiras (BEN, 2005)

Obs: 1- Reservas energéticas brasileiras: não incluem outros recursos energéticos renováveis; 2- Carvão mineral: Coeficientes de conversão variáveis e admitindo recuperação média de 70% e poder calorífico médio de 3900 kcal/kg; 3- Hidráulica: Referente a energia firme. As reservas de energia hidráulica são expressas em milhões de tep/ano; 4- Energia Nuclear: Consideradas as perdas de mineração e beneficiamento e sem considerar a reciclagem de plutônio e urânio residual; 5- Equivalência energética em tep: Calculado sobre as reservas medidas/indicadas/inventariadas.

3.4. A ENERGIA E O EFEITO ESTUFA

O problema de maior importância causado pelo uso da energia é o efeito estufa, que pode ser definido como o acréscimo constante da temperatura média da terra (Figura 3.13) em consequência do aumento da concentração atmosférica de alguns gases, tais como o gás carbônico (CO_2), os clorofluorcarbonos (CFCs), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), entre outros. Estes gases são conhecidos como gases estufa e capturam parte da radiação infravermelha que a terra devolve para o espaço, provocando o aumento da temperatura atmosférica com as decorrentes mudanças climáticas.

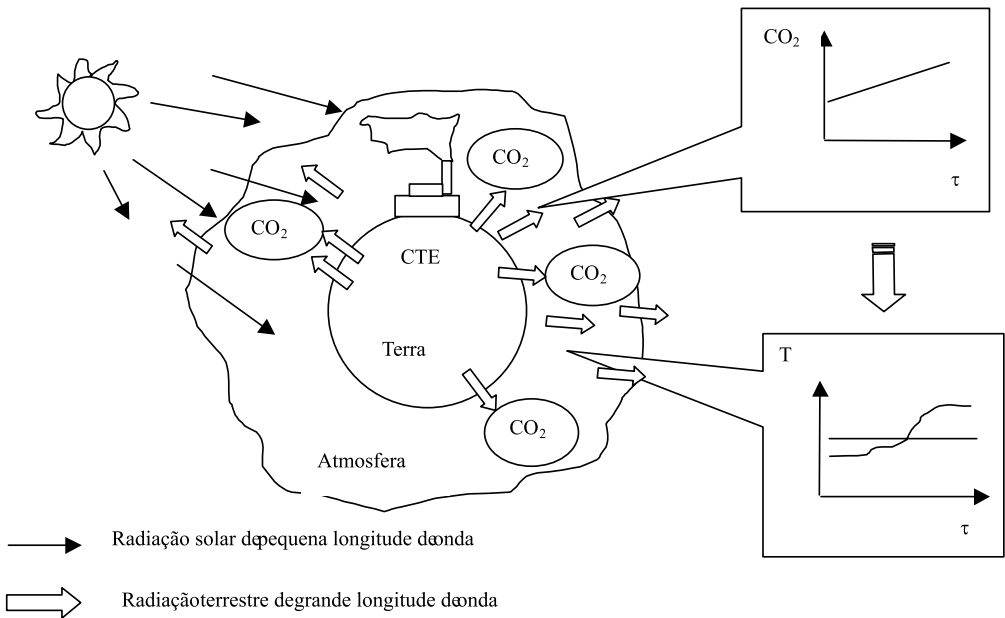


Figura 3.13 - O efeito estufa

O efeito estufa foi identificado pelo Francês Jean Fournier no século XIX. O cientista Suedes Svante Arrhenius chamou a atenção sobre os possíveis impactos ambientais da duplicação do conteúdo de CO_2 na atmosfera, já em 1896 (MARKHAM, 1994). No ano de 1938, num artigo titulado "The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature", o cientista Callendar G. chegou à conclusão que a utilização dos combustíveis fósseis tem a propriedade de aumentar as concentrações atmosféricas de CO_2 . Assim, antes da revolução industrial a concentração média de CO_2 na atmosfera era de 280 ppm, em 1990 foi de 354,2 ppm e em 2005 de 379,6 ppm.

As contribuições relativas dos diferentes gases estufa ao aquecimento global são mostradas na Figura 3.14. Observa-se que a maior contribuição corresponde ao dióxido de carbono (CO_2), seguido dos clorofluorcarbonos (CFCs) e do metano CH_4 . Cada tonelada de metano equivale a aproximadamente 21 toneladas de dióxido de carbono desde o ponto de vista do efeito estufa causado, indicador este que se denomina potencial de aquecimento global (GWP-Global Warming Potential).

As fontes antropogênicas de cada um dos gases de efeito estufa são mostradas na Tabela 3.4.

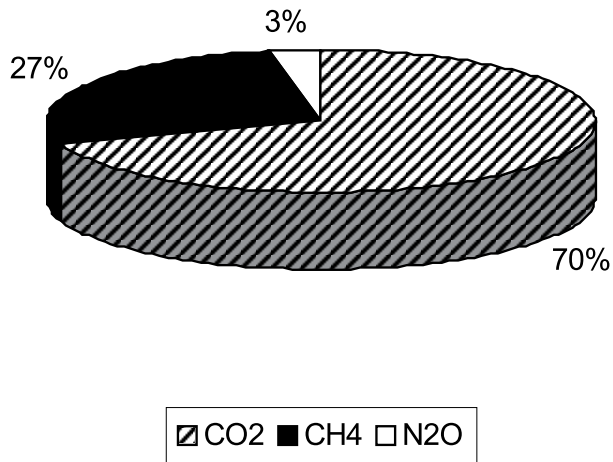


Figura 3.14 - Contribuições relativas dos diferentes gases estufa ao aquecimento global (HEVENGELD, 1995)

Tabela 3.4- Fontes antropogênicas dos gases estufa (ROSSWELL, 1991)

Gases estufas	Fontes antropogênicas
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • combustão de combustíveis fósseis; • desmatamento / mudanças no uso da terra.
CFCs	<ul style="list-style-type: none"> • espuma plástica para embalagens; • refrigerantes (freon, etc); • solventes; • aerosol spray propelentes.
CH ₄	<ul style="list-style-type: none"> • cultivo de arroz; • ruminantes; • combustão de combustíveis fósseis; • queima de biomassa; • vazamento de gás natural.
N ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • fertilizantes; • queima de biomassa; • conversão da terra para fins de agricultura; • combustão de combustíveis fósseis.

Da mesma forma como é desigual o consumo de energia entre os distintos continentes e países do mundo, também como consequência, as emissões de CO₂

estão desigualmente distribuídas. Á América do Norte, Europa e Ásia e Oceania juntos, corresponde 75 % das mesmas, conforme pode ser observado na Figura 3.15.

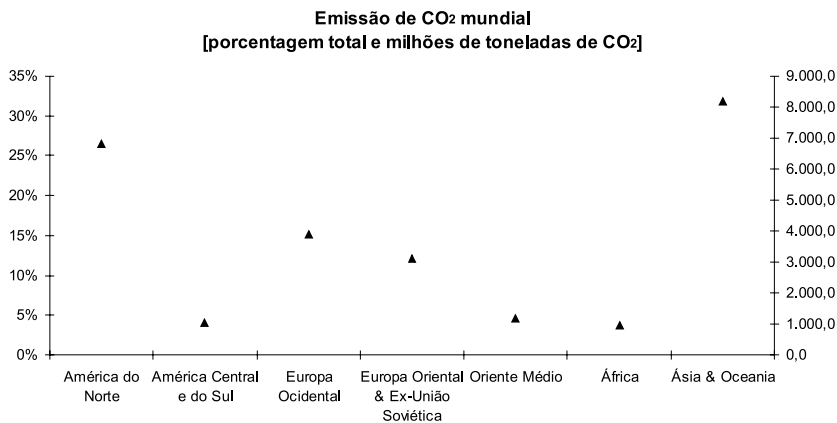


Figura 3.15 - Emissões mundiais de CO₂ baseada no consumo e queima de combustíveis fósseis (EIA, 2005)

Ainda se referindo ao relatório da EIA (2005), a intensidade das emissões de CO₂ à atmosfera no Brasil e em alguns países da América do Sul, Central e Norte, além da Europa e Ásia são apresentadas na Tabela 3.5. Apesar da porcentagem do total mundial de emissões dos países da América do Sul e Central serem baixas, pode-se constatar que no período 1980-2003, Chile, Brasil e México aumentaram suas emissões em de 56%, 47% e 43%, respectivamente. Países emergentes como Coréia do Sul, Índia e China aumentaram, respectivamente, em 73%, 71% e 59% (neste mesmo período, a Coréia do Norte reduziu suas emissões em 56% como consequência da profunda crise econômica que atravessa), enquanto que o Oriente Médio e a África também aumentaram nas taxas de 59% e 44%. Os Estados Unidos, que em 2003 representava 23% do total de emissões de CO₂ no mundo, cresceu no período 1980-2003 cerca de 18%, o que levou a um aumento de 18.313,1 milhões de toneladas de CO₂ em 1980 para 25.162,1 milhões de toneladas de CO₂ em 2003, resultando em uma acréscimo das emissões no mundo de 27 %.

Um estudo sobre mudanças climáticas mundiais realizado pelo Intergovernamental Panel on Climate Change - IPCC - avaliando a emissão de CO₂ para diferentes atividades econômicas mostra que as fontes oriundas de combustíveis fósseis compõem a maior parcela (IPCC, 2005). Este estudo compara as diferentes fontes de emissão (geração de energia, indústria, bioenergia) com relação ao valor destas emissões anuais, conforme Tabela 3.6 a seguir. Neste mesmo relatório, de acordo com a Tabela 3.7 são apresentados dados com relação a fatores de emissão de CO₂ para diferentes combustíveis.

Tabela 3.5- Emissões de CO₂ de alguns países e regiões baseada no consumo e queima de combustíveis fósseis (EIA, 2005)

Região ou País	Milhões de toneladas de CO ₂				% total (2003)
	1980	1990	2000	2003	
Cuba	31,5	35,4	32,5	34,4	0,1%
Colômbia	39,1	40,8	58,5	52,1	0,2%
Chile	23,9	31,4	55,1	53,8	0,2%
Coréia do Norte	109,8	123,0	68,7	70,4	0,3%
Argentina	92,4	100,3	136,9	129,5	0,5%
Venezuela	91,5	108,3	133,5	140,9	0,6%
Brasil	186,8	222,7	345,4	351,5	1,4%
Austrália	198,3	262,8	355,7	376,8	1,5%
México	231,4	300,1	380,0	404,7	1,6%
França	487,9	370,4	399,8	409,2	1,6%
Itália	366,7	413,4	444,0	465,5	1,8%
Coréia do Sul	126,5	234,3	437,8	469,5	1,9%
Reino Unido	608,3	598,6	550,8	564,6	2,2%
Canadá	452,5	478,6	566,1	600,2	2,4%
Alemanha	1.052,9	979,6	845,3	842,0	3,3%
África	534,5	717,9	881,0	957,9	3,8%
Índia	299,8	588,2	997,7	1.024,8	4,1%
Oriente Médio	494,7	729,9	1.086,5	1.203,2	4,8%
Japão	937,5	1.011,0	1.167,1	1.205,5	4,8%
Rússia	-	-	1.555,1	1.606,4	6,4%
Antiga União Soviética	3.027,5	3.792,2	-	-	-
China	1.434,5	2.241,2	3.032,8	3.541,0	14,1%
Estados Unidos	4.754,5	5.001,5	5.814,6	5.802,1	23,1%
Mundo	18.313,1	21.402,2	23.849,0	25.162,1	

Tabela 3.6- Dados das emissões de CO₂ por processo ou atividade industrial de grandes fontes estacionárias mundiais com mais de 0,1 milhão de toneladas de CO₂ por ano (MtCO₂ por ano). (IPCC, 2005)

Tipo de combustível	Tipo de processo	Número de fontes	Emissões (MtCO₂/ano)
Combustíveis fósseis	Central térmica	4.942	10.539
	Produção de cimento	1.175	932
	Refinarias de petróleo	638	798
	Indústrias siderúrgicas	269	646
	Indústrias petroquímicas	470	379
	Processamento de petróleo e gás natural	-	50
	Outras fontes	90	33
Biomassa	Bioetanol e bioenergia	303	91
Total		7.887	13.466

Tabela 3.7- Fatores de emissão de CO₂ para diferentes combustíveis (IPCC, 2005)

Combustível	Poder Calorífico Superior (PCS)	Fator de Emissão
Carvão Mineral	MJ/kg	gCO ₂ MJ ⁻¹
Antracita	26,2	96,8
Carvão Betuminoso	27,8	87,3
Sub-Betuminoso	19,9	90,3
Lignita	14,9	91,6
Biomassa	MJ/kg	
Lenha seca	20,0	78,4
Gás Natural	kJm ⁻³	
	37,3	50
Derivados de Petróleo	GJm ⁻³	
Óleo combustível leve (#1,2 e 4)	38,65	68,6
Óleo combustível pesado (# 5 e 6)	41,72	73,9
Querosene	37,62	67,8
GLP (Composição média)	22,22	59,1
Gasolina Automotiva		69,3

As principais medidas para a redução das emissões de gases de efeito estufa são:

- Eficiência e conservação de energia;
- Substituição de combustíveis;
- Desenvolvimento das fontes alternativas de energia;
- Acréscimo da potência instalada de centrais nucleares;
- Captura e deposição do CO₂;
- Redução de queimadas.

A eficiência energética é obtida tanto pela inovação tecnológica, através da introdução de novos produtos, máquinas ou tecnologia de menor consumo energético, como por novas formas de gestão do processo produtivo. O desenvolvimento tecnológico tem propiciado a introdução de novas tecnologias no mercado. Lâmpadas e motores mais eficientes, novos eletrodomésticos e sistemas de automação, que otimizam a geração, transporte e distribuição de energia, novos dispositivos eletrônicos de administração da carga pelo lado da demanda e tantos outros avanços tecnológicos que implicam em melhor uso da energia elétrica. Destaque-se, ainda, o enorme potencial para cogeração, entendido como geração simultânea de potência elétrica e térmica, pouco explorado em nosso país.

Como resultado da emissão de gases de efeito estufa pode-se citar:

- Redução da biodiversidade;
- Alteração do ciclo hidrológico e da vazão dos rios;
- Alterações na produtividade de diferentes cultivos;
- Aumento do nível de oceanos;
- Aumento da incidência de doenças, entre outros.

Durante o estudo, "O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e o Financiamento do Desenvolvimento Sustentável no Brasil" (Motta et al., 2000), mais de 40 oportunidades de redução das emissões de gases de efeito estufa GEE foram avaliadas numa variedade de setores do Brasil, China e Índia (veja Tabela 3.8 para exemplos). Como seria de se esperar, as oportunidades de redução mais significativas para todas as nações foram aquelas relacionadas com a geração de energia tanto no setor industrial quanto nos serviços industriais de utilidade pública. Mesmo que o objetivo no longo prazo de estabilizar as concentrações de GEE em níveis seguros venha finalmente implicar dependência substancial de fontes de energia renováveis, a realidade é que muito do aumento em curto prazo de geração de energia basear-se-á no uso de combustíveis fósseis, especialmente de carvão. Projeções para a Índia mostram

que a demanda de carvão aumentará 60% por volta de 2007 na ausência de novas políticas. Na China, usinas termelétricas a carvão irão responder por 60% a 70% da capacidade de geração de eletricidade, mesmo com a capacidade total triplicando ao redor de 2020 (Motta et al., 2000). A Tabela 3.9 apresenta as emissões de CO₂ por tipo de combustível.

Tabela 3.8 - Oportunidades selecionadas de redução das emissões de GEE no Brasil, China e Índia (Motta et al., 2000)

Geração de energia convencional:
<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo combinado com turbinas a gás; • Melhoria da tecnologia de geração de eletricidade a partir do carvão.
Mudança de combustível:
<ul style="list-style-type: none"> • Recuperação e uso de metano na exploração do carvão; • Co-geração de eletricidade em indústrias químicas e petroquímicas; • Gaseificação de madeira e resíduos de celulose; • Co-geração de eletricidade baseada em bagaço.
Aplicações industriais:
<ul style="list-style-type: none"> • Melhoras na eficiência de caldeiras, motores e outros equipamentos; • Processos modernos de economia de energia nas indústrias de cimento, ferro e aço.
Uso de fontes renováveis:
<ul style="list-style-type: none"> • Uso de energia da biomassa; • Energia eólica; • Aplicações solar-termal e solar-fotovoltaicas; • Hidroeletricidade em pequena escala; • Bombas de irrigação movidas a energia eólica.
Opções florestais - Plantações silvícolas para celulose, lenha e carvão:
<ul style="list-style-type: none"> • Manejo sustentável de florestas em terras públicas e privadas; • Projetos comunitários agroflorestais.

Tabela 3.9- Comparação das emissões de CO₂ durante a geração de eletricidade com diferentes combustíveis (FIESP/CIESP, 2001)

Combustível	Emissões (kg CO ₂ /kWh)	Condições
Bagaço de cana-de-açúcar	0,057 - 0,11	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Madeira	0,0465	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Óleo combustível	0,87	Somente queima do combustível
Gás natural	0,38	Somente queima do combustível

Uma opção tecnicamente possível, porém cara, para alcançar reduções significativas das emissões de gases de efeito estufa é a remoção do CO₂ dos gases de exaustão da chaminé de grandes centrais térmicas com combustíveis fóssil, e isolar esta parcela de CO₂. Esta estratégia de descarbonização dos gases de exaustão é em grande parte cara por causa das despesas associadas com a separação do CO₂ dos gases (a concentração média é de 8 a 15% em volume).

Uma alternativa muito mais promissora envolve a descarbonização do combustível: a produção de hidrogênio ou de um combustível rico em hidrogênio produzido a partir de um combustível rico em carbono. A vantagem da descarbonização do combustível em relação à descarbonização dos gases de exaustão é o benefício econômico direto da venda de eletricidade.

No Brasil, o setor de transporte responde por volta de 42% do total das emissões de CO₂, conforme pode ser observado na Tabela 3.10 (Klabin, 2000). Isto é consequência do fato da matriz energética estar baseada na hidroeletricidade.

Tabela 3.10- Comparativo das emissões de CO₂ e o percentual correspondente ao setor de transporte (Klabin, 2000)

Descritor	Brasil	Japão	UE	EUA	México	Índia	China	Rússia
kg CO ₂ /US\$*PIB (1990 US\$)	0,33	0,46	0,51	0,85	0,51	0,73	0,92	2,24
CO ₂ per capita (t CO ₂ /hab)	1,81	9,17	8,55	19,88	3,46	0,86	2,51	10,44
Total CO ₂ (milhões de t CO ₂)	287	1151	3180	5229	328	803	3007	1548
Emissões dos meios de transporte (milhões de t CO ₂)	119	252	828	1580	101	112	167	108
% emissões dos meios de transporte	41,5	21,9	26,0	30,2	30,8	13,9	5,6	7,0

EU- União Européia; EUA- Estados Unidos;

Além do CO₂, um outro gás estufa cujo teor aumenta constantemente na atmosfera é o metano (CH₄). Este gás tem fontes biogênicas, tais como os pântanos, os resíduos animais, as plantações de arroz, os aterros sanitários, etc. Das emissões totais, 2/3 têm um caráter antropogênico, ou seja, aquelas provocadas pela ação do homem (ROTSMAN et. al., 1992). Desde 1978, a taxa observada do aumento da concentração de metano na atmosfera, tem variado na faixa de 14 - 17 ppbv (partes por bilhão em volume), ou em, aproximadamente, 0,9 % ao ano. O processo de remoção do CH₄ atmosférico consiste em sua oxidação fotoquímica por radicais hidroxílicos na troposfera. Como o efeito estufa é causado pelo consumo de energia, principalmente quando se queima combustível fóssil, é importante analisar o peso dos diferentes sistemas de geração elétrica. Analisando-se a Figura 3.16 a seguir, nota-se claramente que os países da América Latina e do Caribe apresentam uma capacidade hidrelétrica que tem um peso bem superior a outras formas de energia.

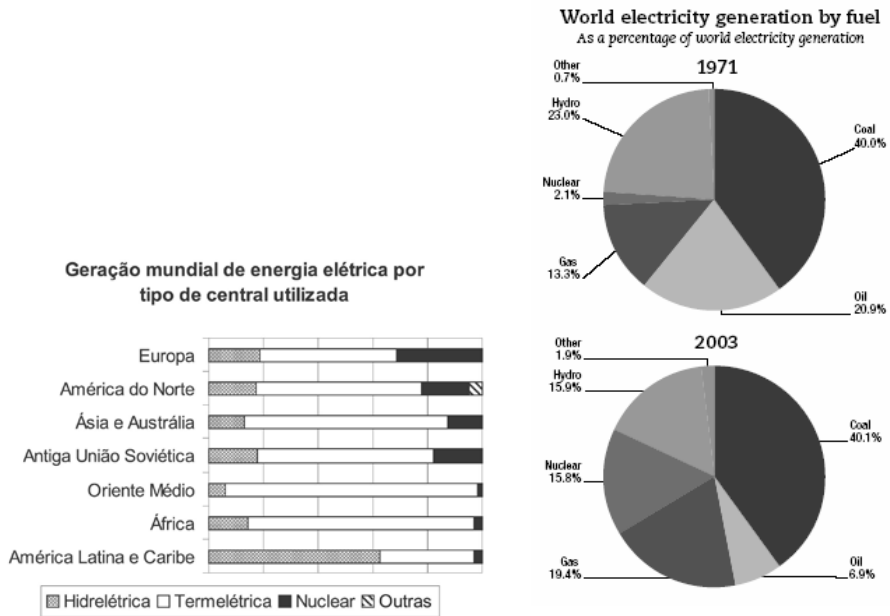


Figura 3.16 - Geração mundial de energia elétrica em relação ao tipo de central empregada (OECD 2006)

Nos países “em desenvolvimento”, a tendência é de aumento no consumo de energia elétrica decorrente do próprio processo de crescimento econômico. Muitos países não apresentam um potencial hidrelétrico considerável. Além disso a construção de novas usinas hidrelétricas de grande porte apresenta riscos ambientais, além do que o prazo de conclusão é maior se comparado a centrais térmicas, a participação da geração de energia por centrais termelétricas tende a aumentar, trazendo consigo um aumento nas emissões de CO_2 e todos os outros poluentes desta tecnologia de geração. Dessa forma, é de vital importância procurar utilizar, nestes países, tecnologias mais eficientes e limpas, em associação a usos mais racionais de energia afim de mitigar o efeito estufa.

3.5. O PROTOCOLO DE KYOTO

Em dezembro de 1997, em Kyoto (Japão), 160 países alcançaram um acordo que limita legalmente as emissões de gases estufa nos países industrializados. Assim, no período de 2008 a 2012, a redução será em média de 5 %. Os Estados Unidos aceitaram uma redução de 7 %, a União Européia de 8 % e o Japão de 6 %. Ficou a incerteza acerca da quantificação dos “sumidouros” de carbono nas florestas. Teoricamente, é desejável outorgar “créditos” pelo carbono acumulado (seqüestrado) nas florestas, e incluir as emissões de CO_2 , produto do desmatamento no inventário de emissões.

O artigo 3 do Protocolo permite aos países realizarem ajustes no seu inventário de gases de efeito estufa, considerando as mudanças no uso da terra e atividades florestais que tenham acontecido desde 1990. Alguns cientistas opinam que não existe suficiente conhecimento do processo de remoção do carbono na atmosfera pelas florestas, e sobre os métodos de realização do inventário de florestas (EST, 1998).

Embora os países participantes tenham concordado em relação à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, as negociações em Kyoto foram muito difíceis. O cientista Brasileiro José Goldemberg, que participou da Conferência, considera como causa das dificuldades as seguintes proposições (GOLDEMBERG, 1997):

- Consideráveis interesses econômicos envolvidos, sobretudo dos produtores de carvão e petróleo, dentro e fora dos Estados Unidos;
- A posição da União Européia, que pode reduzir mais facilmente suas emissões que o Japão e os Estados Unidos;
- A posição do governo Americano, que parece disposto a tomar medidas para evitar o efeito estufa, mas é fortemente pressionado pelo Senado, que pretende que os países em desenvolvimento sejam submetidos às mesmas limitações que os Estados Unidos;
- A posição do Grupo dos 7 e da China, que desejam estabelecer limites para os países ricos, ficando estes isentos de qualquer limitação, que possa impedir seu crescimento econômico.

O Brasil propôs em Kyoto a criação de um Fundo de Desenvolvimento Limpo, a fim de que os países desenvolvidos contribuam para a redução das emissões de gases estufa nos países em desenvolvimento.

O Protocolo de Quioto foi aberto para assinatura em 16 de março de 1998. Foi prevista a sua entrada em vigor 90 dias após a sua ratificação por pelo menos 55 Partes da Convenção, incluindo os países desenvolvidos que contabilizaram pelo menos 55% das emissões totais de dióxido de carbono em 1990 desse grupo de países industrializados. (MCT, 2004)

Após um longo período de indefinições, A Rússia finalmente formalizou a ratificação ao Protocolo de Quioto no dia 04 de novembro de 2004. A documentação oficial de ratificação ao Protocolo, foi enviada à Convenção Quadro das Nações Unidas em Mudança Global do Clima - CQNUMC. A ratificação russa permitiu que o Protocolo entrasse em vigor em 16 de fevereiro de 2005. Oficialmente, o protocolo passou a vigorar no prazo de 90 dias após o recebimento dos documentos pelo Secretário Geral das Nações Unidas, em Nova York.

Com a entrada da Rússia, mesmo sem a adesão dos EUA (maiores emissores mundiais, com 36% das emissões globais de gases de efeito estufa), o Protocolo de Quioto atende aos requisitos necessários e passa a vigorar, com a ratificação de 125 países que juntos emitem 61,6% do total de gases de efeito estufa.

Tal fato refletiu diretamente no mercado internacional de créditos de carbono, provocando um aumento gradual e significativo no preço e no volume dos créditos transacionados (expressos em toneladas de CO₂ equivalente - tCO₂e) na Bolsa do Clima de Chicago, a partir da semana do dia 25 de outubro de 2004 (início do processo de ratificação pela Rússia).

Por outro lado, e de uma forma bastante básica, um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL é uma atividade que é diretamente responsável pela diminuição das emissões de um ou mais dos seis gases acordados pelo Protocolo, implementado em um país em desenvolvimento e que atenda aos requisitos impostos pela Convenção. Esses projetos são normalmente referenciados pelo número de toneladas equivalentes de carbono que reduzem, onde cada um dos gases evitados tem um potencial diferente, avaliados em termos de uma quantidade de toneladas de gás carbônico com equivalente potencial de efeito estufa (CO₂ eq.). Esta conversão é feita com uso do Potencial de Aquecimento Global, cujos valores podem ser vistos na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Potenciais de aquecimento global de GEE acordados no Protocolo de Kyoto

Gases do Efeito Estufa	Origem mais comum	GWP (t CO ₂ eq.)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Queima de combustíveis fósseis	1
Metano (CH ₄)	Mineração, aterros, gado, degradação de matéria orgânica	21
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Fertilizantes, queima de combustíveis fósseis (ex: transporte)	310
Hidrofluor Carbono (HFCs)	Processos Industriais (refrigeração/ar condicionado)	11.700 a 140
Perfluor Carbono (PFCs)	Processos Industriais (em subst. aos HFCs)	9.200 a 6.500
Hexafluoreto de Enxofre (SF ₆)	Fluido Dielétrico, longo tempo de vida, 3.200 anos	23.900

Neste sentido, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ou Clean Development Mechanism (CDM) tem o objetivo de buscar a redução de emissões de gases do efeito estufa nos países em desenvolvimento, na forma de sumidouros, investimentos em tecnologias mais limpas, eficiência energética e fontes alternativas de energia. Nesse mecanismo, são essenciais as Reduções Certificadas de Emissão (RCE's) que confirmem a redução das emissões e que representem adicionalidade à que ocorreria na ausência da atividade certificada de projeto.

O mecanismo de Implementação Conjunta (ou Joint Implementation - JI) implica constituição e transferência do crédito de emissões de gases do efeito estufa, do país em que o sumidouro ou o projeto ambientalmente otimizado está sendo implementado para o país emissor. Este pode comprar "crédito de carbono" e, em troca, constituir fundos para projetos a ser desenvolvidos em outros países. Para o CO₂, CH₄ e N₂O, foi negociado durante a Conferência de Quioto que para o horizonte compreendido entre os anos de 2008 e 2012 as emissões sejam reduzidas em 5,2%, na média, em relação aos níveis de 1990 (FIESP/CIESP, 2001).

Para ser elegível a qualificar como uma atividade de JI e receber os créditos de emissão, os projetos têm que satisfazer os critérios seguintes:

- O projeto deve ser empreendido entre os países Anexo 1 do Protocolo de Quioto;
- A atividade do projeto deve ser de um tipo que resulta em uma redução em emissões pelas fontes ou encarecimento da remoção através de sumidouros;
- O projeto leva a uma redução ou acréscimo das emissões de GEE que é adicional a situação correspondente à ausência do projeto;
- A participação de ambas as partes deve ser voluntária e aprovada por cada parte;
- O projeto deve ser suplementar a ações já em curso pelos países para reduzir as emissões de gás de efeito estufa.

No COP 6 (Conferencia das partes 6) os países do Anexo 1 concordaram em se abster de usar unidades de redução de emissão gerada de instalações nucleares para alcançar os seus compromissos, como também afirmaram o uso limitado de atividades de silvicultura para reduzir emissões.

O MDL tem dois objetivos principais: diminuir o custo global de redução de emissões de gases lançados na atmosfera e que produzem os gases de efeito estufa e, ao mesmo tempo, também apoiar iniciativas que promovam o desenvolvimento sustentável em países em desenvolvimento. Inicialmente, é importante lembrar que, no Protocolo de Quioto, a criação do instrumento de MDL e suas normas e condições para

implementação são definidas no Artigo 12, que estabelece que: (CEBDS, 2004)

- O objetivo do MDL é possibilitar que os países do Anexo 1 cumpram seus compromissos, já quantificados, de redução de emissões e, ao mesmo tempo, propiciar que os países menos industrializados (do não-Anexo 1) reduzam emissões e promovam o desenvolvimento sustentável.
- Todas as atividades de MDL deverão obedecer às diretrizes e orientações de um Conselho Executivo, o Executive Board, designado pelos países membros do Protocolo em reunião da COP.
- Os países do não-Anexo I que desenvolverem projetos de MDL que resultem em redução de emissões quantificadas e certificadas poderão comercializá-las para os países do Anexo I, que poderão computar esse volume como abatimento nas suas quantidades de emissões a serem reduzidas.
- A redução de emissões quantificadas, resultante de projetos de MDL, deverá ser certificada por entidades operacionais independentes, designadas como certificadoras pela reunião da COP, que deverá também definir todos os procedimentos de auditorias de verificações para assegurar a transparência e a prestação de contas dos projetos.
- Os projetos de MDL e a aquisição das Reduções Certificadas de Emissões - RCE's podem envolver entidades privadas ou públicas.

Esses objetivos simultâneos refletem a necessidade de ação coordenada entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, que, apesar de posicionamentos distintos, dividem o objetivo comum de reduzir o acúmulo de destes gases. Alguns benefícios para o desenvolvimento sustentável associados a potenciais projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo são apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12- Benefícios para o desenvolvimento sustentável associados a potenciais projetos de MDL (Motta et al., 2000)

Benefícios Ambientais	Potenciais Projetos de MDL
Qualidade do Ar	Muitas opções alternativas de geração e co-geração de energia levam a reduções substanciais de partículas, CO ₂ e SO ₂ , fuligem e NO _x . Tecnologias renováveis como a eólica e a solar eliminam completamente esses poluentes.
Qualidade da Água	As fontes de energia solar e eólica oferecem ganhos indiscutíveis em comparação com alternativas convencionais. O uso da tecnologia do digestor anaeróbico em áreas industriais poderia simultaneamente tratar a água servida e fornecer biogás.
Disponibilidade de Água	A administração de floresta sustentável poderia proteger contra a escassez de água, especialmente se praticada numa área extensa.
Conservação do Solo	O manejo sustentável de florestas poderia ter um impacto positivo significativo na conservação do solo, especialmente se praticado numa área extensa. Novas plantações silvícolas podem reduzir a erosão do solo, dependendo do uso da terra disponível. Na China, as plantações de "redes de árvores" nas planícies podem reduzir a erosão pelo vento. Projetos de reflorestamento em bacias hídricas-chave podem impedir assoreamento.
Resíduos Sólidos	Tecnologias alternativas de combustão reduzem ou eliminam resíduos sólidos, em alguns casos criando subprodutos comercializáveis.
Ruído	A substituição de bombas a diesel por bombas movidas a energia eólica leva a uma redução substancial de ruído.
Prevenção/Proteção contra Enchentes	O reflorestamento em bacias hidrográficas poderia eliminar ou controlar o risco de enchentes.
Proteção da Biodiversidade	O manejo sustentável de florestas oferece benefícios substanciais comparativamente às práticas atuais de extração de madeira. A cogeração e as tecnologias renováveis reduzem algumas pressões derivadas da mineração.

O Ciclo de Vida do Projeto de MDL se compõe necessariamente das seis etapas abaixo descritas, para que possa efetivamente gerar os créditos de carbono esperados: (Alves et al., 2006)

- Elaboração do Documento de Concepção do Projeto - DCP (Project Design Document - PDD);
- Validação/Aprovação;
- Registro;
- Monitoramento;
- Verificação/Certificação; e
- Emissão e aprovação das RCE's.

Resumidamente, um projeto pode ser desenvolvido como um projeto de MDL, se atender aos seguintes requisitos (Alves et al., 2006):

- Participação voluntária;
- Aprovação do país no qual essas atividades serão implementadas;
- Estar de acordo com os objetivos de desenvolvimento sustentável definidos pelo país no qual as atividades do projeto forem desenvolvidas;
- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa de forma adicional ao que ocorreria sem a execução do projeto de MDL;
- Contabilizar o eventual aumento de emissões de gases de efeito estufa que ocorrerem fora dos limites das atividades do projeto e que sejam mensuráveis e atribuíveis a este;
- Consideração da opinião de todos os atores que sofrerão os impactos das atividades do projeto (que devem ter voz ativa ao longo do ciclo de vida do projeto);
- Não levar a impactos colaterais negativos no meio ambiente local;
- Proporcionar benefícios mensuráveis, reais e de longo prazo, relacionados com a mitigação da mudança do clima;
- Estar relacionado aos gases e setores definidos no Anexo A do Protocolo de Quioto ou se referem às atividades de projetos de reflorestamento e florestamento

Os projetos de Biomassa são uma presença significativa entre os projetos de MDL, como pode ser visto no gráfico da Figura 3.17.

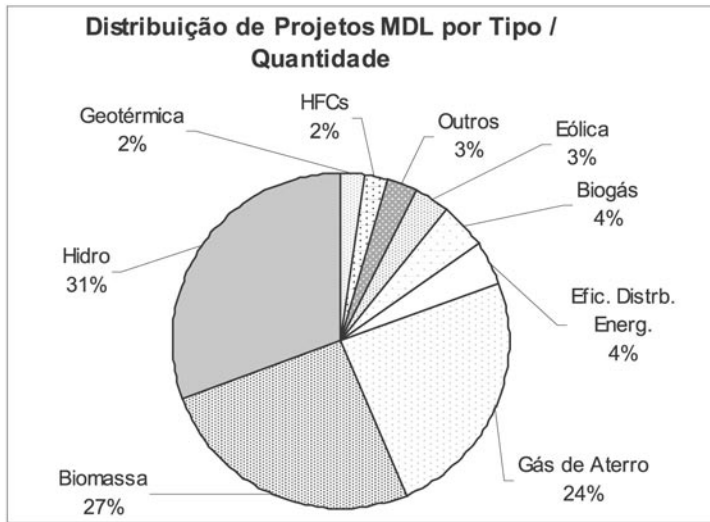


Figura 3.17- Gráfico de distribuição dos projetos de MDL por tipo (Alves et al., 2006)

Observando a distribuição quantitativa dos projetos de biomassa, nota-se que estes equivalem a mais da metade dos de MDL – 55% dos que estão sendo atualmente desenvolvidos (51 entre 92 projetos). Estas iniciativas fazem uso de várias tecnologias, desde gaseificação, uso de resíduos agrícolas, aproveitamento de resíduos de serrarias, aumento do potencial de cogeração em usinas de açúcar e álcool, biodigestão de efluentes, produção de biodiesel (estes últimos estão incluídos na categoria Outros do gráfico) e aproveitamento dos gases de aterro (primeiro projeto de MDL registrado, onde os gases de aterro são capturados e convertidos em energia em um gerador).

Estudo de casos: Foram escolhidos dois projetos de CDM ligados ao aproveitamento energético da biomassa; a saber: (Alves et al., 2006).

- Cogeração de bagaço de cana-de-açúcar - Projeto Usina Vale do Rosário, Brasil - Geração de energia elétrica e vapor de processo (cogeração) através da queima do bagaço de cana-de-açúcar, como parte da expansão das instalações da Usina Vale do Rosário. A capacidade instalada de geração de energia elétrica para venda é de 65 MW, responsável por 180 GWh anuais de energia. Reduções previstas para os primeiros 7 anos de projeto: 281.877 ton equiv. de CO₂.
- Geração de energia usando palha de arroz e controle de queima não-controlada – Projeto Pichit, Tailândia - Projeto de MDL com geração de energia elétrica, usando ciclo de vapor e caldeiras com queima direta de palha de arroz, evitando a sua queima ou decomposição a céu aberto (prática usual). O projeto prevê a coleta da palha de arroz de 30 unidades de beneficiamento, geração de eletricidade para a rede e ainda incorporação das cinzas em uma unidade de produção de cimento na

Tailândia (o projeto está localizado na província da Pichit). Reduções previstas para os primeiros 7 anos de projeto: 585.000 ton equiv. de CO₂.

3.6. A ENERGIA E A CHUVA ÁCIDA

O termo chuva ácida tem sido popularizado pela mídia em lugar de deposição atmosférica. Este é mais abrangente, pois, na realidade, as deposições ou precipitações ácidas podem ser na forma de chuva, neve ou até mesmo de materiais sólidos ou gasosos, que apresentem características ácidas.

A acidificação das precipitações foi reconhecida como um problema da poluição do ar aproximadamente 100 anos atrás. Smith, com base em medições realizadas na Grã-Bretanha de 1840 a 1870 mostrou que as concentrações de SO₄⁻² na chuva eram maiores nos locais mais densamente povoados, especialmente perto das grandes centrais que queimavam carvão mineral (SCHWARTZ, 1989).

Embora as chuvas ácidas estejam afetando, principalmente, os países industrializados, todas as tendências indicam que os países em desenvolvimento não estão muito longe de ter de enfrentá-las, e dentro desses, figuram como os mais propensos, a China, a Índia e o Brasil. MARKHAM (1994) considera que a chuva ácida, depois da poluição urbana, é o problema da poluição do ar que mais rápido cresce no Sudeste Asiático. Em 1987, as cidades de Petaling Jaya e Senai sofreram uma chuva com pH igual ao verificado na Grã Bretanha e Alemanha. Hong Kong acredita que a China é responsável pela maior parte da chuva ácida que cai sobre o seu território.

No Brasil, as grandes regiões industrializadas já começam a apresentar os sintomas iniciais do problema, como é o caso de Cubatão (SP), onde morros e escarpas encontram-se desprovidos de vegetação, como resultado não só da acidez da chuva como também da alta taxa de poluentes encontrada nesta região.

SEVÁ (1991) identifica várias regiões no Brasil com enormes emissões de SO₂ e portanto propensas ao fenômeno da chuva ácida:

- São Paulo, Cubatão, Paulínia e São José dos Campos (300.000 toneladas de SO₂/ano);
- Zona carbonífera do Sul de Santa Catarina (100.000 toneladas de SO₂/ano);
- Vitória, Espírito Santo (23.000 toneladas de SO₂/ano).

Convencionalmente, é considerada ácida a chuva que apresenta valores de pH menores que 5,6. Este valor expressa o equilíbrio químico estabelecido entre o dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e sua forma ácida solúvel, o íon bicarbonato (HCO₃) em água pura. O decréscimo de uma unidade de pH significa um aumento de dez vezes na concentração do íon hidrogênio.

Além do dióxido de carbono, outras espécies químicas atmosféricas determinam a acidez da chuva. Valores de pH inferiores a 5,6 resultam da presença de ácidos sulfúrico (H_2SO_4) e nítrico (HNO_3). Os ácidos sulfúrico e nítrico originam-se das reações e interações que ocorrem na atmosfera entre os óxidos de nitrogênio (NO e NO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e outras espécies químicas resultantes de reações fotoquímicas. Os óxidos de nitrogênio e de enxofre podem derivar tanto de fontes naturais como antropogênicas.

Como poluente, o dióxido de enxofre é lançado diretamente na atmosfera pela queima de combustíveis fósseis. Indústrias metalúrgicas também contribuem para essa poluição: vários minérios de cobre, chumbo e zinco apresentam-se sob a forma de sulfetos e, durante sua fusão, o enxofre é oxidado, formando o dióxido de enxofre. Em escala global, 50% do dióxido de enxofre atmosférico tem origem artificial.

Na América do Sul, chuvas com pH médio de 4,7 têm sido registradas tanto em áreas urbanas e industrializadas quanto em regiões consideradas remotas. Assim, estudos relacionados com a química da precipitação na floresta amazônica, têm mostrado que os valores de pH da chuva na região estão próximos daqueles observados em áreas das cidades do Rio de Janeiro e São Paulo (de MELLO e MOTTA, 1987).

Os efeitos da acidificação dos lagos sobre a vida aquática são:

- Diminuição da população de peixes. Tem sido demonstrado que a truta e o salmão atlântico são particularmente sensíveis a baixos níveis de pH, o que interfere em seus processos reprodutivos e, freqüentemente, conduz a deformações do esqueleto. O valor crítico do pH é de 5,5 (HARTE, 1992). A diminuição do pH incrementa a solubilidade do alumínio metálico, o que é altamente tóxico para muitas formas de vida aquática a concentrações de 0,1- 1 mg/l;
- Redução de certos grupos de zooplâncton, algas e plantas aquáticas, o que interrompe a cadeia alimentar nos lagos;
- Os moluscos não podem sobreviver em águas ácidas por causa da dissolução do carbonato de cálcio. Isto interfere na absorção de cálcio por estes organismos para a sua proteção esquelética exterior;
- Alta mortalidade em anfíbios e falhas no nascimento dos ovos.

Estudos detalhados têm mostrado que as chuvas ácidas podem ser prejudiciais para a agricultura. Uma chuva com pH entre 2,5 e 3,0 afeta culturas tais como a alface, beterraba, cebola, soja e tabaco. Porém, a chuva ácida pode ter efeito positivo a longo prazo por causa da ação fertilizante do nitrogênio. Em geral os sistemas terrestres são menos afetados pela chuva ácida que os aquáticos.

Outros danos da chuva ácida dizem respeito às estruturas e monumentos. A

água acidificada corrói as tubulações, existindo o risco de que o metal despreendido das paredes possa afetar as pessoas através do consumo de água. Prédios e monumentos são afetados também pela chuva ácida, sendo os casos mais notáveis a Acrópole de Atenas e diferentes obras de arte na Itália.

Porém, estudos mostram que existem soluções para o problema da deposição ácida. Os cientistas consideram que a diminuição das emissões de NO_x e SO_x em 50% pode ser suficiente para deter a acidificação do meio ambiente. O problema não é tecnicamente difícil de se solucionar, pois já estão em estágio comercial tecnologias altamente eficientes para o controle das emissões de NO_x e SO_x . É um problema fundamentalmente econômico e político, considerando a magnitude dos investimentos que precisariam ser realizados, e pela necessidade de uma abordagem regional deste fenômeno. Os Estados Unidos tinham planos de atingir no ano 2000, 50 % de redução nas emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre.

3.7. A POLUIÇÃO DO AR NAS MEGACIDADES

A Organização Mundial da Saúde (WHO - World Health Organization) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP - United Nation Environment Program) têm apoiado a criação de um sistema global de monitoramento ambiental (GEMS - Global Environmental Monitoring System) para controlar a qualidade da água e do ar. Neste programa, definiu-se como megacidade, uma aglomeração urbana com uma população, atual ou projetada, de 10 milhões de habitantes ou mais para o ano 2000. No total tem-se 24 cidades com estas características, das quais foram estudadas só 20.

A principal fonte de poluição em áreas urbanas é a queima de combustíveis fósseis com fins de aquecimento doméstico, geração de potência, motores de combustão interna, processos industriais e a incineração de resíduos sólidos.

A topografia das megacidades também influencia na forma como os poluentes são transportados e dispersos. Assim, é possível reunir as megacidades em três grupos:

- Topografia plana e clima não afetado por reservatórios de água: Beijing, Cairo, Deli e Moscou;
- Topografia plana e clima afetado por reservatórios de água: Bangkok, Bombaim, Buenos Aires, Calcutá, Jakarta, Karachi, Londres, Manila, Nova Iorque, Shangai e Tóquio;
- Topografia variável e clima influenciado pelas montanhas que as rodeiam: Los Angeles, Cidade do México, Rio de Janeiro e São Paulo.

A Figura 3.18 mostra uma análise da qualidade do ar nas 20 megacidades, baseada na avaliação subjetiva de dados de monitoramento e quantificação de emissões (UNEP - WHO, 1994). As maiores cidades do Brasil, China, Índia, Irã, Malásia, Tailândia e Indonésia apresentam uma concentração de particulados no ar de 2 a 8 vezes superior às normas da WHO.

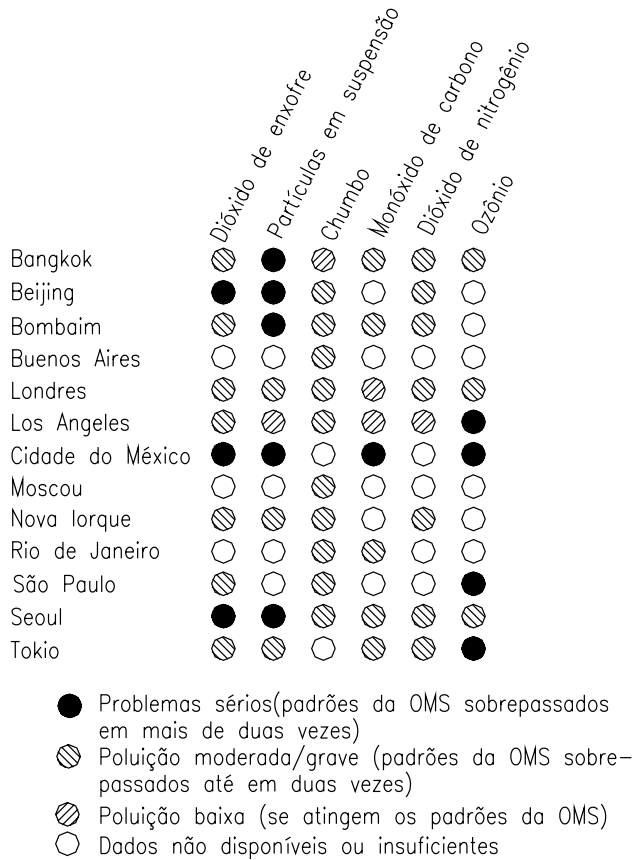


Figura 3.18 - Análise da qualidade do ar em 20 megacidades (UNEP - WHO, 1994)

3.8. A GERAÇÃO TERMELÉTRICA E A POLUIÇÃO DO AR

O problema da poluição do ar é intenso nas grandes cidades, especialmente naquelas localizadas nos países em desenvolvimento. Segundo uma avaliação do GEMS, mais de $1,3 \cdot 10^9$ pessoas moram em cidades onde a concentração de particulados no ar ultrapassa os valores estabelecidos nos padrões da WHO. Este valor, para o caso dos óxidos de enxofre, é de $1,2 \cdot 10^9$ pessoas. A WHO, com base na atualização dos dados obtidos no GEMS, chegou à conclusão que $1,6 \cdot 10^9$ pessoas correm o risco

de ter sua saúde afetada em consequência da poluição do ar.

As emissões de poluentes atmosféricos podem classificar-se em:

- Antrópicas: aquelas provocadas pela ação do homem (indústria, transporte, geração de energia, etc.);
- Naturais: causadas por processos naturais (emissões vulcânicas, processos micro-biológicos, etc.).

Por outro lado, os poluentes gasosos podem ser classificados em (Figura 3.19):

- Primários: aqueles lançados diretamente na atmosfera, como resultado de processos industriais, gases de exaustão de motores de combustão interna, etc. Como exemplo, temos os óxidos de enxofre SO_x , os óxidos de nitrogênio NO_x e particulados;
- Secundários: produto de reações fotoquímicas, que ocorrem na atmosfera entre os poluentes primários. Assim, por exemplo, temos a formação de ozônio estratosférico e de peroxiacetilnitrato (PAN), como resultado da reação dos óxidos de nitrogênio com hidrocarbonetos na atmosfera.

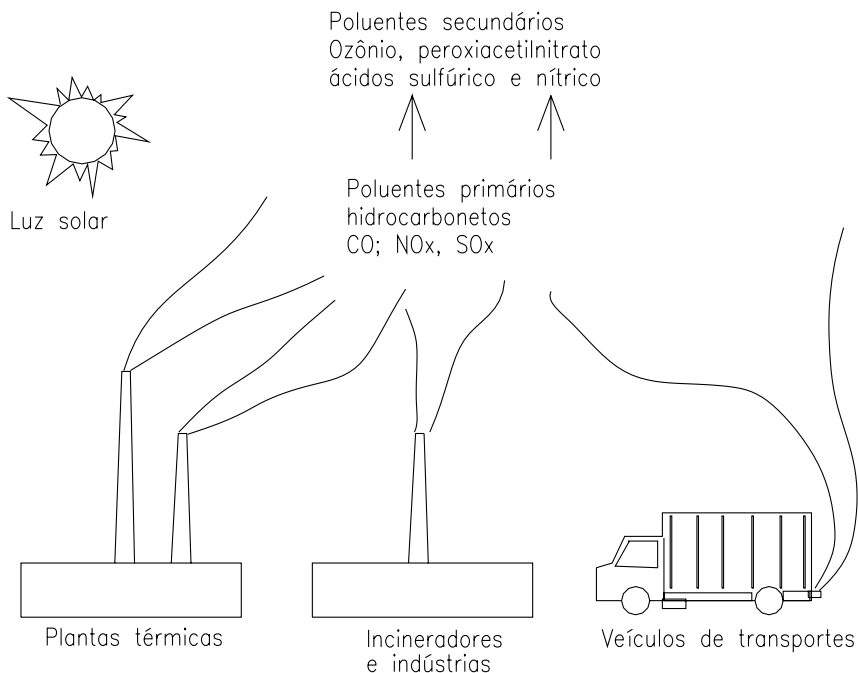


Figura 3.19 - Poluentes primários e secundários

As emissões antrópicas ocorrem de forma concentrada nos núcleos populacionais. Entretanto, em alguns casos, são menores que as ocasionadas pelos fenômenos naturais. Dentre as fontes de emissão antrópica, a geração de energia constitui a atividade econômica que maior quantidade de poluentes gasosos emite à atmosfera.

Uma análise da distribuição, por fontes de emissão, de cinco poluentes, nos EUA, permite concluir que:

- as emissões de óxido de enxofre são quase totalmente devidas à queima de combustíveis fósseis;
- as emissões de óxido de nitrogênio distribuem-se em partes iguais entre a queima de combustíveis fósseis e as emissões dos veículos automotores;
- os compostos orgânicos voláteis têm como fontes mais importantes os processos industriais e o transporte automotivo;
- as emissões de particulados estão uniformemente distribuídas entre as diferentes fontes;
- mais de 2/3 das emissões totais de CO, nos EUA, têm como fonte o transporte automotivo.

A Tabela 3.13 apresenta um resumo dos tipos de poluentes, com maior impacto ambiental, lançados à atmosfera por diferentes equipamentos e indústrias e a atividade econômica em geral. Centrais termelétricas e incineradores de resíduos são considerados grandes emissores de poluentes. Porém, é preciso conhecer a diferença na composição dos gases de exaustão destas fontes. Nos incineradores, além de particulados, óxidos de enxofre e nitrogênio, existem dioxinas, furanos, vapores de mercúrio e outros compostos ácidos (Figura 3.20).

Uma pergunta então deve ser feita: O quanto tem-se conseguido avançar no combate à poluição do ar? A redução da concentração atmosférica de chumbo tem sido drástica, devido à proibição de sua utilização como aditivo da gasolina em muitos países. A concentração de particulados e óxidos de enxofre nos EUA, em comparação com o nível correspondente ao ano de 1960, foi reduzida em 44 e 77 %, respectivamente (GOKLANY, 1998). Isto não pode ser a base de um excessivo otimismo ambiental, pois, enquanto nas cidades do terceiro mundo a situação ambiental é crítica, nos mesmos Estados Unidos a redução da concentração no ar de alguns poluentes, como o ozônio, é um problema ainda por resolver. Um indicador do desempenho ambiental de economias em crescimento poderia ser a relação emissões totais/produto nacional bruto (E/PNB).

Tabela 3.13 - Principais fontes de poluição e poluentes atmosféricos

Fonte	Particulados	Emissões gasosas
Caldeiras e fornos industriais	Cinzas e fuligem	NO _x , SO ₂ , CO, aldeídos, ácidos orgânicos, 3,4 - benzopireno.
Motores de combustão interna	Fuligem	CO, NO _x , aldeídos, hidrocarbonetos, 3,4 - benzopireno.
Indústria de refino do petróleo	Pó, fuligem	SO ₂ , H ₂ S, NH ₃ , NO _x , CO, hidrocarbonetos, mercaptanas, ácidos, aldeídos, cetonas, substâncias orgânicas cancerígenas.
Indústria química	Pó, fuligem	Dependente do processo (H ₂ S, CS ₂ , CO, NH ₃ , ácidos, substâncias orgânicas, solventes, compostos orgânicos voláteis (VOC), sulfetos, etc.).
Metalurgia e química do coque	Pó, óxidos de ferro	SO ₂ , CO, NH ₃ , NO _x , compostos de flúor, substâncias orgânicas.
Indústria extrativa mineral	Pó	Dependente do processo (CO, compostos de flúor, substâncias orgânicas).
Indústria alimentícia	Pó	NH ₃ , H ₂ S (misturas multicomponentes de compostos orgânicos).
Indústria de materiais da construção	Pó	CO, compostos orgânicos.

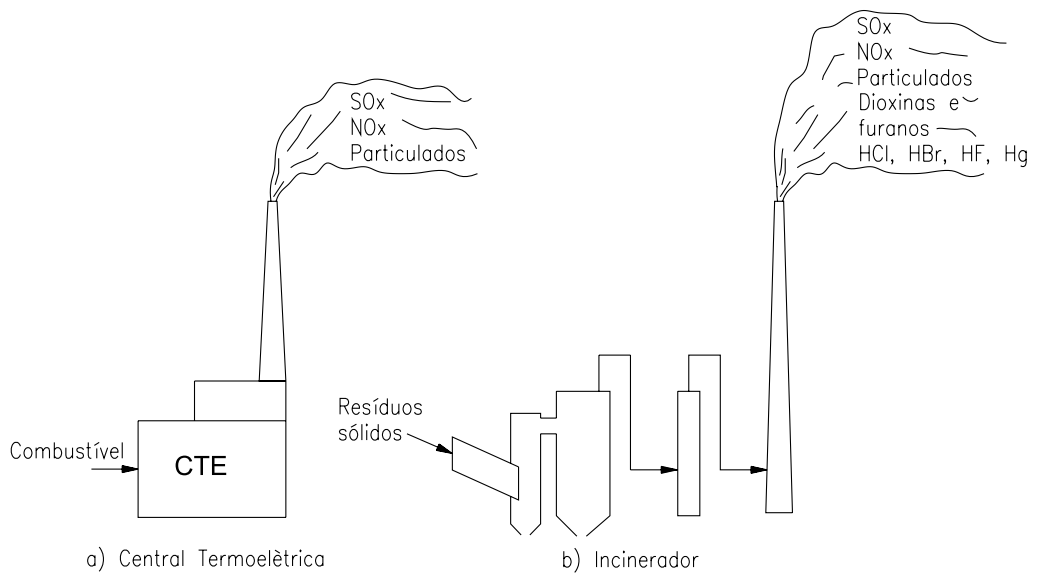


Figura 3.20 - Composição das emissões gasosas em centrais termelétricas e incineradores de resíduos

Até aqui, apenas foi feita uma explanação dos principais tipos de poluentes comumente encontrados nos processos industriais. Mas qual a maneira de se poder fazer um controle da poluição? A seguir será abordada a filosofia do controle da poluição. O controle da poluição do ar pode ser realizado através dos seguintes mecanismos (Figura 3.21):

- padrões de emissão;
- padrões de qualidade do ar;
- impostos ou taxas por emissão de poluentes;
- análise custo/benefício.

O controle da poluição, atendendo a padrões de emissão, é simples e de excelente execução, pois é relativamente fácil realizar a amostragem e a análise da composição dos gases em cada ponto de emissão. Porém, a eficiência econômica é baixa, já que exige investimentos para o controle da poluição de fontes pequenas ou localizadas longe dos centros urbanos, nos quais a situação ambiental é mais crítica.

A utilização dos padrões de qualidade do ar, para o controle da poluição, tem uma boa efetividade econômica, pois concentra o investimento dos recursos nas regiões em que a poluição do ar é mais crítica. Este método é complexo de ser aplicado porque é preciso determinar as fontes responsáveis pelas maiores emissões.

Atualmente, discute-se muito sobre as vantagens do controle da poluição por impostos ou taxas de emissão, também conhecido como “método de incentivos econômicos” ou do “poluidor / pagador”. Consiste em estabelecer uma taxa a ser paga por tonelada de diferentes poluentes lançados na atmosfera. Assim, o “poluidor” estaria supostamente obrigado, economicamente, a introduzir as tecnologias de controle de emissões disponíveis no mercado. As últimas emendas da Clean Air Act já consideram este método como prospectivo. Na França, este método é usado pelas Agências de Bacias no “controle” da poluição hídrica.

O método do custo/benefício considera a diminuição dos custos por danos, causados pela poluição ambiental, com o incremento dos custos de controle da mesma. Teoricamente, poderia se chegar a uma concentração dada do poluente, para a qual os custos por danos igualam-se aos custos devido à introdução de tecnologias de controle da poluição (Figura 3.22). Evidentemente que a quantificação dos custos por danos causados pela poluição é extremamente difícil. Como custo marginal de poluição entende-se o custo para a sociedade de cada unidade adicional de poluição (por exemplo 1 tonelada adicional de poluente). O custo provocado por unidade de poluição, geralmente é crescente e, sendo assim, a curva de custo marginal de poluição é exponencial. O custo marginal de controle da poluição é o custo adicional para a sociedade com a redução da poluição numa unidade. Geralmente este custo aumenta à medida que a poluição se reduz.

Após comentado sobre os mecanismos de controle da poluição, é feita uma caracterização de alguns dos principais poluentes provenientes dos mecanismos de combustão, a saber: compostos sulfurosos, compostos nitrogenados, material particulado e compostos orgânicos voláteis.

3.8.1. Compostos sulfurosos

As fontes naturais de compostos de enxofre são a degradação biológica, as emissões vulcânicas e os oceanos. Solos ricos em enxofre constituem também uma fonte natural de H_2S . As fontes antropogênicas mais importantes de geração de SO_2 são:

- a queima de combustíveis fósseis;
- a oxidação de minerais sulfurosos para a obtenção de cobre, chumbo e zinco. Por exemplo, a obtenção do cobre é feita como: $Cu_2S + O_2 \rightarrow Cu + SO_2$;
- os processos de refino do petróleo.

O SO_2 é um gás incolor com um odor irritante e azedo. É altamente solúvel em água (10,5 g/100 ml a 20°C), sendo esta propriedade a base dos sistemas de separação úmida do SO_x e da formação de ácido sulfúrico ao contato com água. O sulfeto de hidrogênio H_2S é altamente tóxico e com odor característico de ovos podres. É um composto instável, com um período de vida na atmosfera de aproximadamente 1 dia, convertendo-se em SO_2 . Também são fontes naturais de H_2S a degradação biológica anaeróbia, os vulcões e atividades geotérmicas.

3.8.2. Compostos nitrogenados

O NO_2 absorve a luz solar fundamentalmente na zona do espectro visível. Pode produzir uma névoa de cor amarela ou laranja. O N_2O é um gás incolor, emitido quase totalmente por fontes naturais (ação bacteriana no solo e reações na atmosfera superior). A queima de combustíveis sólidos é a maior fonte antropogênica de N_2O . A quantidade de N_2O formado é pequena em comparação com os óxidos de nitrogênio NO_x , sendo a relação entre eles de 0,01. A concentração de N_2O na atmosfera, no início da Revolução Industrial era de 285 ± 5 ppbv, atingindo valores de 310 ppbv, em 1990. A velocidade de incremento anual é de 0,5-1,1 ppbv/ano. Até alguns anos atrás o N_2O não era considerado um poluente. Recentemente detectou-se a sua participação:

- no controle dos níveis de ozônio na estratosfera;
- no efeito estufa;
- nos processos de formação da chuva ácida.

Os óxidos de nitrogênio NO_x são produzidos por fontes naturais, como os relâmpagos, a atividade microbiana no solo, a oxidação da amônia e os processos fotolíticos ou biológicos nos oceanos. A isto acrescentam-se fontes antropogênicas como a queima de combustíveis fósseis e de biomassa. Ao mesmo tempo, a fim de manter um balanço global, existem “sumidouros” de NO_x como as precipitações e a deposição seca.

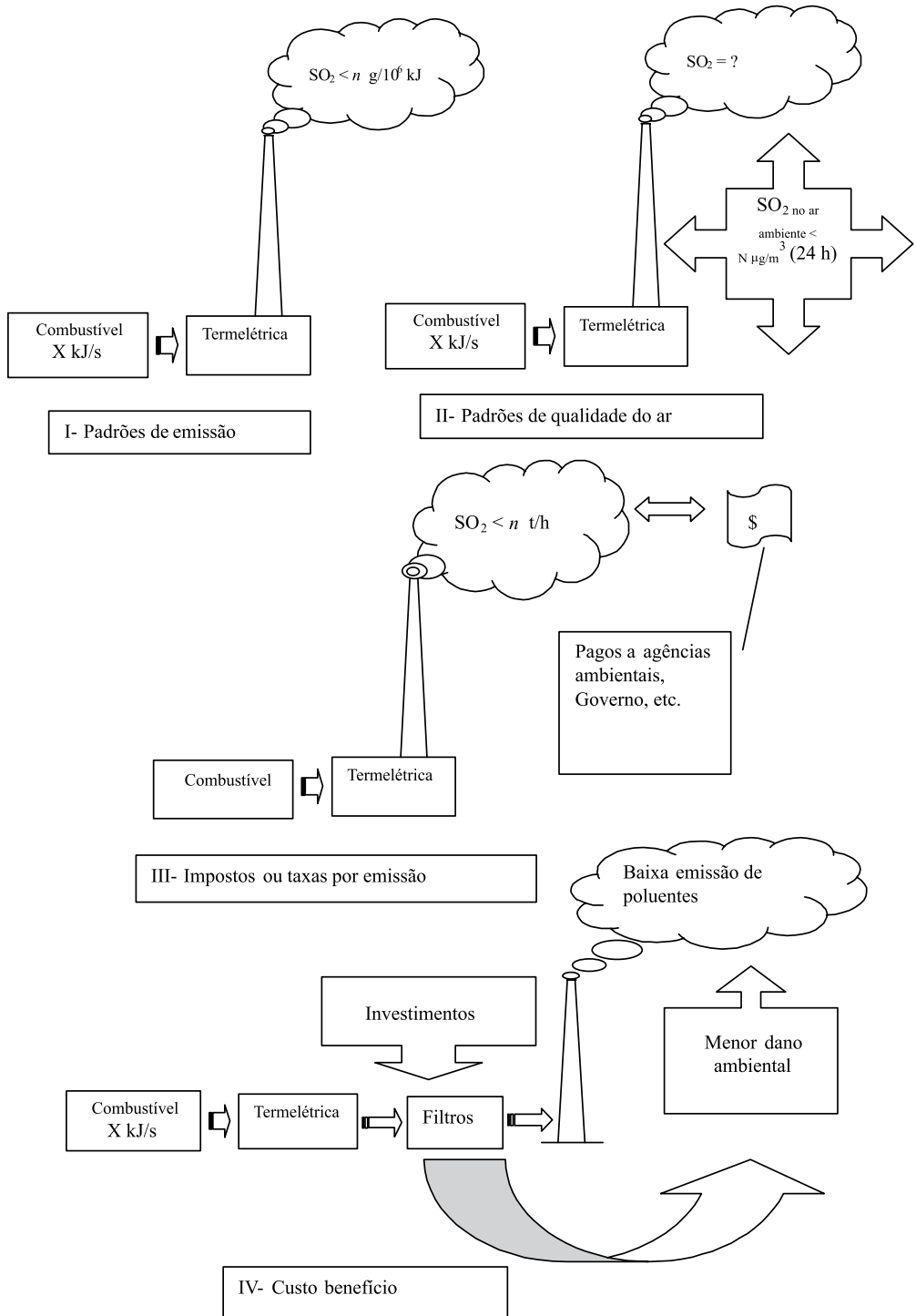


Figura 3.21 - Filosofias do controle da poluição do ar

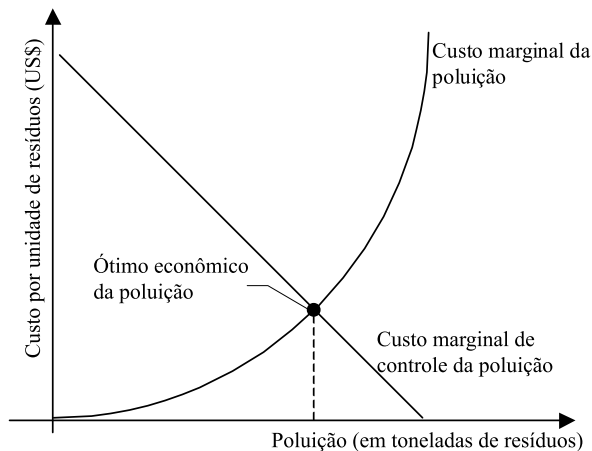


Figura 3.22 - Método do custo/benefício para o controle da poluição do ar

3.8.3. Material particulado

Considera-se como material particulado qualquer substância, com exceção da água pura, que existe como líquido ou sólido na atmosfera e tem dimensões microscópicas ou submicroscópicas, porém maiores que as dimensões moleculares. Os particulados presentes na atmosfera classificam-se em:

- Finos, com um diâmetro $d_p < 2,5 \mu\text{m}$;
- Grossos, com um diâmetro $d_p > 2,5 \mu\text{m}$.

Dependendo de sua origem, os particulados atmosféricos podem ser primários ou secundários. Neste último caso, os particulados originam-se na atmosfera, a partir de reações químicas na fase gasosa que geram compostos condensáveis. O tempo de residência dos particulados na atmosfera inferior é de alguns dias a uma semana. Os mecanismos de remoção dos mesmos são:

- sedimentação e impacto em superfícies;
- deposição úmida.

Dentro desta classe, um outro poluente que merece destaque é a matéria orgânica particulada. Constitui-se por compostos perigosos à saúde, especialmente os PAH (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), cujo efeito cancerígeno em animais é comprovado.

3.8.4. Compostos orgânicos voláteis - COVs

Os COVs são hidrocarbonetos do tipo aldeídos, cetonas, solventes clorados, substâncias refrigerantes, etc. (Tabela 3.14). A distribuição por fontes das emissões antropogênicas dos COVs é: processos industriais -46 % e transporte automotivo-30 %.

Tabela 3.14 - Alguns COVs identificados no ar ambiente

Família	Composto	Fórmula Química
Hidrocarbonetos	Metano	CH ₄
	Etano	C ₂ H ₆
	Propano	C ₃ H ₈
	Butano	C ₄ H ₁₀
	Pentano	C ₅ H ₁₂
	Hexano	C ₆ H ₁₄
	Benzeno	C ₆ H ₆
Halometanos	Clorofórmio	CHCl ₃
	Tetracloroeto de carbono	CCl ₄
Haloetanos	1, 2 Dicloroetano	CH ₂ Cl CH ₂ Cl
Halopropanos	1, 2 Dicloropropano	CH ₂ ClCHClCH ₃
Compostos nitrogenados e oxigenados	Peroxiacetilnitrato (PAN)	CH ₃ COONO ₂
	Formaldeídos	HCHO
	Clorofluorocarbonos	CFC-11, CFC-12

3.9. PADRÕES DE QUALIDADE DO AR E DE EMISSÃO

Antes de falar sobre padrões de qualidade do ar e fatores de emissão, é apresentada a Tabela 3.15, onde mostram-se dados sobre a concentração média de poluentes em uma atmosfera limpa e em uma contaminada. Pode-se notar que os valores correspondentes ao ar contaminado são bem maiores do que aqueles correspondentes ao ar limpo. Considerando este problema, organizações ambientais começaram a atentar para a padronização destas concentrações de poluentes na atmosfera, estabelecendo padrões de qualidade do ar.

Tabela 3.15 - Concentração média de poluentes no ar limpo e contaminado

Poluente	Concentração, ppm	
	Ar limpo	Ar contaminado
SO ₂	0,001 - 0,01	0,02 - 0,2
CO	0,12	1 - 10
NO	0,00001 - 0,00005	0,05 - 0,75
NO ₂	0,0001 - 0,0005	0,05 - 0,25
O ₃	0,02 - 0,08	0,1 - 0,5

Segundo Derisio (1992), “um padrão de qualidade do ar define, legalmente, um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico, que garanta a proteção da saúde e do bem-estar das pessoas”. Os padrões já estabelecidos baseiam-se em estudos sobre o efeito dos diferentes poluentes e prevêem uma margem de segurança.

Nos Estados Unidos, a EPA tem desenvolvido padrões de concentrações máximas de poluentes no ar ambiente e padrões de emissões máximas para novas fontes.

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, pela Resolução N° 3, de 28/06/90, estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar, com base na Portaria Normativa N° 348, de 14/03/90, do IBAMA (Tabela 3.16). Esta Resolução inclui as normas relativas a padrões primários e secundários. Os padrões primários podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de poluentes atmosféricos e, se ultrapassados, podem afetar a saúde da população. Os padrões secundários constituem os níveis desejados de concentração dos poluentes. O Estado de São Paulo tem os seus próprios padrões de qualidade do ar (Tabela 3.17).

O estado do Paraná, a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), através da Resolução N° 041/2002, Artigo 21, implementou os padrões de emissão atmosférica para fontes estacionárias em processos de geração de calor e energia, sendo que os valores foram subdivididos em função do combustível empregado, da tecnologia e da potência térmica, conforme Tabela 3.18. Para acessar a resolução na íntegra, consulte o site <http://www.pr.gov.br/sema>.

Tabela 3.16 - Padrões nacionais de qualidade do ar
(Resolução CONAMA N° 3, de 28/06/90, DERISIO, 1992)

Poluentes	Tempo de amostragem	Padrão primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Método de medição
Partículas totais em suspensão	24 horas (1)	240	150	Amostrador de grandes volumes
	MGA (2)	80	60	
Dióxido de enxofre	24 horas (1)	365	100	Parosanilina
	MAA (3)	80	40	
Monóxido de carbono	1 hora (1)	40.000 (35 ppm) 10.000 (9 ppm)	40.000 (35 ppm)	Infravermelho não dispersivo
	8 horas (1)		10.000 (9 ppm)	
Ozônio	1 hora (1)	160	160	Quimioluminescência
Fumaça	24 horas (1)	150	100	Refletância
	MAA (3)	60	40	
Partículas inaláveis	24 horas (1)	150	150	Separação inercial/ filtração
	MAA (3)	50	50	
Dióxido de nitrogênio	1 hora (1)	320	190	Quimioluminescência
	MAA (3)	100	100	

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano,

(2) Média geométrica anual,

(3) Média aritmética anual.

Tabela 3.17 - Padrões de qualidade do ar para o Estado de São Paulo
(Decreto Estadual N° 8.468, de 08/09/76, DERISIO, 1992)

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Método de medição
Partículas totais em suspensão	24 horas	240	Amostrados de grandes volumes
	MGA (2)	80	
Dióxido de enxofre	24 horas (1)	365	Parosanilina
	MAA (3)	80	
Monóxido de carbono	1 hora (1)	40.000	Infravermelho não dispersivo
	8 horas (1)	10.000	
Oxidantes fotoquímicos (como ozônio)	1 hora (1)	160	Quimioluminescência

Tabela 3.18- Padrões de emissão do Estado do Paraná (Resolução SEMA N° 041/2002)

Processo		Potência térmica	padrão para o NO _x	Ref. O ₂ (%)
Geração de calor ou energia em caldeiras e fornos utilizando combustível gasoso		50 e 100 MW > 100 MW	320 mg/Nm ³ 200 mg/Nm ³	3
Geração de calor ou energia em caldeiras e fornos utilizando óleo combustível e assemelhados		10 e 50 MW 50 e 100 MW > 100 MW	820 mg/Nm ³ 620 mg/Nm ³ 400 mg/Nm ³	3
Geração de calor ou energia utilizando carvão, xisto, coque e outros combustíveis assemelhados		10 e 50 MW 50 e 100 MW > 100 MW	500 mg/Nm ³ 500 mg/Nm ³ 400 mg/Nm ³	7
Geração de calor ou energia utilizando biomassa como combustível		10 e 50 MW 50 e 100 MW > 100 MW	500 mg/Nm ³ 500 mg/Nm ³ 400 mg/Nm ³	11
Turbinas a gás		até 10 MW 10 e 100 MW > 100 MW ^a > 100 MW ^b	350 mg/Nm ³ 300 mg/Nm ³ 125 mg/Nm ³ 165 mg/Nm ³	15
Motores	Ciclo Otto de 4 tempos Ciclo Otto de 2 tempos Ciclo Diesel	até 3 MW	500 mg/Nm ³ 800 mg/Nm ³ 800 mg/Nm ³	5
	Ciclo Otto de 4 tempos Ciclo Otto de 2 tempos Ciclo Diesel	> 3 MW	500 mg/Nm ³ 800 mg/Nm ³ 2000 mg/Nm ³	

^a Gás natural como combustível;

^b Diesel como combustível.

3.9.1. Fatores de emissão

De maneira semelhante ao explicado para os gases estufa, os fatores de emissão podem ser utilizados para uma avaliação preliminar das quantidades emitidas de outros poluentes, tais como óxidos de enxofre SO₂, óxidos de nitrogênio NO_x, parti-

culados, COVs, etc. A seguir são apresentados alguns exemplos de fatores de emissão para diferentes combustíveis e equipamentos energéticos (Tabelas 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22), assim como para o caso de uma atividade industrial, especificamente o refino de petróleo (Tabela 3.23). As unidades dos fatores de emissão são kg ou g de poluente por tonelada, m³ ou litro de combustível. No caso de uma indústria, o fator de emissão geralmente refere-se à unidade de massa de produto ou de matéria-prima.

Tabela 3.19 - Fatores de emissão de SO₂, NO_x e CO para diferentes combustíveis fósseis (combustão não controlada) /EPA, 1996

Combustível e tecnologia de combustão	Unidades	SO ₂	NO _x	CO
Óleo combustível No 5: queima convencional - frontal	kg/10 ³ l	18,84S	8,04	0,6
Óleo combustível No 5: queima tangencial	kg/10 ³ l	18,84S	5,04	0,6
Diesel: caldeiras industriais	kg/10 ³ l	17,04S	2,4	0,6
Gás natural: caldeiras de grande capacidade / queima frontal	kg/10 ⁶ m ³	-	4480	1344
Gás natural: caldeiras de grande capacidade / queima tangencial	kg/10 ⁶ m ³	-	2720	384
Carvão betuminoso: cald. grande capacidade / queima frontal	kg/ton	19S	6	0,25
Carvão betuminoso: cald. grande capacidade / queima tangencial	kg/ton	19S	5	0,25
Carvão betuminoso: caldeira spreader stocker	kg/ton	19S	5,5	2,5
Resíduos de madeira: caldeira spreader stocker	kg/ton	0,0375	0,75	6,8
Resíduos de madeira: caldeira de leito fluidizado	kg/ton	0,0375	1,0	0,7
Bagaço de cana	kg/ton	-	1,2	-

Tabela 3.20 - Fatores de emissão de material particulado (PHILLIPS et al., 1998)

Combustível	Tecnologia de combustão	Fator de emissão
Óleo combustível	Caldeiras de CTE	1,25 kg/10 ³ l
Óleo combustível	Caldeiras industriais	0,24 kg/10 ³ l
Gás natural	Caldeiras de CTE	16-80 kg/10 ⁶ m ³
Gás natural	Caldeiras industriais	16-80 kg/10 ⁶ m ³
Gás natural	Caldeiras domésticas e comerciais	16-80 kg/10 ⁶ m ³
Motores Diesel industriais	-	4,01 kg/10 ³ l
Bagaço de cana	Caldeiras spreader - stocker	7,1 kg/ton

Tabela 3.21- Emissões provocadas por sistemas de geração de energia termelétrica convencionais (Bluestein, 2001)

Tecnologia	Combustível	Método de Controle ^a	NO _x (g/GJ)	SO _x (g/GJ)	CO ₂ (x10 ³ g/GJ)	MP (g/GJ)
Ciclo Combinado (Sem combustão suplementar)	Gás Natural	Nenhum	86,1	0,3	56,7	2,9
		SCR	3,4	0,3	56,7	2,9
		DLN	0,49-1,23	0,3	56,7	2,9
Motor de Combustão Interna	Diesel ^c	Nenhum	1043,7	173,9	68,6	37,3
		SCR	41,8	173,9	68,6	37,3
		FGD	1043,7	3,5	68,6	37,3
		ESP	1043,7	173,9	68,6	0,3
		SCR/ESP	41,8	173,9	68,6	0,3
Turbina a Gás	Gás Natural	Nenhum	53,4	0,3	58,1	3,2
		SCR	3,4	0,3	58,1	3,2
		DLN	0,49-1,23	0,3	58,1	3,2
Ciclo a Vapor	Carvão ^b	Nenhum	528,7	913,3	2.113,6	55,3
		LNB	264,4	913,3	2.113,6	55,3
		ESP	528,7	913,3	2.113,6	0,4
		FGD	528,7	18,3	2.113,6	55,3
		LNB/ESP/FGD	528,7	18,3	2.113,6	0,4

^a eficiências típicas dos métodos de controle utilizados: SCR=96%; LNB=50%; ESP=99,2%, FGD=98%

^b Carvão CE 4500 (Santa Catarina)

^c Diesel Padrão Internacional

3.10. CONTROLE DE EMISSÕES DE POLUENTES DURANTE A CONVERSÃO ENERGÉTICA

Conforme já mencionado, a produção de energia através de combustíveis fósseis, os processos industriais e o meios transporte apresentam grande influência sobre o meio ambiente e são considerados as principais fontes antropogênicas da poluição. Neste item, serão abordados os principais tipos de controle de poluentes utilizados para as emissões veiculares e para as termelétricas.

Tabela 3.22 - Fatores de emissão de COV (EDWARDS et al., 1986)

Atividade	Fator de emissão
Veículos a Diesel	5 kg/ton de Diesel
Indústria de petróleo	0,04% do petróleo cru
Solventes	85% da quantidade consumida (ton)
Produção de gás natural	3,1 g/m ³
Carvão (Centrais termelétricas)	0,15 kg/ton
Carvão (indústria)	0,7 kg/ton
Florestas	30 µg/m ² .minuto de terpenos
Pastagens	2,7 µg/m ² .minuto de terpenos

Tabela 3.23 - Fatores médios de emissão de poluentes gasosos para refinaria de petróleo (WORLD BANK, 1997)

Poluentes	Fator de emissão
Particulados	0,8 kg / ton de petróleo cru (0,1 - 3,0 kg)
SO _x	1,3 kg / ton de petróleo cru (0,2 - 6,0 e 0,1 com a recuperação do enxofre pelo processo Claus)
NO _x	0,3 kg / ton de petróleo cru (0,06 - 0,5 kg)
BTX (Benzeno, tolueno e xileno)	2,5 g / ton de petróleo cru (0,75 - 6,0 kg)
COV	1 kg / ton de petróleo cru (0,5 - 6,0 kg)

3.10.1. Emissões veiculares

Antes de começar a análise das emissões em motores de combustão interna, é im-

portante estabelecer as diferenças mais significativas entre os motores a gasolina (de ignição) e a Diesel (de compressão), as quais determinam a composição dos gases de escape.

Enquanto que nos MCI convencionais, a gasolina, a ignição se processa por uma faísca elétrica, nos Diesel a ignição do combustível é espontânea ao se misturar com ar quente. Os motores a gasolina geralmente trabalham com relações de pressão na faixa de 7 - 10 e os Diesel entre 16 - 20. No que diz respeito à relação ar/combustível, os motores a gasolina apresentam uma relação praticamente constante e perto do valor estequiométrico, ao contrário dos Diesel, que apresentam uma relação extremamente variável, geralmente uma mistura pobre. E, finalmente, analisando as emissões (sem tratamento) de cada tipo de MCI, pode-se constatar que aqueles que utilizam gasolina apresentam altas taxas de emissões de CO e HC ao contrário daqueles que utilizam Diesel, que apresentam baixas taxas de emissão destes poluentes, porém, apresentam emissão de particulados consideráveis (Tabela 3.24).

Tabela 3.24 - Comparação das emissões de um MCI operando com gasolina e Diesel (ACRES, 1992)

	CO, %	C _x H _y , ppm	NO _x , ppm	SO _x , ppm	Particulados, g/m ³
Diesel	0,1	300	4000	200	0,5
Gasolina	10,0	1000	4000	60	0,01

Os motores de combustão interna automotivos produzem mais poluentes por unidade de combustível queimado que as instalações energéticas estacionárias. As causas deste comportamento são as seguintes:

- freqüentemente funcionam com deficiência de oxigênio;
- ocorre uma combustão não estacionária (cada chama tem uma duração de 0,0025 s);
- a chama tem contato com superfícies resfriadas.

Os fatores que determinam o tipo e a quantidade de poluentes nos gases de escape de um motor de combustão interna são:

- relação ar/combustível;
- sincronização da faísca (timing);
- geometria da câmara de combustão;
- velocidade do motor;
- tipo de combustível.

As formas de diminuição das emissões de HC, CO e NO_x num MCI são as seguintes:

- Modificações na operação (relação ar/combustível e sincronização da ignição);
- Modificações no projeto do motor;
- Reformulação do combustível (substituição da gasolina por gás natural, álcool, etc.);
- Tratamento dos gases de escape com filtros (conversores catalíticos).

Na prática, é necessário estabelecer programas de inspeção e manutenção a fim de identificar e reparar os veículos que não cumprem as normas de emissão estabelecidas. Uma das medidas que tem sido empregadas para diminuir o impacto das emissões veiculares é o estabelecimento de normas de emissão para veículos novos. As primeiras regulamentações neste sentido começaram na Califórnia, em 1963. No Brasil, foi estabelecido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), em 1986, um programa para o controle das emissões veiculares denominado PROCONVE.

3.10.1.1. Emissões em motores a gasolina

As emissões em motores a gasolina geralmente são atribuídas aos gases de escape e aos vapores de ar e combustíveis desprendidos ao ar ambiente, conforme agrupadas na Tabela 3.25 a seguir. Também é apresentada a forma de controle destas emissões.

Tabela 3.25 - Tipos de emissões de motores a gasolina: causa e controle

Tipo de emissão	Causa	Controle
De escape	Emissões de hidrocarbonetos com os gases de escape	- conversores catalíticos oxidante: oxidam HC e CO; - conversores catalíticos de três vias: oxidam os HC e o CO e reduzem o NO _x .
Evaporativa - cárter do motor	Vazamento de gases através dos selos do cilindro do motor durante o estágio de compressão	O controle é realizado recirculando o escape de gás do cárter para a entrada de ar do motor para ser queimado nos cilindros.
Evaporativa - tanque de combustível e carburador	- evaporação da mistura ar e vapores por causa do aquecimento diurno; - emissões durante a movimentação do veículo; - vazamentos durante o enchimento do tanque.	Tem sido controladas por meio de recipientes com carvão vegetal que absorvem os vapores de gasolina, enviando-os depois para o motor para a sua combustão.

3.10.1.2. Emissões em motores Diesel

Os particulados constituem o poluente mais importante a ser considerado em programas de redução de emissões em motores Diesel. Os maiores problemas ocasionados à saúde humana pelas emissões dos motores Diesel são o potencial cancerígeno dos particulados respiráveis, devido a dois componentes principais: as partículas sólidas de carvão e os compostos orgânicos absorvidos nelas.

Atualmente, não é comum em motores Diesel a utilização de dispositivos de controle externo. Trabalha-se no desenvolvimento de filtros para a remoção de particulados dos gases. O problema mais sério, neste sentido, é a granulometria das partículas e sua baixa densidade. O sistema de controle, geralmente, utiliza-se de um filtro para capturar as partículas, necessitando ser regenerado periodicamente a fim de evitar que fique obstruído. Outras possibilidades para a diminuição do teor de poluentes nos gases de escape dos motores Diesel estão no projeto do motor (sistema de combustão e lubrificação) e na utilização da recirculação de gases.

Em relação à lubrificação, a maior fonte de emissão de particulados está no consumo de óleo lubrificante pela parede do cilindro e pelas válvulas de escape do motor. Entre as medidas futuras para se diminuir essas emissões está o desenvolvimento de óleos lubrificantes com propriedades especiais.

Com o objetivo de diminuir as emissões de NO_x , os fabricantes europeus utilizam amplamente a recirculação de gases. Também estão em desenvolvimento catalisadores para a diminuição da concentração de HC, CO, NO_x e particulados nos gases de combustão de motores Diesel.

3.10.2. Emissões em termelétricas

Em se tratando de emissões em termelétricas, os principais poluentes são CO_2 , NO_x , SO_x , C_xH_y e particulados (Figura 3.23), cujas emissões estão diretamente relacionadas com a qualidade e tipo de combustível empregado. Uma comparação das emissões específicas geradas pelas diferentes tecnologias empregadas nas centrais térmicas, são apresentadas na Figura 3.24. A seguir, será apresentada uma breve explicação sobre a formação de cada um dos poluentes bem como sobre alguns métodos de controle.

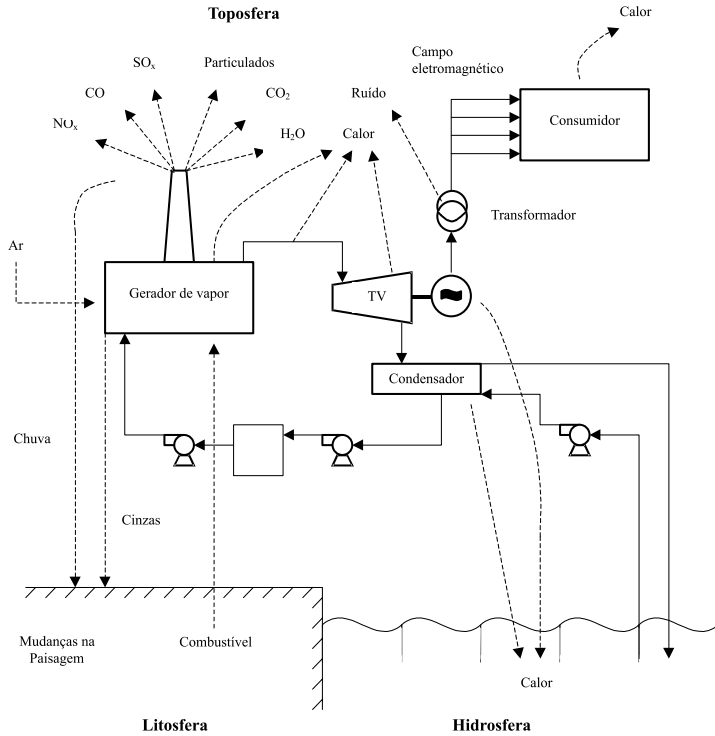


Figura 3.23 - Impactos ambientais das centrais termelétricas

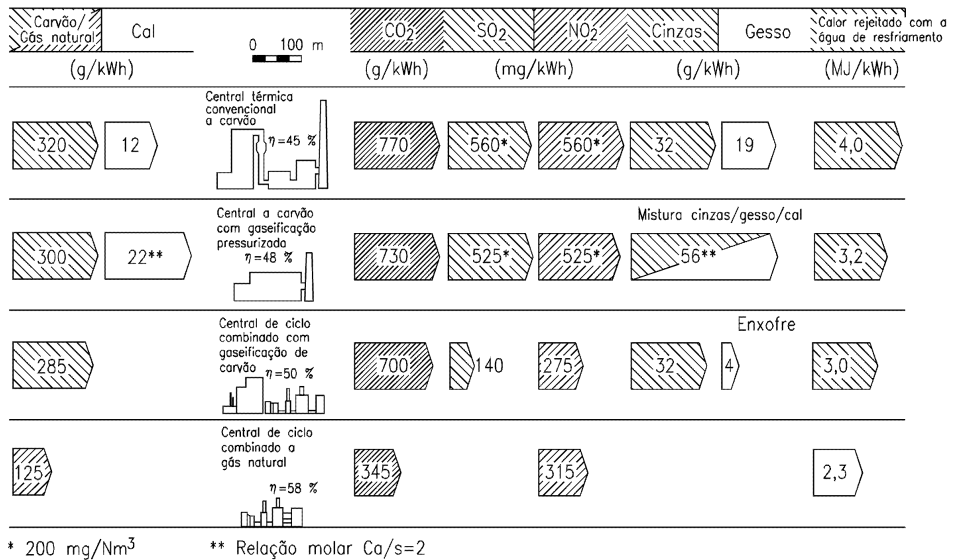


Figura 3.24 - Emissões específicas das centrais termelétricas

3.10.2.1. Métodos de controle de óxidos de nitrogênio

No século XIX, foi descoberta a presença de NO_x nos produtos de queima de combustíveis orgânicos. No final dos anos 50 começaram investigações sistemáticas dos processos físico-químicos de geração de NO_x em fornalhas de caldeiras, motores de combustão interna e fornalhas industriais.

Durante a queima de combustíveis orgânicos em fornalhas de geradores de vapor, forma-se principalmente NO. Os óxidos de nitrogênio podem se formar a partir do nitrogênio do combustível e a partir do nitrogênio do ar. De acordo com o mecanismo de formação, podem ser classificados como mostrado na Figura 3.25.

A importância relativa dos diferentes mecanismos de formação dos óxidos de nitrogênio depende dos seguintes fatores:

- temperatura no núcleo da chama;
- conteúdo de nitrogênio no combustível;
- parâmetros do processo na fornalha (excesso de ar).

É importante conhecer os mecanismos de formação dos óxidos de nitrogênio para se estabelecerem as tecnologias de controle das emissões. Dessa forma, será primeiro apresentada a formação deste poluente a partir do nitrogênio do ar, e em seguida, a partir do nitrogênio do combustível.

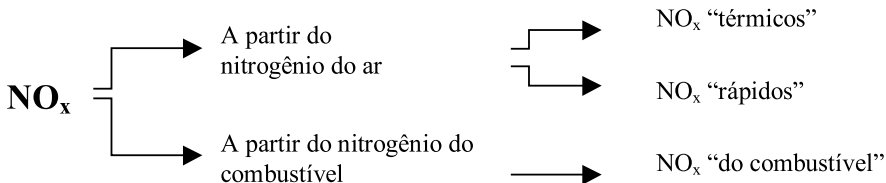


Figura 3.25 - Classificação dos óxidos de nitrogênio de acordo com o mecanismo de sua formação

Formação dos óxidos de nitrogênio “térmicos”: A reação do nitrogênio atmosférico com o oxigênio livre durante a combustão é, na realidade, uma reação em cadeia. Porém, a seguinte equação descreve bem a cinética formal deste processo (análise dos cientistas russos Zeldovich, Ya.B. e Frank-Kamenetsky, D.A.):



A velocidade desta reação reversível é calculada como:

$$\frac{dC_{NO}}{d\tau} = K_1 \cdot C_{N_2} \cdot C_{O_2} - K_2 [C_{NO}]^2 \quad (3.1)$$

onde: C_{N_2} , C_{O_2} e C_{NO} - concentrações dos compostos reagentes N_2 , O_2 e NO .

As constantes das reações direta e inversa K_1 e K_2 são calculadas pelas equações: $K_1 = 6 \times 10^6 \exp[-E_1 / (RT)]$; $K_2 = 3 \times 10^6 \exp[-E_2 / RT]$. A energia de ativação E assume os seguintes valores: $E_1 = 542 \text{ kJ/mol}$, $E_2 = 360 \text{ kJ/mol}$ (em trabalhos mais recentes, $E_1 = 565 \text{ kJ/mol}$ e $E_2 = 385 \text{ kJ/mol}$).

Como resultado, obtém-se uma equação para o cálculo da concentração de equilíbrio dos óxidos de nitrogênio, formados pelo mecanismo térmico (trabalho clássico de ZELDOVICH et al., 1947):

$$[C_{NO}] = 4,6 \cdot \sqrt{C_{O_2} \cdot C_{N_2} \cdot \exp[-21500/(RT)]} \quad (3.2)$$

Na Tabela 3.26 apresentam-se os resultados dos cálculos da concentração de equilíbrio de NO para diferentes temperaturas (SIGAL, 1998).

Tabela 3.26 - Dependência entre a concentração de equilíbrio de NO [C_{NO}] e a temperatura na zona de reação (SIGAL, 1998)

Temperatura, K	300	700	800	1800	2500
Concentração de equilíbrio [C_{NO}], mg/m ³	0,00127	0,38	2,54	4700	31700

De acordo com a equação 3.2 e com a tabela anterior, pode-se concluir que a concentração dos óxidos de nitrogênio "térmicos" cresce linearmente com o acréscimo da concentração de oxigênio atômico e exponencialmente com a temperatura.

Formação dos óxidos de nitrogênio "rápidos": Foram descobertos pelo cientista norte-americano FENNIMORE, em 1971, e chamados de óxidos de nitrogênio "rápidos" devido à velocidade de sua formação na zona da frente da chama ser muito alta. O mecanismo de formação é o seguinte:



As características fundamentais da oxidação rápida são:

- Duração breve do processo: a zona de formação de NO está localizada numa seção pequena da frente da chama;
- Dependência fraca entre a emissão de NO e a temperatura;

- Forte dependência da emissão de NO com a relação ar/combustível;
- A emissão de NO_x "rápidos", durante a combustão de gás natural, é de 100 - 120 mg/m³; Segundo outros autores este valor atinge somente 75 mg/m³.

A emissão de óxidos de nitrogênio pode ser controlada atuando-se sobre os fatores que determinam a sua formação, em particular sobre a temperatura máxima na fornalha T_{max} e sobre a concentração de oxigênio nesta região.

Formação dos óxidos de nitrogênio do combustível: A influência dos NO_x do combustível sobre a emissão total de óxidos de nitrogênio é mais forte durante a combustão a temperaturas relativamente baixas (T_{max} < 1500°C). A emissão dos NO_x do combustível aumenta rapidamente com o incremento do excesso de ar e depende pouco da temperatura do processo. O grau de transformação dos compostos nitrogenados do combustível em NO_x diminui com o aumento da concentração de nitrogênio no combustível (Tabela 3.27).

Tabela 3.27 - Conteúdo de nitrogênio em diferentes combustíveis

Combustível	N _{comb} , % (em massa)
Óleo combustível	0,30 - 0,50
Xistos betuminosos	0,14 - 0,50
Diesel	0,007 - 0,01
Carvão mineral	até 2,7 %
Bagaço de cana	0,245a

^a Valor médio de diferentes fontes (SILVA e OLIVARES, 1995).

Os óxidos de nitrogênio do combustível começam a se formar por volta de 900 - 1000 K e a 1600 K podem constituir cerca de 70% da emissão total de NO_x.

Sintetizando, existem dois métodos de controle de óxidos de nitrogênio: métodos pré-combustão (preventivos) ou métodos pós-combustão (corretivos) conforme podem ser observados na Tabela 3.28. Analisando-se estes métodos, pode-se concluir que as principais precauções a serem tomadas referem-se ao controle da temperatura na fornalha e da relação ar/combustível (excesso de ar).

Na prática, utilizam-se vários destes métodos simultaneamente, pois a eficiência global de redução dos óxidos de nitrogênio para os métodos pré-combustão possui, geralmente, a propriedade de aditividade. Assim, por exemplo, em caldeiras modernas pode-se utilizar simultaneamente os queimadores com baixa emissão de NO_x, a combustão por etapas e a redução catalítica seletiva.

Tabela 3.28 - Classificação dos métodos de controle das emissões de óxidos de nitrogênio

Tipo	Denominação	Fundamentação
Métodos pré-combustão (preventivos).	Recirculação dos produtos da combustão.	Diminuição da temperatura e concentração de oxigênio no núcleo da chama.
	Combustão por etapas.	"
	Queimadores com baixa emissão de NO _x (LNB).	"
	Injeção de água e vapor.	"
	Combustão em leito fluidizado.	Temperaturas de combustão menores que em sistemas convencionais para combustíveis sólidos pulverizados.
	Requeima ou OFA – Overfire Air	Reação entre hidrocarbonetos e NO _x .
Métodos pós-combustão (corretivos).	Redução seletiva não catalítica (SNCR).	Redução do NO _x até N ₂ por injeção de amônia sem a utilização de catalisadores.
	Redução catalítica seletiva (SCR).	Redução do NO _x até N ₂ por injeção de amônia com a utilização de catalisadores.
	Injeção de ozônio	Formação de N ₂ O ₃ , solúvel em água e removível num scrubber.

3.10.2.2. Métodos de controle de óxidos de enxofre

Existe um grande número de métodos para a dessulfurização de produtos da combustão, ou seja, para o controle dos óxidos de enxofre. Dentre os mais difundidos estão o dessulfurização por calcáreo e por cal hidratada.

O método de dessulfurização por calcário é o mais utilizado na atualidade. Além de atender altas eficiências de remoção dos óxidos de enxofre (até 98%), apresenta também melhores indicadores econômicos. A dessulfurização com cal é mais efetiva, porém é mais cara.

Uma classificação dos sistemas de dessulfurização com calcário é descrita a seguir, e na Tabela 3.29 apresenta-se uma guia de aplicação para os diferentes tipos de dessulfurizadores.

Processo de injeção a seco: o adsorvente seco é injetado no fluxo de produtos de combustão e separado, logo após a dessulfurização, num separador de particulados. Os óxidos de enxofre são absorvidos no ponto de injeção e durante a separação dos particulados no filtro de mangas. Eficiências de remoção de 50 - 70% são características destes sistemas. Porém, com a utilização do bicarbonato de sódio como reagente, a eficiência pode chegar até 70 - 90% (MAKANSI, 1991);

Processo com secador spray: a lama ou solução alcalina é nebulizada nos produtos de combustão no secador spray. As gotículas absorvem o SO₂ e outros gases ácidos, evaporando-se finalmente. As partículas sólidas são separadas num filtro de mangas ou precipitador eletrostático. A eficiência de remoção de SO₂ nestes sistemas é de aproximadamente 90% (MAKANSI, 1991);

Processo úmido: os produtos da combustão entram no absorvedor e ascendem através da zona de absorção, onde têm contato com a polpa ou solução de absorvente que movimenta-se à contracorrente. O gás passa por um separador de umidade e já sai limpo do absorvedor. Os projetos de dessulfurização úmida prevêm eficiências de separação maiores que 95% (MAKANSI, 1991). Outros sistemas de dessulfurização da recente aplicação comercial são o sistema com solução da amônia, que tem como produto final o sulfato de amônia (fertilizante) e a dessulfurização por um solvente a base de diaminas (processo Cansolv), que é regenerado e retorna ao processo.

Tabela 3.29 - Guia de aplicação dos diferentes tipos de dessulfurizadores (recomendação da Wheelabrator Air Pollution Control)

Sistema de injeção a seco	Sistema de secador spray	Sistema úmido
<ul style="list-style-type: none"> • Projetos pequenos e médios para o aproveitamento de resíduos sólidos municipais; • Tratamento de emissões de fornos de produção de coque metalúrgico; • Projetos de calcinação de óxidos de alumínio; • Controle de emissões secundárias não ferrosas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Projetos médios e grandes para o aproveitamento de resíduos sólidos municipais; • Incineração de resíduos perigosos; • Caldeiras industriais e energéticas para a combustão de carvão mineral. 	<ul style="list-style-type: none"> • Caldeiras energéticas para a combustão de carvão mineral; • Projetos de grande escala para o aproveitamento de resíduos sólidos perigosos e municipais

3.10.2.3. *Processos multicomponentes*

Além dos processos convencionais de remoção de óxidos de nitrogênio e enxofre, existem outros capazes de remover simultaneamente ambos os compostos. Eles encontram-se na etapa de planta piloto ou demonstrativa. Entre os de maior sucesso temos: Processo SNO_x e Processo SNRB.

3.10.2.4. *Combustão em leito fluidizado*

A combustão em leito fluidizado é considerada a tecnologia de combustão com menor impacto ambiental, e constitui a base das chamadas “tecnologias limpas” para a utilização energética do carvão mineral.

As principais vantagens da combustão de carvão em leito fluidizado são:

- flexibilidade de operação com diferentes tipos de carvões, com alto teor de enxofre e cinzas;
- possibilidade de realizar a dessulfurização por adição de calcário ao leito;
- baixa emissão de óxidos de nitrogênio devido à menor temperatura de combustão que em caldeiras convencionais;
- utilização de combustível com uma granulometria relativamente grossa e, em consequência, menores gastos durante a preparação do mesmo;
- possibilidade de realizar a combustão conjunta do carvão mineral com biomassa e resíduos sólidos urbanos.

Nos anos 80 e 90, a combustão de carvão mineral em leito fluidizado alcançou maturidade tecnológica e uma sólida posição no mercado. Em geral, estes sistemas classificam-se como leito convencional (borbulhante) e leito circulante, sub-classificando-se em atmosféricos e pressurizados.

3.10.2.5. *Métodos de controle de particulados*

Os equipamentos mais utilizados para o controle de particulados são:

- separadores ciclônicos;
- separadores úmidos (lavadores de gás ou scrubbers);
- filtros (precipitadores) eletrostáticos;
- filtros de manga.

Na indústria e em outras atividades humanas ocorrem emissões de particulados de diferentes características (dimensões e densidade das partículas, concentração, etc.). As dimensões das partículas constituem o parâmetro mais importante para definir o tipo de separador que é possível utilizar com alta eficiência. A Figura 3.26 apresenta uma relação entre as dimensões das partículas e a faixa típica de utilização de cada um dos equipamentos de controle de particulados descritos anteriormente. O efeito de separação dos particulados do fluxo de gás deve-se à ação de diferentes forças que garantem a deposição das partículas sobre uma superfície determinada (Tabela 3.30). Durante a seleção de um separador de particulados deve-se considerar:

- eficiência;
- consumo de energia;
- custo do investimento;
- natureza física e química dos particulados;
- periculosidade (incêndios e explosões).

Vejamos, no exemplo geral de um separador de particulados (Figura 3.25), como se definem os conceitos de eficiência integral (ou global) e de eficiência por frações. A simbologia utilizada na Figura 3.25 foi a seguinte:

- c - massa (concentração) de particulados por unidade de volume do gás, g/m^3 ;
- Q - vazão de gás, m^3/s ;
- Y - taxa mássica de emissão de particulados, g/s ;
- C - taxa mássica de particulados removidos, g/s .

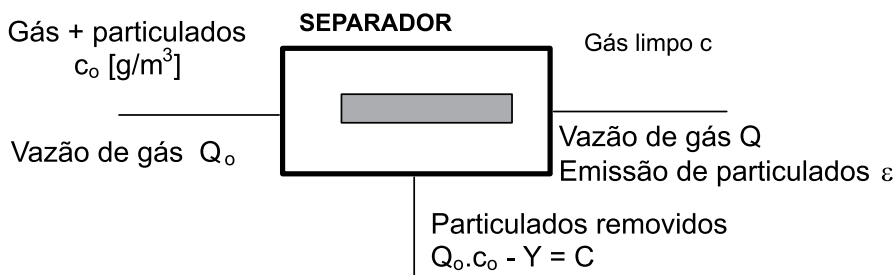


Figura 3.25 - Esquema geral de um separador de particulados

O conceito de eficiência total seria:

$$E = \frac{c_0 - c}{c_0} = \frac{Q_0 \cdot c_0 - \varepsilon}{Q_0 \cdot c_0} = 1 - \frac{\varepsilon}{Q_0 \cdot c_0}$$

A eficiência total pode ser calculada também a partir da eficiência por frações como:

$$E = \sum_{i=1}^n E_{fi} \Delta f_i$$

sendo:

E_{fi} - Eficiência por frações - eficiência de separação das partículas com diâmetro d_{pi} ;

Δf_i - Fração em massa de particulados de diâmetro d_{pi} .

A eficiência por frações para diferentes separadores de partículas é variada. Assim, um ciclone convencional, para partículas de 20 μ m, apresenta uma eficiência de 60%, já para um ciclone de alta eficiência com este mesmo diâmetro de partícula a eficiência seria superior aos 90%. Iguais eficiências alcança um lavador de gás, tipo Venturi, para partículas de 1 μ m. A Figura 3.27 apresenta curvas de eficiência por frações para alguns tipos de separadores.

STAIRMAND (1970) apresenta a eficiência total de diferentes separadores para três tipos de pó standard: superfino, fino e grosso. A granulometria destes pós e a eficiência total são apresentadas nas Tabelas 3.31 e a 3.32, respectivamente.

A obtenção de uma eficiência de separação maior sempre está acompanhada de maiores custos de tratamento do gás. Segundo o próprio STAIRMAND (1970), o custo de tratamento de 1 m³ de gás num precipitador eletrostático e num lavador tipo Venturi de alta energia é 4 e 7,5 vezes maior, respectivamente, que num ciclone convencional.

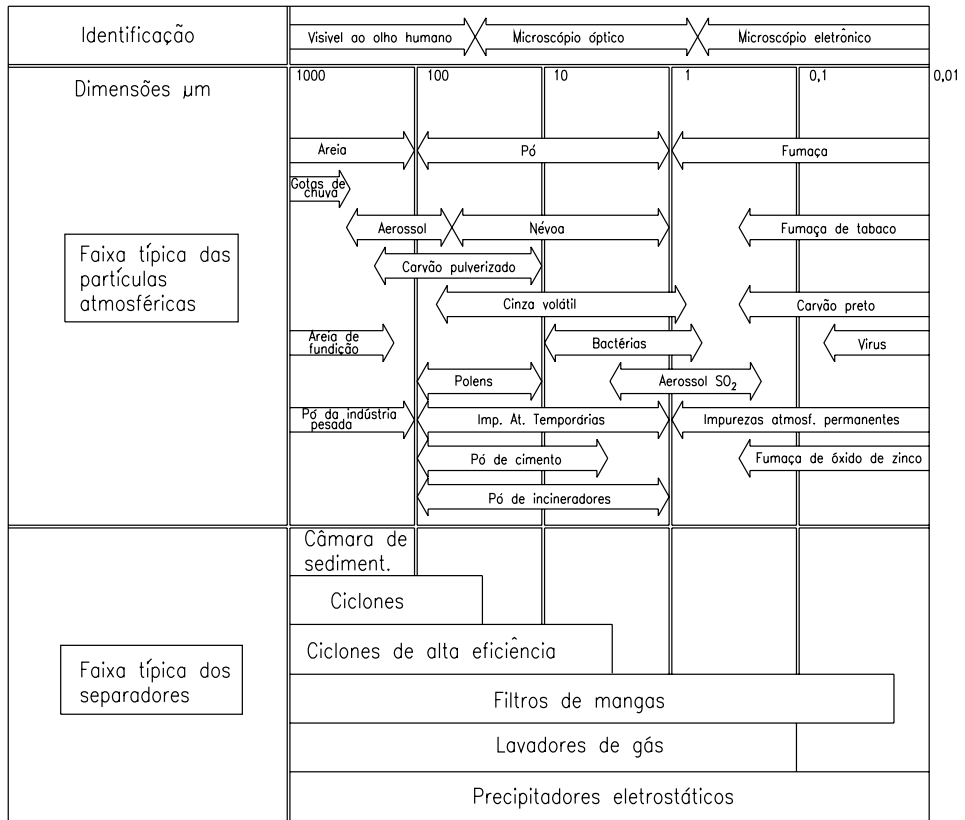


Figura 3.26 - Relação entre separadores de partículas e dimensões das mesmas (Cortesia da Lodge Sturtevant Ltda)

Tabela 3.30 - Forças atuantes e superfícies de separação em diferentes separadores de partículas

Separador	Forças principais de separação	Superfícies de separação
Separador ciclônico	Centrífuga	Cilíndrica
Filtro eletrostático	Eletrostática	Plana ou cilíndrica
Filtro de mangas	Intercepção direta	Cilíndrica composta de um material têxtil e "cake" de partículas
Lavador de gás (scrubber)	Inercial Difusional Intercepção direta	Esférica ou irregular

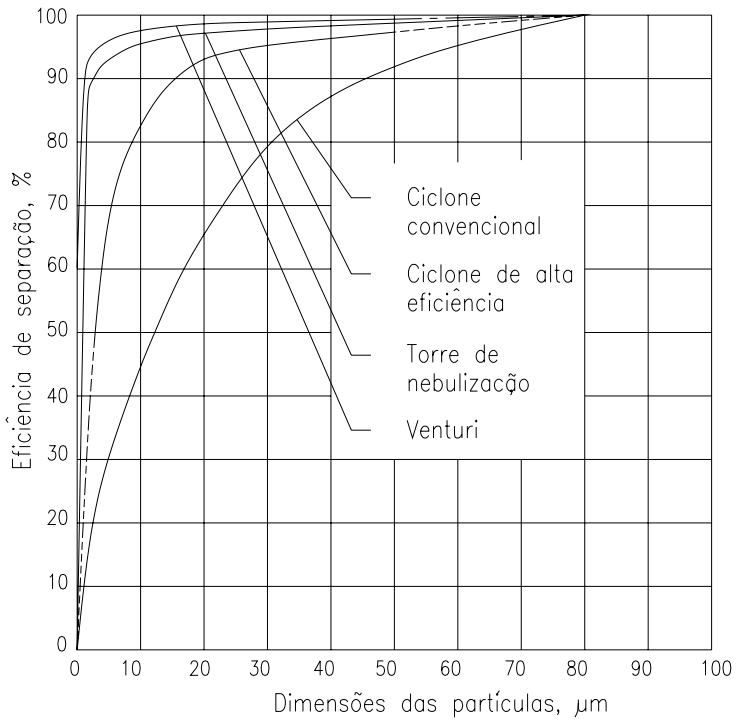


Figura 3.27 - Curvas de eficiência por frações para diferentes separadores de partículas

Tabela 3.31 - Composição granulométrica de pós standard (STAIRMAND, 1970)

Dimensões das partículas, μm	Fração em peso com dimensões menores que a indicada, %		
	Pó superfino	Pó fino	Pó grosso
150	-	100	-
104	-	97	-
75	100	90	46
60	99	80	40
40	97	65	32
30	96	55	27
20	95	45	21
10	90	30	12
7,5	85	26	9
5,0	75	20	6
2,5	56	12	3

Tabela 3.32 - Eficiência total de diferentes separadores para os pós standard (STAIR-MAND, 1970)

Tipo de separador	Eficiência total, %		
	Pó grosso	Pó fino	Pó superfino
Ciclone convencional	84,6	65,3	22,4
Ciclones de alta eficiência.	93,9	84,2	52,3
Lavador tipo Venturi de média energia	99,94	99,8	99,3
Lavador tipo Venturi de alta energia	99,97	99,9	99,6
Filtro de mangas com limpeza por sacudimento mecânico	99,97	99,92	99,6
Filtro de mangas com limpeza por pulso-jet inverso	99,98	99,95	99,8
Precipitador eletrostático	99,5	98,5	94,8

As Tabelas 3.33 e 3.34 (HANLY e PETCHONKA, 1993) apresentam alguns dados úteis para a seleção do equipamento de separação de particulados. Na primeira pode-se fazer uma comparação qualitativa entre os principais tipos de equipamentos para controle de particulados, enquanto que na segunda dados com relação ao desempenho dos equipamentos são mostrados.

3.11. A PREVENÇÃO DA POLUIÇÃO DURANTE A CONVERSÃO DE ENERGIA: CONSERVAÇÃO E EFICIÊNCIA

Neste tópico, serão apresentadas novas tecnologias que estão sendo empregadas para o aumento da eficiência energética de ciclos de potência, além de uma rápida explanação das vantagens da cogeração, do uso de fontes renováveis, da eficiência de uso final e finalmente serão abordados os programas nacionais de conservação de energia.

Tabela 3.33 - Comparação qualitativa de separadores de particulados

Avaliação	Tipo de separador			
	Ciclones	Lavadores de gás	Filtros de mangas	Precipitadores eletrostáticos
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo; Operação a altas temperaturas; Baixo custo de manutenção (não tem partes móveis). Neutralização de gases e particulados corrosivos; Resfriamento dos gases. 	<ul style="list-style-type: none"> Pode tratar particulados inflamáveis e explosivos; Absorção e remoção de particulados no mesmo equipamento; Variada eficiência de remoção; Baixa queda de pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiência; Pode separar uma grande variedade de particulados; Projeto modular; Baixos custos de operação. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiência; Pode tratar grandes volumes de gases com uma pequena queda de pressão; Se para a seca e úmida; Ampla faixa de temperaturas de operação;
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> Baixa eficiência ($dc < 5-10 \mu m$); Alto custo de operação (queda de pressão). 	<ul style="list-style-type: none"> Corrosão; Poluição secundária (um efluente líquido a tratar); Contaminação das partículas (não recicláveis). 	<ul style="list-style-type: none"> Ocupa uma área considerável; Dano às mangas por altas temperaturas e gases corrosivos; As mangas não operam em condições úmidas; Perigo de fogo e explosão. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto custo de investimento; Não controla emissões gasosas; Pouca flexibilidade; Ocupa um grande espaço; É afetado pela resistividade das cinzas.

3.11.1. Eficiência de geração: novas tecnologias

O controle e a utilização das diversas formas de energia sempre foram as alavancas de todo desenvolvimento humano e social. Até recentemente, durante todo o tempo em que esteve preocupado com a busca do desenvolvimento, o homem utilizou todas as formas possíveis de produção de energia, com os menores custos

possíveis, sem deter-se em analisar as conseqüências. Isto resultou, muitas vezes, no desperdício e no uso "irracional" da energia, gerando efeitos nocivos na economia, no meio ambiente e na qualidade de vida, principalmente nas grandes cidades.

No entanto, hábitos pessoais e medidas administrativas muito simples, como desligar a iluminação, controlar o funcionamento de aparelhos de ar condicionado ou calefação, utilizar luminárias e lâmpadas mais eficientes, incentivar a fabricação de aparelhos e equipamentos mais eficazes, utilizar tecnologias mais limpas, tanto nos meios de transporte como também na geração de energia, etc., podem mudar significativamente este quadro.

Tabela 3.34- Dados para a seleção de equipamentos de separação de particulados (HANLY e PETRONKA, 1993; SILVA e HERVAS, 1998)

Equipamento	Dimensões das partículas, μm	Queda de pressão, mmH_2O	Grau de limpeza esperado	Eficiência global para um pó típico, %	Temp. máxima do gás, $^{\circ}\text{C}$	Inv. capital	Custo de operação	ΔP médio
Ciclones	> 10	25 - 75	80 % em partículas menores que $20 \mu\text{m}$ e mais de 95 % para partículas maiores que $50 \mu\text{m}$.	85	500	1	1	1
Lavadores de gás tipo Venturi	> 0,3 - 1,0	375 - 750	90 - 95 % para partículas menores que $5 \mu\text{m}$.	99	200 - 250	2 - 3	3 - 4	3 - 4
Filtros de mangas	> 0,5 - 1,0	25 - 250	95 - 99 % para partículas menores que $5 \mu\text{m}$.	99	200 - 250	8 - 10	2 - 3	0,8
Separadores (Precipitadores) Eletrostáticos	> 0,001	6 - 12	Desde 80 % até mais de 99,9 % para todas as partículas menores que $5 \mu\text{m}$.	99	500	10 - 15	1 - 2	0,3

* 1 é o menor valor e constitui uma base de referência para os demais valores. (ΔP = perda de carga)

Para os países desenvolvidos e em desenvolvimento, com produção abundante e barata de combustíveis fósseis, a preocupação com a eficiência energética é, na maioria das vezes, motivada pelo aspecto ambiental, pelo fato dos recursos não serem limitadores na mesma escala que para os demais países, e pela emissão de poluentes ter atingido, pelas próprias condições de desenvolvimento, níveis muito mais preocupantes que nos demais.

Já para a maioria dos demais países em desenvolvimento, a questão ambiental ainda é objeto de menor preocupação se comparado aos países desenvolvidos. Por outro lado, como os recursos para a expansão dos sistemas energéticos, nesses países, são cada vez mais escassos e o aumento de competitividade de bens e serviços produzidos localmente é de suma importância para sua inserção no mercado globalizado, o estabelecimento de ações voltadas para a eficiência energética é um instrumento barato e eficiente que permite reduzir as demandas de energia, e conseqüentemente, postergar investimentos, ao mesmo tempo em que contribui de maneira significativa para os esforços de aumento da produtividade e competitividade nacionais.

Dessa forma, o combate ao desperdício e a busca do uso eficiente das diversas formas de energia têm como principais motivadores:

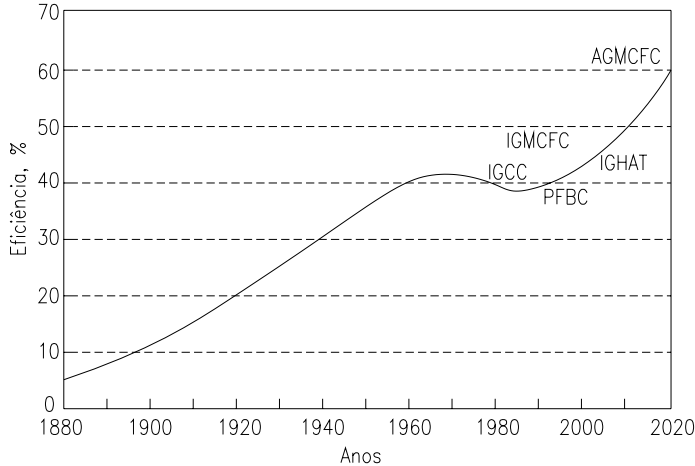
- a economia de recursos, devido à possibilidade de postergação de investimentos em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia;
- aumento de competitividade dos bens e serviços produzidos, ou ainda, a proteção e a melhoria do meio ambiente, pois grande parte das fontes utilizadas, especialmente os combustíveis fósseis, provoca poluição atmosférica e contribui para aumentar a emissão dos gases de efeito estufa.

A eficiência energética apresenta 4 níveis: 1. eficiência da extração de energia primária; 2. eficiência da conversão de energia primária em secundária; 3. eficiência de distribuição de energia aos usuários; e 4. eficiência de conversão em serviços.

Os níveis de maiores perspectivas em relação à economia de energia são os de número 2 e 4 vistos acima. O International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) tem calculado que a extensão da eficiência de utilização da energia existente hoje nos países desenvolvidos em todo o mundo levaria à diminuição do consumo de energia em 17 %, e numa escala semelhante à redução do CO₂.

O acréscimo na eficiência de conversão da energia térmica dos combustíveis em eletricidade nas termoelétricas tem sido enorme e as perspectivas são significativas. As primeiras termoelétricas operavam com uma eficiência de aproximadamente 5 %. Atualmente este parâmetro já atinge 40 % para as termoelétricas mais modernas. A introdução dos ciclos combinados com gaseificadores e turbinas a gás permite obter eficiências de até 55% (Figura 3.29). A introdução das células combustíveis leva a eficiência das termoelétricas de 60 a 70%. A queda na eficiência observada nos anos 80 - 90 é conseqüência da introdução das plantas para a dessulfurização dos ga-

ses de exaustão, que caracterizam-se por um alto consumo de eletricidade. O desenvolvimento técnico de turbinas a gás deve levar ao aumento da TIT (temperatura de entrada da turbina) o que permitirá obter maiores eficiências em ciclos combinados (Figura 3.30)



- PFBC Combustão em leito fluidizado pressurizado
- IGCC Ciclos combinados integrados com gaseificação
- IGHAT Turbina de ar úmido integrada com gaseificação
- IGMCFC Gaseificação/células combustíveis
- AGMCFC Gaseificação /células combustíveis avançadas

Figura 3.29- Eficiência da geração de eletricidade em centrais termelétricas desde o ano 1880, e prognósticos até o ano 2020 (EPRI, 1990)

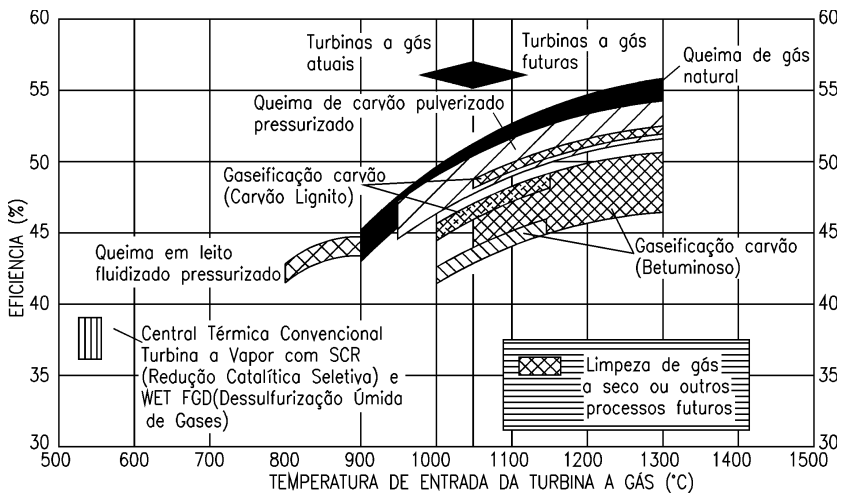


Figura 3.30 - Faixa de valores de eficiência em função do aumento da TIT de turbinas a gás

3.11.2. Cogeração

Lembrando, mais uma vez, que a produção e o consumo de energia geram diferentes tipos de impactos sociais e ambientais, dependendo da fonte primária escolhida e das respectivas tecnologias de conversão adotadas, a cogeração, ou produção combinada de energia térmica e elétrica a partir da queima de um mesmo combustível e uso seqüencial do calor residual, representa uma tecnologia de conversão energética com alto desempenho e reduzidas perdas. Além disso, essa opção tecnológica permite empregar ciclos com turbinas a vapor, a gás e motores alternativos e, possibilita o emprego tanto para consumidores industriais como também para comerciais cujas demandas situam-se a partir de centenas de kW elétricos e com demandas térmicas acima e/ou abaixo da temperatura ambiente.

Além dos aspectos tecnológicos, que indicam uma vantagem da cogeração vis a vis outras formas de suprimento de energia elétrica, no caso particular do Brasil as limitações econômicas das concessionárias de eletricidade fazem com que estes sistemas de produção combinada de energia elétrica e térmica, tenham uma particular importância, uma vez que os mesmos apóiam-se, principalmente, no capital privado, gerando um estímulo à competição na oferta energética, além de proporcionar um fornecimento garantido, confiável e de qualidade (SUANI et al., 1995). Outras razões para que essa alternativa seja reforçada são as crescentes restrições ambientais relacionadas às hidroelétricas de grande porte, às termelétricas nucleares e àquelas alimentadas por combustíveis fósseis (WALTER, 1996).

Também deve ser mencionado que a nova legislação normativa e tarifária tem destacado estes sistemas como um importante vetor na matriz energética brasileira. Esta nova legislação caracteriza-se pelos seguintes aspectos: regulamentação da compra dos excedentes de energia elétrica de autoprodutores, introdução do produtor independente de energia, garantia de livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição, possibilidade do emprego de gás natural e de combustíveis não fósseis (como os derivados de biomassa), e desenvolvimento de novas tecnologias de equipamentos de cogeração, incluindo turbinas a gás e motores de combustão interna. Estes aspectos levam em conta que estas unidades permitem uma geração descentralizada com unidades menores e modulares próximas ao ponto de consumo (o que reduz custos de transmissão, e conseqüentemente, as perdas que ela representa), apresentando custo reduzido e menores prazos para a implantação, maior flexibilidade, elevada eficiência energética (maior fator de utilização de combustível) e, finalmente, menores impactos ambientais.

Vários estudos têm demonstrado que uma maior utilização dos sistemas de cogeração na matriz energética brasileira traria benefícios claros, tanto no que diz respeito à redução do consumo de combustível, como também, aos níveis de emissão dos contaminantes atmosféricos e, por consequência, nos custos decorrentes dessas emissões. Além disso, estes sistemas são viáveis em relação aos aspectos técnicos e econômicos tendo em vista um menor tempo de retorno do projeto, permitindo a geração de excedentes de energia elétrica, que podem ser incorporados na capacidade instalada do país e que representam um lucro agregado para o autoprodutor, além do benefício do auto-suprimento (TEIXEIRA et al., 1998).

3.11.3. Fontes renováveis

O consumo de combustíveis fósseis responde pela maior parte da poluição ambiental. A Figura 3.31 mostra a porcentagem das emissões dos cinco poluentes mais importantes emitidos pelo consumo de combustíveis fósseis. Desta forma, vemos que 95 % de todos os óxidos de enxofre e de nitrogênio, assim como o dióxido de carbono (causa principal do efeito estufa), de origem antropogênica são produtos da combustão de combustíveis fósseis. No caso do monóxido de carbono e dos compostos orgânicos voláteis, a porcentagem é de aproximadamente 70 %. Por estas razões o acréscimo no consumo de energia tem um impacto ambiental tão grande.

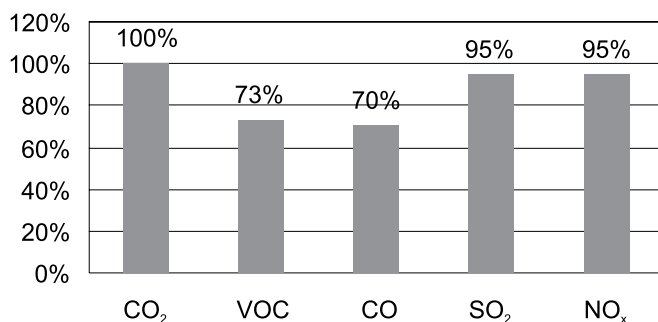


Figura 3.31 - Porcentagem das emissões totais de diferentes poluentes que correspondem ao consumo de combustíveis fósseis (HARPER, 1995)

As fontes renováveis de energia: solar, eólica, geotérmica, biomassa, dos oceanos e pequenas centrais hidrelétricas (PCH), caracterizam-se por impactos ambientais muito menores que o uso de combustíveis fósseis. O desenvolvimento tecnológico, nos últimos 20 anos, tem provocado uma redução sensível no custo da energia final obtida a partir destas fontes (Figura 3.32). Em alguns casos o kWh de eletricidade já apresenta preços competitivos. Assim, as fontes renováveis de energia

podem chegar a ser, num futuro próximo, uma oportunidade de negócios no setor energético. As características principais de cada uma das fontes renováveis descritas anteriormente é apresentada na Tabela 3.35.

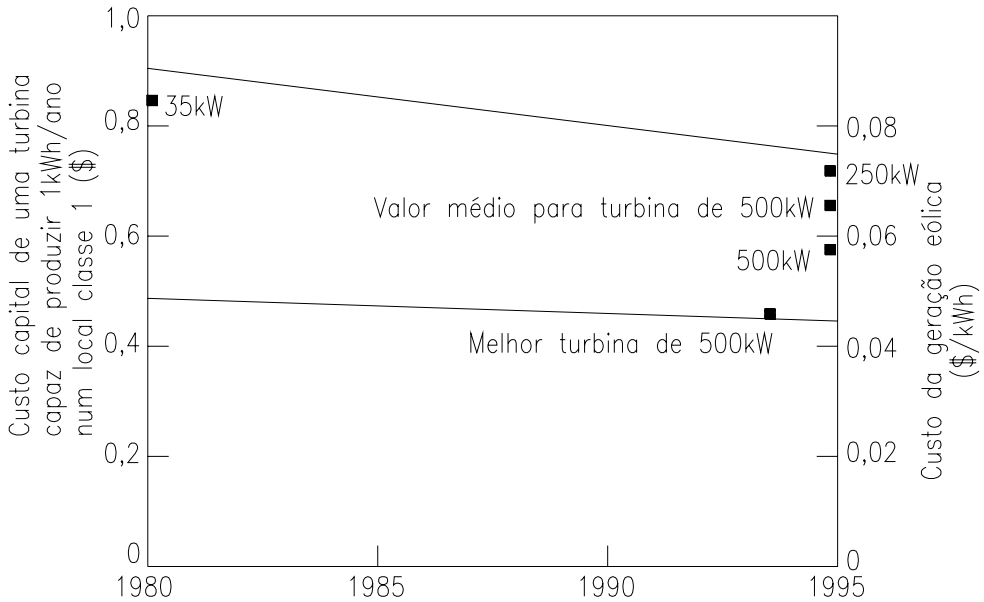


Figura 3.32 - Custo de geração de energia elétrica a partir da energia eólica na Dinamarca (SORENSEN, 1995)

Em relação à utilização da biomassa como combustível, o avanço também é enorme. A introdução de novas tecnologias com ciclos combinados de turbinas a gás e gaseificadores, permitirá reduzir o custo do kWh de uma faixa de 0,08 a 0,10 US\$/KWh para instalações convencionais, até valores de aproximadamente 0,04 US\$/kWh (Figura 3.33).

Tendo em vista os acordos firmados entre vários países a fim de promover o uso racional de energia pelo desenvolvimento de novas tecnologias tanto para combustíveis fósseis como para fontes renováveis, algumas centenas de milhões de dólares serão gastas em programas de pesquisa e desenvolvimento. Sendo assim, várias projeções têm sido feitas sobre o quanto as fontes de energia renováveis irão contribuir para o consumo global. A Tabela 3.36, baseada no World Energy Council (1993), nos dá um sumário das contribuições históricas e prognósticos da utilização de energia renovável.

Embora as fontes renováveis ofereçam benefícios meio-ambientais comparando-as com os combustíveis fósseis, o custo de geração ainda permanece mais caro. Estes custos têm diminuído, e é provável que diminuam ainda mais, porém, sua implementação poderia ser acelerada se os governos disponibilizassem recursos adicionais para projetos de pesquisa e desenvolvimento. Fazendo-se isto, gerações atuais e futuras poderiam obter benefícios através do uso de energia sustentável e de um meio ambiente mais limpo.

A energia termelétrica a carvão apresenta um dos maiores custos de geração, mesmo quando comparada às novas fontes renováveis como a biomassa e as pequenas centrais hidrelétricas – PCHs (ver Tabela 3.37).

3.11.4. Eficiência de uso final

O combate ao desperdício e a busca do uso eficiente das diversas formas de energia têm como principais motivadores:

- a economia de recursos, devido à possibilidade de postergação de investimentos em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia;
- aumento de competitividade dos bens e serviços produzidos, ou ainda, a proteção e a melhoria do meio ambiente, pois grande parte das fontes utilizadas, especialmente os combustíveis fósseis, provoca poluição atmosférica e contribui para aumentar a emissão dos gases de efeito estufa.

Tabela 3.35 - Características principais de fontes renováveis (World Energy Council, 1993)

	Solar	Eólica	Geotérmica	Biomassa	Dos oceanos	PCH
Magnitude	Extremamente grande	Grande	Muito grande	Muito grande	Muito grande	Grande
Distribuição	Mundial	Litoral, montanhas, planícies	Fronteiras tectônicas	Mundial	Litoral, trópicos	Mundial, montanhas
Variação	Dependente do tempo, dia e estação do ano	Altamente variável	Constante	Dependente do clima e da estação do ano	Dependente da maré e da estação do ano	Dependente da estação do ano
Intensidade	Baixa. No pico 1 kW / m ²	Baixa para média. 0,8 MW / km ²	Média baixa até 600°C	Moderada para baixa	Baixa	Moderada para baixa
Opções	Sistemas térmicos, fotovoltaicos, passivos e bioconversão	Turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal, bombas eólicas e navegação a vela	Ciclos termodinâmicos a vapor e binários, magna geopressurizada	Combustão, fermentação, digestão, gaseificação e liquefação	Ciclos termodinâmicos, osciladores de onda mecânicos, represagem de marés	Represagem e turbinas
Estado da arte	Em desenvolvimento algumas comerciais	Muitas comerciais, mais em desenvolvimento	Muitas comerciais, algumas em desenvolvimento	Algumas comerciais, mais em desenvolvimento	Em desenvolvimento	A maior parte comercial
Fator de capacidade	< 25 % w/o armazenagem, intermediário	Variável, a maior parte de 15 - 30 %	Alta, carga base	Quando necessário com estoque de curto prazo	Intermitente para carga base	Intermitente para carga base
Melhorias	Materiais, custo, eficiência fonte de dados	Materiais, projeto, localização, fonte de dados	Exploração, extração, uso pedra seca quente	Tecnologia, gerenciamento da agricultura e silvicultura	Tecnologia, materiais e custo	Turbinas, custo, projeto, fonte de dados
Características ambientais	Muito limpa, impacto visual, ruído	Muito limpa, impacto visual, ruído, mortalidade de pássaros	Limpa, disposição de salmoura	Limpa, impactos na fauna e na flora, resíduos tóxicos	Muito limpa, impacto no meio ambiente aquático local, impacto visual	Muito limpa, impacto no meio ambiente aquático local, uso de terra

O combate aos desperdícios se faz pela conscientização e educação do consumidor, mostrando-se o resultado direto em economia de recursos e benefícios ambientais provocados pela mudança de hábitos e comportamentos. O aumento da eficiência energética de equipamentos, sistemas e processos é obtido através da adequação de normas e códigos e, principalmente, através de programas de premiação e promoção das empresas eficientes. Ações bem estruturadas, voltadas para o aumento da produção racional e do uso de forma eficiente de energia, têm apresentado resultados fantásticos, tanto no aspecto econômico quanto nos reflexos sobre o meio ambiente.

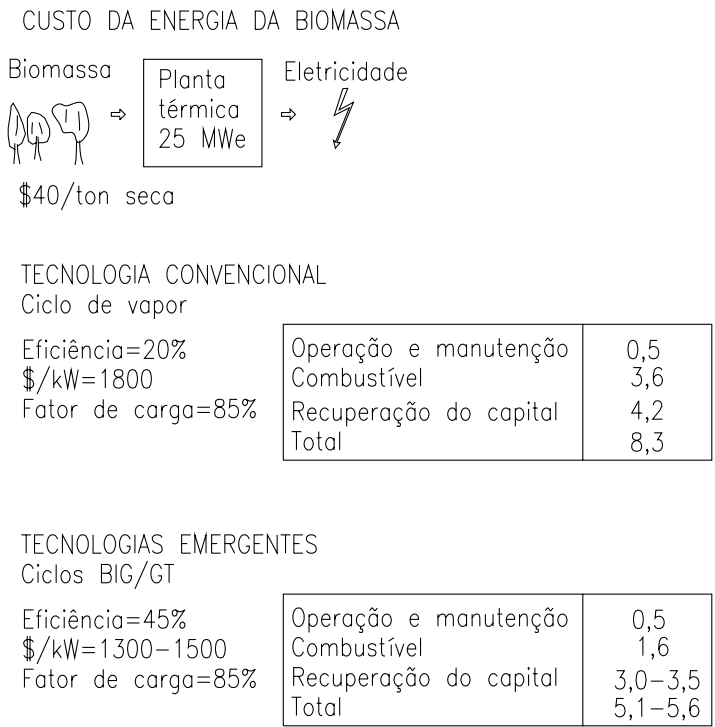


Figura 3.33 - Custo de geração de energia elétrica a partir da biomassa utilizando tecnologias convencionais e avançadas (ciclos combinados com TG e gaseificadores)
Elliot e Booth (1993)

Tabela 3.36 - Sumário das contribuições históricas e prognósticos da utilização de energia renovável (World Energy Council, 1993)

	% do uso global 1990	% do uso global 2000	% do uso global 2010	% do uso global 2020
Estados Unidos	2,2	2,3	2,8	4,4
América Latina	2,9	3,8	4,6	6,0
Europa Ocidental	1,6	1,6	1,9	2,4
Europa Oriental e antiga URSS	1,1	1,1	1,2	1,7
Oriente Médio e África do Norte	0,3	0,4	0,5	0,7
África Sub-Saharan	1,8	2,3	2,6	3,2
Pacífico e China	5,1	5,4	5,8	7,1
Ásia Central e do Sul	2,7	3,0	3,2	4,1
Total	17,7	19,9	22,7	29,6

Tabela 3.37- Preço de geração de energia do carvão mineral em comparação às fontes renováveis (Monteiro et al., 2004)

Forma de Geração	Preço estimado em R\$/MWh
Hidrelétrica (nova)	90,00
Hidrelétrica (velha)	10,00
Termelétrica a gás	111,00
Termelétrica a carvão (nova)	138,00
Termelétrica a carvão (velha)	55,00
Bagaço de cana	93,77
Resíduos de madeira	101,00

Eficiência energética é um termo técnico geralmente utilizado para denotar a geração de energia por unidade de energia fornecida ao sistema, por exemplo, os kWh gerados em uma central térmica por unidade de combustível utilizado, os km por litro nos automóveis, a quantidade de luz, aquecimento, refrigeração ou potência motora por unidade de energia consumida. Alguns exemplos de aumento na eficiência serão apresentados a seguir (ANDERSON, 1993).

O progresso no uso do vapor para a aplicação em geração elétrica tem sido continuamente crescente no século XX, No Reino Unido, estudos mostram que para cada tonelada de carvão gerava-se apenas de 100 a 200 kWh em 1891; por volta de 1914, cada tonelada gerava 550 kWh; em 1920, 630 kWh; em 1939, 1566 kWh; nos dias atuais pode-se conseguir gerar mais de 3000 kWh em novas instalações. Nos EUA, a eficiência global das centrais geradoras era não mais do que 5 % no começo do século XX com custos de geração de US\$ 1,40 por kWh; em 1950, a eficiência aumentou em 5 vezes chegando a 25 %, e os custos tiveram uma queda de 15 vezes; com as modernas centrais de ciclo combinado a eficiência dobrou atingindo 50 % e os custos foram reduzidos a 1/25 dos custos de 90 anos atrás, situando-se em torno de US\$ 0,05 por kWh. Também, a melhora dos equipamentos é relevante. As lâmpadas fluorescentes eletrônicas modernas são de 4 a 6 vezes mais eficientes do que as lâmpadas incandescentes; as lâmpadas incandescentes, por sua vez são de 10 - 15 vezes mais eficientes do que os lampiões de querosene pressurizado; os lampiões de querosene pressurizado são 8 vezes mais eficientes do que os lampiões de querosene com pavio. Sendo assim, as modernas lâmpadas fluorescentes são cerca de 300 a 700 vezes mais eficientes energeticamente do que os primeiros lampiões a pavio conforme pode ser observado na Tabela 3.38.

Tabela 3.38 - Evolução da eficiência dos sistemas de iluminação

Tipo de iluminação	Eficiência (lumens/W)
Lampiões de querosene com pavio	0,1
Lampiões de querosene pressurizado	0,8
Incandescentes	12 - 20
Fluorescentes	30 - 75

A substituição de combustíveis tradicionais (principalmente madeira e resíduos agrícolas) por combustíveis comerciais para o cozimento é um outro exemplo de ganhos na eficiência energética. Enquanto os primeiros fogões utilizando resíduos agrícolas apresentavam 10 a 20 % de eficiência, os fogões a lenha e carvão aumentaram para 25 a 35 %. Já os fogões modernos que utilizam querosene ou GLP (gás liquefeito de petróleo) atingem 40 a 60 % de eficiência.

Entre 1970 e 1989 a eficiência média da frota americana de aviões a jato dobrou, da mesma forma que a eficiência dos freezers e refrigeradores também apresentou um aumento de 100 %.

Outro estudo, com relação ao aumento da eficiência de uso final apresentado por KAMAL (1997), mostra que, nos EUA, os setores de consumo energético apresentam índices favoráveis. No setor industrial a redução foi de 30 %, no setor doméstico de 20 % e no setor de transportes, 35 %. Estes valores mostram que é possível utilizar as fontes energéticas com mais racionalidade e através de técnicas mais modernas e eficientes, o que proporciona ganhos substanciais tanto no sentido econômico como também no sócio-ambiental. A Tabela 3.39 apresenta o declínio no consumo de petróleo em diferentes economias mundiais conseguidas através de programas de utilização mais eficientes deste combustível. (KAMAL, 1997).

Tabela 3.39 - Exemplos de redução do consumo de petróleo em alguns países através de programas de uso eficiente de combustível

País	Ano do pico de energia	TEP por \$1000 GDP no pico	TEP por \$1000 GDP em 1985	Declínio médio anual %
Reino Unido	1880	1,10	0,32	- 1,2
Estados Unidos	1920	0,93	0,46	- 1,1
Alemanha	1920	0,76	0,32	- 0,6
França	1930	0,42	0,26	- 0,9
Japão	1970	0,38	0,26	- 2,5

3.12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRES, G.J.K., 1992 **"Catalyst Systems For Emission Control From Motor Vehicles"**, in Pollution, Causes, Effects and Control, Edited by Harrison, R.M., The Royal Society of Chemistry.

ALVES, L.M., TEIXEIRA, M.A., SANTOS, S.T., **Capítulo 20 - Biomassa e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**, Manuscrito da 2da Edição do livro Tecnologias da Conversão Energética da Biomassa, 2006.

ANDERSON, D., 1993, **"Energy-Efficiency And The Economics Of Pollution Abatement"**, Annu. Rev. Energy Environment, 18:291-318.

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2005, Ministério de Minas e Energia.

BLUESTEIN, J., **“Environmental Benefits of Distributed Generation”**, Energy and Environmental Analysis, Inc., 2001.

BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY 2006, downloaded from www.bp.com/statisticalreview2004.

CEBDS, **“Roteiro Básico para Elaboração de um Projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL”**, Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, www.cebds.com, 2004.

COLOMBO, U., 1992, **“Development And The Global Environment”**, in The Energy-Environment Connection, Editado por Jack M. Hollander, Island Press, USA.

DE MELLO, W.Z., MOTTA, J.S.T., 1987, *Ciência Hoje*, Vol. 6, No 34, págs. 40-43.

DERISIO, J.C., 1992, **“Introdução Ao Controle Ambiental”**, CETESB.

EDWARDS, A. H., 1995 **“Volatile Organic Compound Emissions, An Inventory For Western Europe”**, CONCAWE Report No 2/86, 18 p. 1986, Apud Degobert, P. “Automobiles And Pollution”, Éditions Technip.

EIA, **“History: Energy Information Administration (EIA)”**, International Energy Annual 2002, DOE/EIA-0219(2002) (Washington, DC, March 2004), web site www.eia.doe.gov/iea/. Projections: EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets, July 2005.

ELLIOT, P., BOOTH, R., 1993, **“Sustainable Biomass Energy”**, Shell selected papers, December.

EPA, 1996, **“Emission Factors: External Combustion Sources”**.

EPRI - Electric Power Research Institute, 1990, **“Beyond Steam: Breaking Trough Performance Limits”**, EPRI Journal, December.

EST, Feature Article, 1998, **“Kyoto Protocol Carbon Targets Could Be Met With Forest Credits”**, Vol. 32, Issue 5, pp. 125A-126A.

FIESP/CIESP, 2001, **Ampliação da Oferta de Energia Através da Biomassa**, FIESP/CIESP - Setembro 2001;

GOLDEMBERG, J., 1997, **“Kyoto - Sucesso Ou Fracasso?”**, O Estado de São Paulo, 30/12/1997.

GOKLANY, I. M., 1998, **“Did Federalization Hat The Race To The Bottom For Air Quality?”**, Environmental Management, No 6, pp. 12-18.

HANLY, J., PETCHONKA, J.J., 1993 **“Equipment Selection For Solid Gas Separation”**, Chemical Engineering, July, pp. 83-85.

- HARPER, S., 1995, "**Energy Efficiency, Renewable Energy And Sustainable Development**", EPA, trabalho apresentado no "Third International Seminar Of The Environmental Problems Of Urban Centers", Rio de Janeiro.
- HARTE, J., 1992, "**Acid Rain**", in The Energy Environment Connection, Edited by Hollander, J.M., pp. 50-74, Island Press.
- HENRY, J.G., HEINKE, G.W., 1989, "**Environmental Science And Engineering**", Prentice Hall.
- HEVENGELD, H., 1995, "**Understanding Atmospheric Change: A Survey Of The Background Science And Implications Of Climate Change And Ozone Depletion**", Environment Canada, Second Edition.
- HOWARD, J.K., "**O Fim do Petróleo: o Grande Desafio do Século XXI**", Editorial Bizâncio, Lisboa, 2006.
- IPCC, "**Carbon Dioxide Capture and Storage**", IPCC Special Report, Editors: Bert Metz, Ogunlade Davidson Heleen de Coninck, Manuela Loos, Leo Meyer, Outubro de 2005.
- KAMAL, W.A., 1997, "**Improving Energy Efficiency - The Cost Effective Way To Mitigate Global Warming**", Energy Conversion and Management, Vol. 38, No 1, pp. 39-59.
- KLABIN, I., "**O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e as Oportunidades Brasileiras**", Parcerias Estratégicas, número 9, Outubro/2000.
- LORA, E. E. S., 2002, "**Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**", 2nd ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brazil, 2002;
- MAKANSI, J., 1990, "**Fluidized-Bed Technology Expands Options For Solid-Fuel Firing**", Special Report, Power, June, pp. 25-36.
- MARKHAM, A., 1994, "**A Brief History Of Pollution**", Earthscan Publications Ltd., London, 162 pp.
- MCT, 2004, "**Protocolo de Quioto: Introdução**", Ministério da Ciência e Tecnologia, www.mct.org.br, 2004;
- MONTEIRO, K.V., et al., "**Carvão: O Combustível de Ontem**", Coordenadora geral Kathia Vasconcelos Monteiro - Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra Brasil, 2004.
- MOTTA, R.S., FERRAZ, C., YOUNG, C.E.F., AUSTIN, D., FAETH, P., "**O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e o Financiamento do Desenvolvimento Sustentável no Brasil**", IPEA, Texto Para Discussão Nº 761, ISSN 1415-4765, Rio de Janeiro, setembro de 2000.
- OLADE (Organización Latinoamericana de Energia), 1999, Comunicação Pessoal do Sr. Juan Luis Guzman, Diretor de Treinamento e Informática, Quito, 30 de Agosto de 1999.

OECD, OECD FACTBOOK 2006, OECD 2006

PHILLIPS, J.B., HINDAWI, M. A, PHILLIPS, A, BAILEY, R. V., 1998, **“Particulate Matter: Predicting Its Emission Rates”**, Pollution Engineering Online, July.

RESOLUÇÃO SEMA N°041/02 de 09 de Dezembro de 2002 do Estado do Paraná;

ROSSWELL, T., 1991, **“Greenhouse Gases And Global Change: International Collaboration”**, Environmental Science And Technology, Vol. 25, No 4, pp. 567-573.

SCHWARTZ, S.E., 1989, **“Acid Deposition: Unraveling Aregional Phenomenon”**, Science, 10/02/89, pp. 753-762.

SEVA, O.F., 1991, **“Como Estão As Manchas Ácidas No Brasil”**, Estudos Avançados, 11(5), pág. 81-107.

SIGAL, I.YA., 1988, **“Proteção Da Bacia De Ar Durante A Queima De Combustíveis”** Niedra, (em russo).

SILVA, E.L., HERVAS, I., 1998, **“Particulate Emission Control Optimization In Sugar Cane Bagasse Boilers”**, Proceedings of the Conference “Bionergy’98”, Volume 2, pp. 1282-1291.

SILVA, E.L., OLIVARES, E.G., 1995, **“Bagasse Suspension Burning And Air Pollution”**, International Sugar Journal, Vol. 97, No 1164, December, pp. 683-694, Latin American Edition.

SORENSEN, B., 1995, **“History Of, And Recent Progress In, Wind-Energy Utilization”**, Annual Review in Energy and Environment, pp. 387-424.

STAIRMAND, C.J., 1970, **“Filtration and separation”**, Vol. 7, 1970, p. 53.

TEIXEIRA, F.N., SILVA, E.L., NOGUEIRA, L.A.H., 1998, **“Uma Avaliação Quantitativa das Vantagens Ambientais da Cogeração no Brasil”**, VII ENCIT, 3 a 6 de Novembro, pp. 364-369, Rio de Janeiro.

UNDP, Human Development Report, 2005

UNEP-WHO, 1994, **“Air Pollution In The World Megacities”**, Environment, Vol. 36, No 2.

WALTER, A.C.S., 1996, **“Avaliação e Localização do Potencial Brasileiro de Produção de Eletricidade a Partir de Subprodutos da Cana-De-Açúcar”**, Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia, pp. 571-582, Rio de Janeiro.

WORLD BANK, 1997, **“Pollution Prevention and Abatement Handbook - Part II”**, Greenhouse Gas Abatement and Climate Change.

WORLD ENERGY COUNCIL, 1994, **“New Renewable Energy Resources: A Guide To**

The Future", in A Renewable Energy Primer, <http://www.bp.com/saw/english/resource/rewtxt.html>.

WORLD RESOURCES INSTITUTE, 1996-1997, "**World Resources: A Guide To The Global Environment - The Urban Environment, 1996-1997**", Oxford University Press.

WORLD RESOURCES INSTITUTE, 1998-1999, "**World Resources: A Guide to the Global Environment - Environmental Change and Human Health, 1998-1999**", Oxford University Press.

ZELDOVICH, B., YA., SADOVNIKOV, P., YA., FRANK-KAMENETSKY, D.A., 1947, "**Oxidação do nitrogênio durante a combustão**", Nauka, (em russo).

Capítulo 4

AUDITORIA ENERGÉTICA

4.1. INTRODUÇÃO

A rigor, promover a eficiência energética é essencialmente utilizar o conhecimento de forma aplicada, empregando os conceitos da engenharia, da economia e da administração aos sistemas energéticos. Contudo, dado à diversidade e complexidade desses sistemas, é interessante apresentar técnicas e métodos para definir objetivos e ações para melhorar o desempenho energético e reduzir as perdas nos processos de transporte, armazenamento e distribuição de energia. Com esse propósito, nesse capítulo procura-se apresentar e discutir os principais métodos e procedimentos de auditoria energética, que mediante uma abordagem sistemática dos fluxos energéticos em um dado sistema, visa determinar quem, quanto e como se está consumindo energia e fundamentar a implantação de programa de uso racional de insumos energéticos. Neste sentido, foi considerada, principalmente, a realidade das pequenas e médias empresas comerciais e industriais no contexto brasileiro. Inicialmente comenta-se a terminologia relacionada e procura-se situar tais auditorias nos propósitos da Conservação de Energia. A seguir, as auditorias energéticas são abordadas em seus aspectos práticos e detalhadas para casos reais. Conclui-se com uma breve análise dos obstáculos a superar ao pretender-se racionalizar o uso de energia no ambiente empresarial.

Além da justificativa usual e direta de que o uso racional de energia interessa por si mesmo, como de resto são oportunas todas as medidas de redução das perdas e de racionalização técnico-econômica dos fatores de produção, é conveniente observar o caráter estratégico e determinante que o suprimento de eletricidade e combustíveis apresenta em todos os processos produtivos. Ainda que representando uma parcela por vezes reduzida dos custos totais, via de regra a energia não possui outros substitutos senão a própria energia, sem a qual os processos não se desenvolvem. Talvez energia possa ser apenas parcialmente substituída por conhecimento, por informação, de modo a reduzir os desperdícios e melhorar o desempenho dos sistemas energéticos. De todo modo, esta substituição de energia por inteligência, melhorando a eficiência energética é cada vez mais relevante, seja devido a ques-

tões energéticas, como a crescente limitação da oferta de energia a baixos preços, ou a questões de caráter ambiental, porque associado inevitavelmente às perdas e desperdícios de energia, sempre existem impactos ambientais, como poluição atmosférica e dos recursos hídricos. No presente cenário da oferta de energia, seja no Brasil ou nos demais países, restrições de ordem financeira e ambiental se conjugam de modo a incrementar os custos dos energéticos e configuram perspectivas preocupantes de descompasso entre as disponibilidades e as demandas energéticas, ampliando significativamente a importância do uso racional de energia. Trata-se de uma via relativamente ainda pouco explorada e com interessantes possibilidades. E a auditoria energética é, efetivamente, o primeiro e essencial passo nesta direção.

4.2. UMA QUESTÃO DE TERMINOLOGIA

É oportuno se perguntar, antes de avançar qualquer idéia, o que se entende realmente por auditoria energética. De certa forma, parece que já é do senso comum entender estes termos como sendo a análise sistemática dos fluxos de energia em um sistema particular, visando discriminar as perdas e orientar um programa de uso racional de insumos energéticos. De fato, foi com esta acepção que, no início dos anos 80, as auditorias energéticas difundiram-se, sobretudo aplicadas a contextos industriais e tendo como estímulo básico o contexto de custos energéticos crescentes. Assim, podem ser citados os trabalhos do CNP-Conselho Nacional do Petróleo (1985), Rocchiccioli (1981) e Gorecki (1982), talvez os pioneiros em adotar, explicitamente, e, no sentido acima, a expressão “auditoria energética” em trabalhos em língua portuguesa.

Da etimologia vem que, como a raiz latina de auditoria, *auditio*, é a mesma de auditório, audição e audiência, há uma imediata vinculação com o ato passivo de ouvir. Junto com a auditoria energética, outros termos têm sido empregados com o mesmo objetivo, como “análise energética” e “diagnóstico energético”, algumas vezes causando equívocos, já que o estudo das perdas na cadeia de transformações energéticas pode ser desenvolvido com variado grau de desagregação. Além disso, a prática foi cunhando alguns termos de forma bem delimitada, e assim, em certos contextos, “diagnóstico” refere-se a um estudo superficial, enquanto “auditoria” seria um estudo minucioso. A rigor, deveria ser adotada a terminologia definida internacionalmente (WEC, 1985), segundo a qual, a contabilidade energética em um sistema, associada à produção de bens e serviços é definida como “energy audit” (inglês), “analyse énergétique” (francês), “energieanalyse” (alemão) e “análisis energético” (espanhol), correspondendo certamente à “análise energética”, mas de pouco uso em nossa literatura técnica. Esta abundância de termos, no mínimo, recomenda cuidado, para a exata transmissão de conceitos.

A expressão “auditoria” tem sido eventualmente evitada em função da conotação fiscalizadora e punitiva que pode receber, quando associada às auditagens contábeis. De qualquer forma, o conceito parece estar hoje bastante disseminado, como podemos confirmar por uma breve navegada pelos diversos sites nacionais e estrangeiros da Internet que divulgam experiências na área ou procuram vender serviços de racionalização energética, sempre apresentando, como ponto de partida para suas atividades, diagnósticos, auditorias ou levantamentos energéticos. Observe-se também que, nesta fase de análise do sistema, podem ser identificadas interessantes alternativas de redução dos custos com energia, sem necessariamente implicarem em redução das perdas energéticas, seja por reduções de perdas de processo, por substituição dos insumos energéticos (de um combustível para outro ou para eletricidade ou vice-versa) ou ainda por alterações da modalidade tarifária ou tributária associada às faturas energéticas. Neste sentido, a auditoria energética tem mais o caráter de uma análise de custos econômicos relacionados com energia.

Parece que os impasses terminológicos já fazem parte da cultura da Conservação de Energia. Por exemplo, que sentido tem nos preocuparmos em conservar energia, se a Primeira Lei da Termodinâmica já assegura que “energia não se cria nem se destrói, sendo sua quantidade constante no Universo”? De fato, por mais ineficiente que seja um processo ou sistema energético, a soma dos fluxos de energia na saída será sempre igual à soma de fluxos energéticos na entrada. Assim, falar em “uso racional de energia” parece mais sensato, mas também encontra pouca difusão... E, aí, pode ser que se confunda “racionalização” energética com “acionamento” energético, ambas palavras derivadas da raiz latina ratio, razão. Bem diferentes, enquanto a primeira busca aplicar a razão, o bom senso, o raciocínio para usar energia corretamente, a última trata de impor porções, gerir carências, com cotas, frações do todo. De fato, que razão deveria ser usada para reduzir as contas de energia: aquela que significa a inteligência humana ou a outra, que indica a fração? Enfim, mais que palavras, o importante mesmo é entender os sistemas energéticos, delimitar campos de interesse, determinar e avaliar as oportunidades de ação e agir, sem demora.

4.3. A AUDITORIA ENERGÉTICA E A EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

Como indicado no item anterior, com a difusão da importância da sustentabilidade dos sistemas energéticos e sobretudo com a elevação dos preços relativos dos combustíveis em meados da década de setenta, emergiu a necessidade do uso racional da energia, quer no âmbito das empresas, quer no cenário institucional. Desde então a chamada “conservação de energia” ou “eficiência energética” tem sido considerada como um recurso energético adicional, em muitos casos mostrando maior

economicidade do que as alternativas disponíveis. De fato, a energia não consumida em perdas poderia ser utilizada para algum fim útil, com vantagens imediatas. Por exemplo, diversas medidas de redução do consumo de energia elétrica, como a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes e a adequação dos motores de indução às cargas acionadas, requerem investimentos da ordem de 5 a 15 US\$/MWh economizado, custos muito inferiores aos requeridos para se gerar esta energia a partir dos sistemas convencionais do Sistema Elétrico, estimados em termos marginais acima de 60 US\$/MWh. Ou seja, liberar um kWh reduzindo o desperdício custa neste caso quatro vezes menos do que produzir um kWh adicional. Desde já cabe notar que esta diferença de custos é percebida de forma diferenciada entre os agentes econômicos e a própria sociedade, colocando-se como um desafio para as instituições de governo lograr a adequada percepção destes custos reais para todos.

O Brasil, comparado à maioria dos demais países, apresenta uma condição energética singular e que evoluiu de forma distinta. Do lado dos combustíveis líquidos, nosso país progressivamente passa de importador de volumes significativos de petróleo para um quadro de auto-suficiência, explorando suas importantes reservas, contudo a custos e preços elevados, que recomendam o uso criterioso dos combustíveis. Quanto à eletricidade, os enormes potenciais de hidroeletricidade impuseram investimentos elevados para seu desenvolvimento, como os efetuados na segunda metade do século passado e ocasionando, às vezes, crises setoriais. Assim, em função das distintas conjunturas, o setor energético brasileiro vivenciou nestas últimas décadas diferentes períodos de carência de vetores energéticos e acumulou razoável experiência na gestão das demandas como ferramenta auxiliar para o equilíbrio do mercado, com um inegável acervo de resultados.

Considerando, por exemplo, somente o começo dos anos oitenta, onde até 1985 era muito clara a restrição de oferta e os altos preços dos derivados de petróleo, as medidas de conservação e de substituição dos derivados de petróleo, apenas no setor industrial, conduziram a uma economia de cerca de 150 mil barris/dia. Deste período onde o foco das atenções era a redução do consumo do energético importado, destacaram-se a implementação do CONSERVE, Programa de Conservação de Energia do Setor Industrial, a formação compulsória das CICE's (Comissões Internas de Conservação de Energia - Portaria CNP/Diplan 255/81), a imposição de cotas máximas de consumo de óleo combustível e da penetração da lenha e de eventuais subprodutos de processo como combustível industrial. Em um trabalho de fôlego e qualidade, o IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, preparou uma série de manuais de conservação de energia para vários setores industriais, como têxtil, papel e celulose, cimento e cerâmicas, entre outros, sempre enfatizando a energia térmica e servindo de subsídios a programas de conservação em todo o

Brasil e em alguns países vizinhos.

Com o interlúdio da eletrotermia, em meados da década de oitenta, quando pretendeu-se usar excedentes de energia elétrica para produzir calor, substituindo óleo combustível, a denominada crise do petróleo transmutou-se paulatinamente em crise do setor elétrico e desde então dificuldades de suprimento vêm ocorrendo de forma mais ou menos recorrente, impondo o exercício quase permanente da promoção da eficiência energética nos distintos níveis de governo, bem como pelas concessionárias e usuários, o que será abordado em mais detalhe no presente trabalho. Nestas condições e, principalmente, com a criação em 1985 do PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, ganharam relevo as auditorias energéticas mais orientadas para a redução do consumo de energia elétrica. A avaliação dos resultados do PROCEL, posteriormente denominado Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica, dá uma clara percepção do esforço realizado no Brasil para economizar energia elétrica, permitiu atingir, em 1999, uma economia estimada em 2100 GWh, correspondendo a uma usina elétrica equivalente de 436 MW. Este é um valor expressivo, mas ainda representava menos de 1% da demanda observada nesse ano e dá uma idéia do potencial de economia por realizar (MME/DNDE, 2000).

Uma avaliação posterior, realizada em 2003, informa que ao longo de 18 anos o PROCEL implementou medidas que permitem a economia anual de cerca de 19 milhões de MWh, evitando investimentos de 13 bilhões de dólares, que poderiam implicar em hidrelétricas com mais de 1.500 km² de reservatórios (MME, 2004). Por isso mesmo, em diversas oportunidades, a adoção de medidas de redução dos desperdícios de energia elétrica vem sendo apontada como principal alternativa para o Setor Elétrico superar suas dificuldades, como demonstrado de forma candente durante a crise de suprimento elétrico ocorrida durante 2001, quando a ampla mobilização dos consumidores para usar energia de forma racional e a larga difusão de procedimentos e equipamentos eficientes promoveu uma sustentada redução das necessidades de eletricidade, afetando relativamente pouco a atividade econômica.

Na verdade, a utilização eficiente e racional da energia é um objetivo a ser buscado em qualquer conjuntura, onde a conciliação dos custos de investimento e dos custos operacionais em bases corretas é sempre desejável. E, mesmo lembrando que conservar energia é se limitar à correta aplicação dos conceitos da engenharia e análise econômica, a questão de implementar a adequada gestão dos fluxos energéticos tem formalizado uma abordagem própria. Assim, a operacionalização da eficiência energética passa necessariamente por uma mínima estrutura gerencial, de porte e abrangência compatíveis à empresa e que visa, em relação aos fluxos energéticos, proceder às etapas mostradas na figura a seguir. Naturalmente que cabem diversas re-alimentações entre estas etapas.

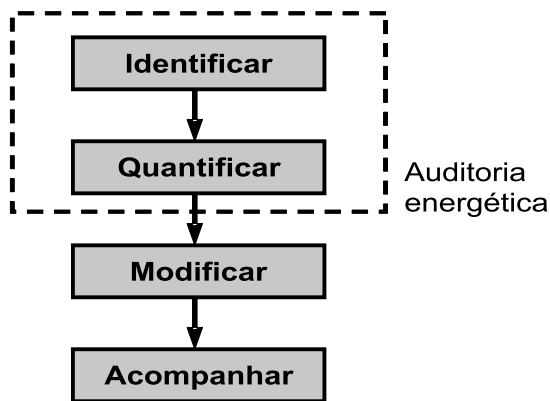


Figura 4.1 - Etapas de um programa de Uso Racional de Energia

Em outros termos, é preciso conhecer, diagnosticar a realidade energética, para então estabelecer as prioridades, implantar os projetos de melhoria e de redução de perdas e acompanhar seus resultados, em um processo contínuo. Esta abordagem é válida para instalações novas, em caráter preventivo, ou instalações existentes, em caráter corretivo, em empresas industriais ou comerciais. Das quatro etapas anteriores, a análise ou auditoria energética atende às duas primeiras, identificando e quantificando os fluxos energéticos ao longo do processo produtivo de bens e serviços. Desta forma, permitem o início ordenado e a continuidade de um programa de eficiência energética, através da resposta às seguintes questões:

- *Quanta energia está sendo consumida ?*
- *Quem está consumindo energia ?*
- *Como se está consumindo energia, com qual eficiência ?*

É importante observar que estas avaliações, por si só, não conduzem à racionalização do uso de energia. Elas constituem um primeiro e decisivo passo nesta direção, a requerer medidas e ações posteriores, desejavelmente estabelecidas de forma planejada e estruturada, com clara definição de metas, responsáveis e efetivo acompanhamento, se possível no âmbito de um Programa de Eficiência Energética, com visibilidade na corporação e a necessária provisão de recursos físicos e humanos. Neste sentido, as auditorias energéticas constituem um instrumento essencial de diagnóstico, preliminar básico para obter as informações requeridas para a formulação e acompanhamento deste Programa de redução de desperdícios de energia.

4.4. A AUDITORIA ENERGÉTICA NA PRÁTICA

Neste tópico procura-se apresentar os elementos para a realização prática de auditorias energéticas, sobretudo em pequenas e médias empresas, abordando-se os procedimentos e os requerimentos tipicamente observados e baseando-se em

experiências concretas desenvolvidas em empresas industriais e comerciais. Deve-se mencionar aqui que grande parte destas experiências foram realizadas com a ativa cooperação e o envolvimento direto de alunos da Universidade Federal de Itajubá e participantes de cursos da FUPAI, Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, cujo entusiasmo foi essencial e permitiu o desenvolvimento de dezenas de auditorias em empresas da região. Inicialmente são comentados os procedimentos padronizados, seguidos de uma abordagem mais geral e dos requisitos técnicos e de pessoal, bem como dos aspectos a considerar para seu adequado desenvolvimento.

4.4.1. Procedimentos padronizados

Considerando o contexto mais recente, em que a energia elétrica tem estado no centro das preocupações dos responsáveis por utilidades e gerentes de energia, foram propostas diversas metodologias padronizadas para efetuar auditorias energéticas. Elas tiveram seu desenvolvimento em grande parte patrocinado pelo PROCEL e são apresentadas a seguir.

Diagnóstico Energético - este método, com algumas versões em aplicativos computacionais, visa estudar as unidades consumidoras industriais e comerciais, essencialmente levantando o perfil de consumo por uso final e comparando com uma amostra dos principais setores produtivos. Requer algum levantamento de dados em campo, que são processados e permitem identificar qualitativamente os pontos críticos e indicar necessidades de atuação em equipamentos específicos, através de relatórios padronizados. Não trata com detalhe dos aspectos econômicos e aborda, essencialmente, eletricidade.

Auto-avaliação dos pontos de desperdício de energia elétrica - elaborado em princípios dos anos noventa pela Agência para Aplicação de Energia do Estado de São Paulo, trata-se de um roteiro simples para identificar pontos de desperdício e avaliar expeditamente as economias conseguidas com sua eliminação, em um trabalho a ser realizado pelo próprio consumidor. Visa diretamente as indústrias e não considera a utilização dos combustíveis.

Estudo de Otimização Energética - desenvolvida em projetos patrocinados pelo PROCEL, esta metodologia é bastante desagregada, inclui análises econômicas e considera tanto o uso de combustíveis como de energia elétrica, já se propondo alternativas e priorizando as ações para melhorar a eficiência energética. É, naturalmente, mais demorada e custosa que as metodologias anteriores, mas é a única que, a rigor, corresponde à definição de auditoria, inclusive pelos requisitos de capacitação para sua execução.

Em uma interessante análise comparativa destas metodologias, Leonelli (1991) concluiu que as duas primeiras, ainda que de forma limitada, permitem resultados imediatos, enquanto que o Estudo de Otimização Energética, embora demorado, é o mais indicado para um tratamento integral do uso racional de energia.

Cabe notar também que na medida em que os métodos empregados evoluem para a automatização dos procedimentos de campo e os cálculos se apóiam em computadores e modelos progressivamente elaborados, o auditor se liberta para exercer cada vez mais uma função crítica e criativa.

Um importante recurso nessa direção é o aplicativo Mark IV Plus, um pacote de programas computacionais disponibilizado pela Eletrobrás exatamente como ferramenta para a execução de auditorias e análises de desempenho de sistemas energéticos, considerando caldeiras, sistemas de cogeração, fornos e estufas, sistemas de iluminação, motores elétricos, quadros de distribuição, transformadores, tubulações e sistemas de ar condicionado e refrigeração. Este programa incorpora ainda recursos para estudos de viabilidade econômica e análises tarifárias, podendo ser de efetiva aplicação na caracterização das perdas e sua hierarquização para progressiva implementação das medidas de eficiência energética.

4.4.2. Abordagem geral

Evidentemente, qualquer estudo dos fluxos energéticos em uma empresa, com o propósito de racionalizar o uso de eletricidade e/ou combustíveis ou reduzir os custos com energia pode ser considerado uma auditoria energética, não sendo obrigatório seguir as metodologias padronizadas expostas no tópico anterior. Cabe mesmo comentar as possibilidades de aperfeiçoamento e adaptação destes métodos, a requerer um permanente esforço de estudos e desenvolvimento. De qualquer forma, o acervo já reunido no Brasil mediante cursos, publicações e levantamentos e a experiência adquirida por institutos de pesquisa, empresas de energia, escolas e consultores na realização de auditorias é bastante significativo e atende sem maiores problemas, aos requisitos de qualquer indústria ou empresa, no que se refere ao aspecto tecnológico. Uma inspirada revisão destas ferramentas foi apresentada por Salazar (1992).

Considerando uma abordagem bem genérica, a ser adaptada caso a caso, a seqüência de atividades apresentada na Figura 4.2 pode ser adotada para o desenvolvimento de uma auditoria energética (Nogueira, 1990). Como produto destas atividades, ou seja como resultado fundamental da auditoria energética, pode ser preparado então o relatório da auditoria, o documento que sintetiza o trabalho de levantamento empreendido e deve apresentar, de forma convincente, as recomendações e conclusões. Novamente como um exercício de generalização, no Quadro 4.1 adiante se apresenta um possível conteúdo de um relatório de auditoria energética. Entre parênteses indicam-se os temas que tipicamente podem ser abordados em cada tópico. Nesse livro, diversos destes assuntos serão adequadamente detalhados.

Observe-se que esta listagem se propõe a separar claramente a avaliação da situação real encontrada (Estudos Energéticos), que retrata o quadro encontrado,

dos estudos prospectivos (Análise de Racionalização de Energia), que definem condições a serem atingidas. Estas etapas podem ser efetuadas de forma independente, e, mesmo, por profissionais diferentes, entretanto, esta estrutura não é rígida e poderiam ser apresentadas as sugestões e alternativas para a racionalização dos sistemas elétricos, térmicos e mecânicos na seqüência imediata de sua avaliação, dependendo do auditor e do caso em estudo.

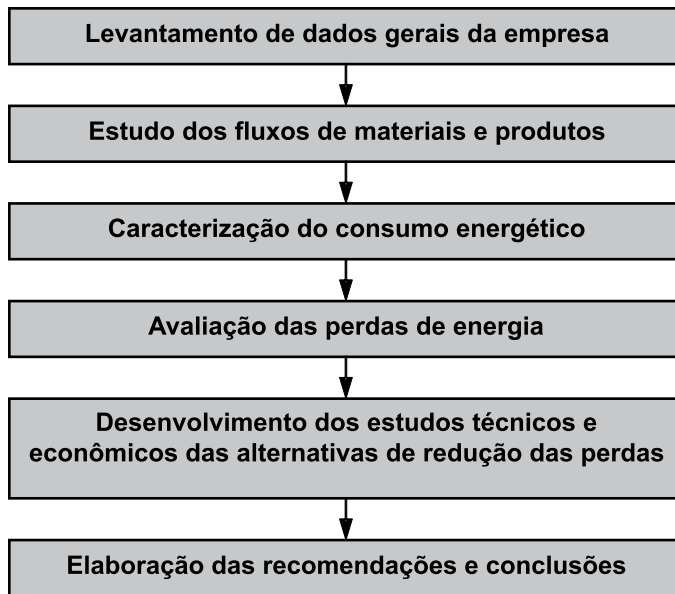


Figura 4.2 - Etapas de uma Auditoria Energética

Os diagramas de Sankey, mencionados nesta lista de tópicos, são uma forma gráfica de representar os fluxos energéticos na empresa, desde sua entrada até os usos finais, caracterizando as diversas transformações intermediárias e as perdas associadas. Os fluxos são representados por faixas, cuja largura corresponde à sua magnitude em unidades energéticas. A execução destes diagramas para a situação base e para as alternativas propostas permite evidenciar que, com as medidas de racionalização energética, o nível de atendimento das demandas de energia útil (mostradas no lado direito) se mantém e pode até mesmo melhorar, sendo as reduções de consumo de vetores energéticos decorrente do menor nível das perdas de energia, indicadas na faixa intermediária, onde se representam as transformações e conversões. A Figura 4.3 mostra um exemplo deste tipo de diagrama, comparando duas situações. Na situação original, para um acionamento com um efeito útil de 48 kW no eixo do motor, as perdas no transformador, cabos de distribuição e no motor somam 52 kW. Com a implementação das medidas de melhoria da eficiência energética, as perdas se reduzem para 40 kW, resultando uma demanda de 88 kW e produzindo a mesma potencia de saída da condição originalmente estudada.

Quadro 4.1- Conteúdo típico do relatório de uma Auditoria Energética

Relatório de Auditoria Energética

1 - Resumo Executivo

2 - Empresa

(localização, indicadores, descrição básica dos processos)

3 - Estudos energéticos

(diagramas, características, estudo das perdas)

3.1 - Sistemas Elétricos

a) Levantamento da carga elétrica instalada

b) Análise das condições de suprimento

(qualidade do suprimento, harmônicas, fator de potência, sistema de transformação)

c) Estudo do Sistema de Distribuição de energia elétrica

(desequilíbrios de corrente, variações de tensão, estado das conexões elétricas)

d) Estudo do Sistema de Iluminação:

(luminometria, análise de sistemas de iluminação, condições de manutenção)

e) Estudo de Motores Elétricos e outros Usos Finais

(estudo dos níveis de carregamento e desempenho, condições de manutenção)

3.2 - Sistemas Térmicos e Mecânicos

a) Estudo do Sistema de ar condicionado e exaustão

(sistema frigorífico, níveis de temperatura medidos e de projeto, distribuição de ar)

b) Estudo do Sistema de geração e distribuição de vapor

(desempenho da caldeira, perdas térmicas, condições de manutenção e isolamento)

c) Estudo do Sistema de bombeamento e tratamento de água

d) Estudo do Sistema de compressão e distribuição de ar comprimido

3.3 - Balanços energéticos

4 - Análise de Racionalização de Energia

(estudos técnico-econômicos das alterações operacionais e de projeto, como por exemplo, da viabilidade econômica da implantação de sistemas de alto rendimento para acionamento e iluminação, viabilidade econômica da implantação de sensores de presença associados a sistemas de iluminação, análise do uso de iluminação natural, análise de sistemas com uso de termoacumulação para ar condicionado, viabilidade econômica da implantação de controladores de velocidade de motores, análise da implantação de sistemas de cogeração)

5 - Diagramas de Sankey atual e prospectivos

6 - Recomendações

7 - Conclusões

8 - Anexos

(figuras, esquemas, tabelas de dados)

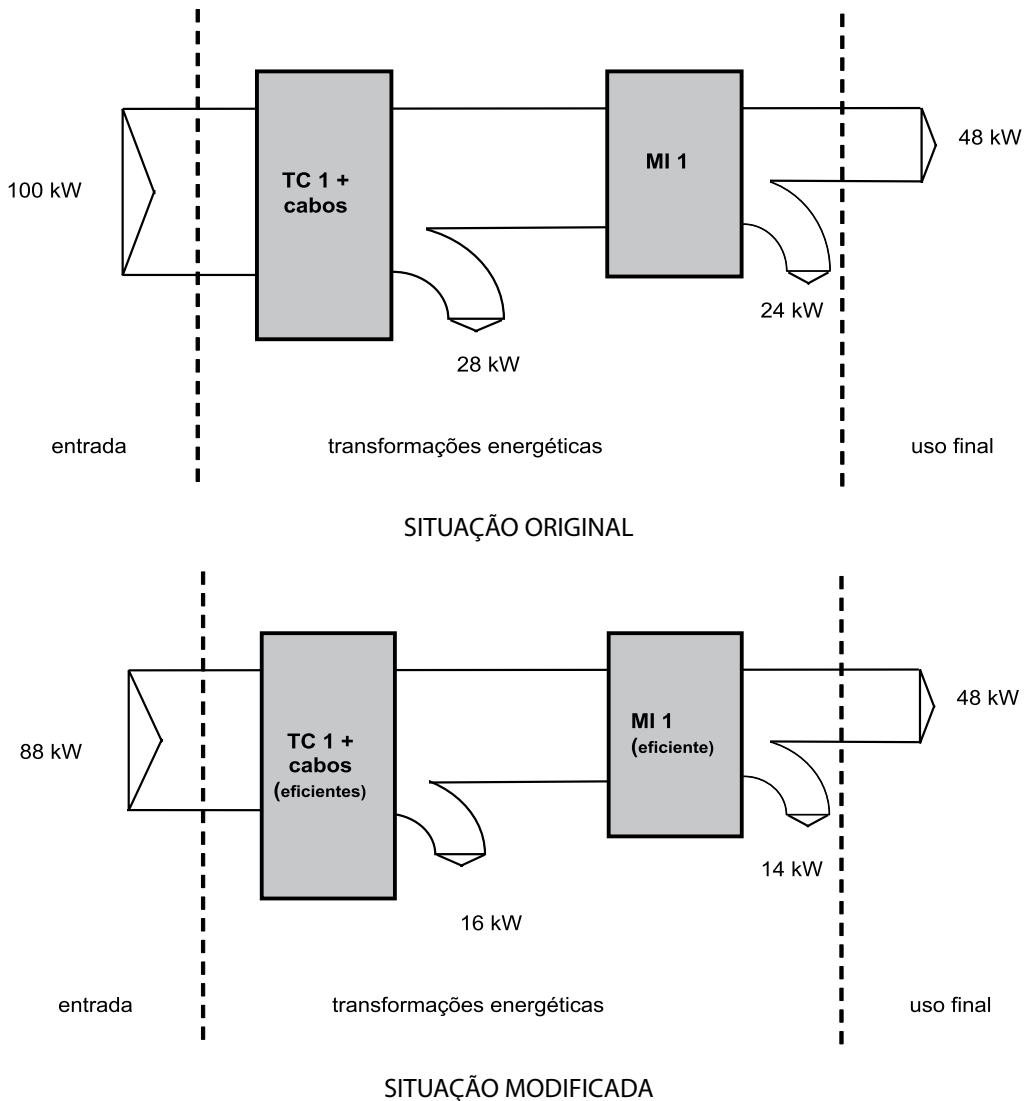


Figura 4.3 - Exemplos de Diagrama de Sankey

4.4.3. Requerimentos para uma Auditoria Energética

Como comentamos, para compreender como se ocorre o uso de energia na empresa, ou seja, para bem auditá-la, é preciso conhecê-la e conhecer suas necessidades. Neste tópico abordamos brevemente os dados necessários, a instrumentação, o pessoal e a terceirização no contexto da auditoria energética, mediante as ESCO's. A relação a seguir apresenta os dados que, em geral, são requeridos para a auditoria em uma indústria, adaptado de Kenney (1984).

- a) consumos mensais de água, energia elétrica e combustíveis, ao longo de um ano
- b) plantas, desenhos e esquemas detalhados das instalações (as built, se possível)
- c) balanços energéticos e de material, atualizados, para cada unidade
- d) temperaturas e pressão nos pontos relevantes, valores medidos e de projeto
- e) características elétricas dos equipamentos e valores medidos associados
- f) considerações sobre as especificações do produto, de caráter energético
- g) considerações ambientais e de locação da empresa
- h) perspectivas de alterações no processo.

É fácil perceber que, dos dados acima, apenas uma parte está imediatamente disponível para o auditor. Diversas informações devem resultar de medidas em campo, consultas a fabricantes e entrevistas com os responsáveis pela empresa. Algumas vezes não se dispõe de desenhos atualizados, daí a necessidade de um levantamento preliminar cuidadoso. Em relação aos equipamentos, a carência de parâmetros para a contabilização das perdas é freqüentemente um desafio estimulante para o auditor exercer sua criatividade, improvisando tomadas de sinal e estabelecendo correlações. De um modo geral, em auditorias energéticas, não se exige uma elevada precisão nos levantamentos de campo, aceitando-se preliminarmente desvios de até 10% nos balanços energéticos. Caso resulte da auditoria um projeto específico propondo uma redução de perdas com margens estreitas de retorno, procede-se então à reavaliação, com maior precisão, das perdas envolvidas.

Alguns instrumentos de medida básicos para o auditor energético são: termômetros digital com vários tipos de ponta sensora, analisadores de gases de chaminé (por absorção química ou eletrônicos), medidores de velocidade de ar/líquidos (anemômetros ou tubos de Pitot), psicrômetros, tacômetros, luxímetros e amperímetros de alicate. Entretanto, mais que qualquer instrumento, é essencial a capacidade de observar, criticamente, as instalações. Assim, percorrer a empresa com olhos clínicos, observando os detalhes, a postura e comportamento do pessoal é fonte de informações imediatas e valiosas quanto aos eventuais desperdícios de energia.

Com o aperfeiçoamento da instrumentação de medidas elétricas e sistemas de aquisição remota de dados ter sido disponibilizado para as auditorias energéticas, a custos relativamente baixos, a possibilidade de instalar medidores junto às cargas e centros de cargas mais relevantes, melhorando em muito as possibilidades de análise do comportamento energético dos sistemas. Estes medidores utilizam sistemas de transmissão de dados por celulares e efetuam levantamentos sistemáticos, com aquisição periódica de dados de potencia, corrente elétrica, tensão e fatores de potência.

Em situações típicas, uma equipe, para efetuar auditorias energéticas, requer um engenheiro com um bom treinamento e um ou mais técnicos para tomar medidas e auxiliar no processamento dos dados. Empresas de maior porte, processos mais sofisticados ou imposições de prazo podem exigir equipes mais numerosas. Em empresas de maior porte, a auditoria energética justifica uma abordagem que Sussemichel denomina “por equipe” (1980). Nesta proposta devem atuar duas equipes, uma responsável pela área mecânica e térmica e outra pela área elétrica, coordenadas por uma terceira equipe, que analisa, estabelece estratégias e elabora o relatório final.

Não é tarefa trivial estabelecer ou estimar a duração de uma auditoria, pois, naturalmente, que depende bastante da complexidade enfrentada e da profundidade desejada em cada situação, mas varia tipicamente entre uma semana a dois meses, incluindo os levantamentos de campo e as análises posteriores. No caso de empresas antigas, onde a instrumentação é escassa e, em geral, faltam dados e desenhos, estas estimativas de prazo são excedidas. Por outro lado, quando se implanta uma sistemática de auditorias, sua realização periódica pode induzir a prazos menores, pela capacitação atingida.

Uma questão ainda controversa em relação à aplicação de auditorias relaciona-se com o uso de pessoal da própria empresa ou a contratação de terceiros. É preciso considerar aqui não apenas os aspectos econômicos e estratégicos ao decidir entre treinar o pessoal ou chamar uma consultora. Certas características de cada empresa também pesam nesta escolha: o pessoal próprio é capaz de atuar com independência e criatividade, às vezes criticando procedimentos e hábitos arraigados? A auditoria energética, ao ser efetuada por um grupo interno, não poderia provocar algum mal estar, principalmente em áreas operacionais? Não obstante, no caso brasileiro, estas dúvidas ainda são pouco freqüentes. A grande maioria das auditorias energéticas em nosso país tem sido efetuada sem ônus para empresas, no âmbito de programas institucionais de eficiência energética, que lhes cobrem os custos. Particularmente, para as pequenas e médias empresas, a iniciativa governamental em promover auditorias energéticas tem sido comum, inclusive em países desenvolvidos.

Mais recentemente, ampliou-se no Brasil a presença das empresas de serviços energéticos, ou ESCO's, do inglês Energy Service Companies, existindo mesmo uma Associação Brasileira de ESCO's, a ABESCO, facilmente acessável pela Internet. Estas empresas, que podem ser consideradas consultoras especializadas na promoção da racionalidade energética em uma acepção ampla, oferecem além de experiência técnica e de gestão, recursos computacionais específicos e instrumentação. Muitas vezes as ESCO's podem dar também a orientação necessária para o financiamento da implementação das propostas de redução de perdas energéticas, aspecto decisivo, sobretudo, quando existem investimentos de porte relativamente alto para a empre-

sa. O financiamento do uso racional de energia, eventualmente, envolve modalidades inovadoras na obtenção de recursos, incluindo linhas específicas de bancos públicos de fomento, parcerias, financiamento com agentes externos e multilaterais, bem como os denominados “contratos de desempenho”, onde as despesas com a auditoria e a implementação das medidas de correção são cobertas pela própria ESCO, que se ressarcе destes custos cobrando parte da economia resultante nas faturas de energia.

4.4.4. Algumas Observações

Neste tópico apresentamos alguns aspectos complementares interessantes para bem conduzir uma auditoria energética, como efeito da sazonalidade, uso de consumos específicos de energia, sobre o uso da exergia como variável energética e sobre como estabelecer as recomendações finais.

Embora seja razoável que os fatores sazonais não sejam significativos para a energia consumida em processos industriais, existe uma forte influência da época do ano sobre o consumo energético para condicionamento ambiental e iluminação. Assim, existirá grande diferença nas demandas de energia no inverno e no verão em um bloco de escritórios com ar condicionado. Esta variação requer bom senso do auditor para a adequada interpretação das medidas efetuadas.

No relatório da auditoria, os resultados das medições podem ser colocados em termos absolutos (kWh, kJ, kcal, etc.) ou específicos, por unidade de produto. Os valores absolutos são bons indicadores da magnitude das perdas e dos fluxos energéticos, mas não servem como base de comparação entre indústrias e processos análogos. Desta forma, com o uso de consumos específicos, pode-se evitar as influências da variação do volume de produção e estabelecer correlações mostrando como varia o consumo por unidade de produto conforme se altera o volume de produção. Os índices de consumo específico permitem estabelecer séries cronológicas e avaliar a condição de uma empresa em particular, em relação a suas congêneres na região e no exterior, bem como verificar o espaço para racionalização do uso de energia, a partir do cotejo com os níveis teóricos mínimos. E, não é raro que, o baixo consumo de energéticos, em valores absolutos para um determinado mês, em uma empresa, esteja associado à queda dos níveis de produção e mascare na verdade um crescimento do consumo por unidade de produto.

Ao efetuarmos comparações entre consumos específicos de origem distinta é preciso tomar a devida cautela para assegurar-se de que os parâmetros são efetivamente análogos e consideram contextos semelhantes, em termos energéticos. Apenas sob tais condições as diferenças entre consumos específicos vão corresponder aos efeitos da conservação de energia. De pouco adianta um número fora de um contexto, como por exemplo, um consumo de 800 kWh/kg de peças fundidas. Este

valor incorpora outras energias além da fusão? Está computada a iluminação? Qual a matéria prima considerada? Qual o equipamento de fusão empregado? Com valores de vários países e para muitos materiais básicos, o trabalho de Boustead e Hancock (1985) fornece uma boa referência de valores de consumos específicos de energia. Para o Brasil e para os setores energeticamente mais importantes (Cimento, Celulose e Papel, Cerâmica, Fundição, Têxtil, Vidro, Fertilizantes e Açúcar e Álcool) os já citados manuais do IPT fornecem consumos específicos bem discriminados.

O emprego de consumos específicos já é bem conhecido e, eventualmente, imagina-se que uma auditoria energética sempre deve conduzir a eles. Na verdade, ainda que desejável, as vezes é bastante complexo associar a energia que entra na empresa a uma unidade de produto acabado. É o caso de empresas com grande estoque intermediário ou com uma linha variada (e variável...) de produção. Em tais situações a determinação dos consumos específicos “na saída” é difícil em muitas aproximações, podendo ser substituída pelo cálculo “na entrada”. Ou seja, o consumo específico é referido às unidades de matéria prima, em geral de fácil obtenção, ou ao faturamento, mais difícil por questões de sigilo na empresa.

A ferramenta analítica básica, para a identificação de perdas energéticas em sistemas elétricos e mecânicos, é a Termodinâmica, especialmente através de sua Primeira Lei, que permite a contabilidade dos fluxos em uma dada fronteira. No entanto, reconhecendo que fluxos energéticos têm também qualidade, tem sido sugerida a análise pela Segunda Lei, sendo possível demonstrar, por exemplo, que fluxos energéticos de igual valor, mas sob temperaturas diferentes, têm qualidades ou disponibilidades termodinâmicas distintas. O uso da propriedade exergia e da análise energética simplifica tal abordagem e vem se difundindo de modo interessante, entretanto, observa-se mesmo um excessivo apelo a tal tipo de análise, cuja aplicação só faz sentido em auditorias que envolvam processos de reações químicas ou elevadas temperaturas, ou ainda, apresentem potencial de cogeração (Nogueira, 1986). Colocado em outros termos, a maior complexidade imposta pela análise exergética tem de estar justificada pela existência de significativos desníveis de temperaturas entre os pontos de geração e utilização de calor ou pela presença de processos de conversão de calor em trabalho ou vice-versa, neste último caso como ocorre em sistemas com geração de frio para ar condicionado ou frigoríficos. Quando os fluxos de calor não são relevantes, é perda de tempo ponderar os fluxos por seu valor exergético.

Um último aspecto, algo óbvio, é quanto à necessidade de priorizar os itens a serem estudados na auditoria, centrando a atenção nos casos mais relevantes. Devem ser o primeiro alvo de preocupação os equipamentos e processos de menor eficiência, baixos investimentos para racionalização energética e que permitam breve retorno, geralmente relacionado com as situações onde se treinam e capacitam técnicos e operadores. Ao final do relatório da auditoria energética é muito importante

que conste uma síntese, indicando as ações recomendadas em nível de projeto/concepção (envolve substituição ou alteração de sistemas), operação e manutenção, com as prioridades correspondentes, em uma matriz sintética, como indica a tabela a seguir. Naturalmente que as ações de maior prioridade são, como acima, definidas com base nos indicadores custo/benefício e impacto esperado em economia energética. A razoável complexidade de algumas auditorias energéticas tem sugerido o desenvolvimento de técnicas utilizando inteligência artificial, em um pré-diagnóstico, para orientar e priorizar as ações de eficiência energética.

Tabela 4.1 - Recomendações de Auditorias Energéticas

Prioridade	Projeto	Operação	Manutenção
Alta	Devem estar fortemente justificadas	De aplicação imediata, recursos disponíveis ou apenas treinamento	De aplicação imediata, recursos disponíveis ou apenas treinamento
Média	Geralmente menos interessantes, pelos recursos necessários ou pelo benefício esperado	Envolvem maiores mudanças de processos	Envolvem geralmente investimentos em sistemas ou instrumentação

4.5. COMENTÁRIOS E SOFISMAS FINAIS

No presente estado de desenvolvimento tecnológico do Brasil e, considerando nossa configuração de preços e disponibilidades energéticas, o uso mais racional da energia elétrica e dos combustíveis é tanto possível como oportuno. E onde estão as dificuldades? Não restam dúvidas de que as dificuldades para uma maior difusão das auditorias energéticas são de ordem cultural e não tecnológica. A maioria das empresas não faz um acompanhamento sistemático de seu consumo energético porque isto é considerado irrelevante, porque não possui pessoal capacitado, porque sua administração não alcança a dimensão desta problemática e nem sabe como resolvê-la. É aí, portanto, que se deve atuar para efetivamente promover o uso racional de energia, esclarecendo, difundindo e provocando as atividades pioneiras e reprodutoras em auditoragem energética. Seguramente, o sucesso das iniciativas bem conduzidas leva outros a buscar trilhar os mesmos caminhos.

Neste sentido, como grandes obstáculos a vencer durante a implantação de uma consciência favorável ao uso racional de energia, existem três falácias, explícitas ou não, que cumpre desarmar. De livre interpretação do autor, as idéias comentadas

a seguir foram tomadas de uma palestra de Antônio Pagy, um saudoso líder na difusão do uso racional de energia no Brasil.

Não é raro ouvir, quando se toca no assunto eficiência energética ou conservação de energia com um empresário, especialmente de médias e grandes empresas, que ele já se preocupa com isso, afinal seu equipamento é de qualidade, seu projeto é competente e os anos passados lhe ensinaram a ser parcimonioso com a energia. Isto é aceitável quando tais comentários se apóiam em auditorias energéticas periódicas, fato infelizmente pouco freqüente. Em geral, esta postura defensiva surge de uma auto-estima ou de um zelo exagerado pela imagem da empresa, às vezes estimulados pela própria direção. Trata-se na realidade de uma ausência de autocrítica. A promoção da eficiência energética requer uma postura despreconceituosa, aberta a novos enfoques e possibilidades, cabendo um só dogma: sempre é possível gastar menos. Mesmo nas plantas mais modernas, a evolução tecnológica se incumbe de criar permanentemente espaços para o uso mais racional da energia. Ainda se está muito longe de consumir o mínimo teórico, pois os melhores processos têm uma demanda energética dezenas de vezes superior ao mínimo termodinâmico.

Outro argumento equivocado sobre o aumento da eficiência energética é relacionado ao seu custo, muito elevado e de retorno difícil. De fato, se o programa se limitar a uma auditoria, seu retorno será nulo, sem qualquer benefício tangível. Por isto não basta o diagnóstico, é preciso seguir as prescrições. E as prescrições sempre devem estar justificadas por seus indicadores econômicos. Em geral, não se recomendam projetos com prazos de retorno superiores a 24 meses e em alguns casos, até menos, porque existem quase sempre diversas possibilidades de ação com elevada rentabilidade, que pode ser mesmo de semanas. Ou seja, passar a usar bem energia é um investimento rentável, de baixo risco, que vem inclusive estimulando a formação de parcerias entre empresas e consultoras para lucrarem com este negócio, como vimos no caso das ESCO's. Aqui surge outro dogma: não existe ação sensata para o uso racional de energia que não tenha economicidade.

A última falácia tem a ver com os presumidos nexos consumo energético/qualidade do produto e consumo energético/produtividade, acreditando alguns que reduzir sua demanda de energia irá afetar o volume de produção e a qualidade de seu produto. Também este argumento não tem maior sustentação. Mesmo quando se mantêm os aportes de energia útil em situações prospectivas, obtém-se significativa economia de energia pela redução das perdas associadas aos inevitáveis processos de conversão e transferência de energia. Economizar energia não é soviniça, mas inteligência.

A auditoria energética é um elemento essencial para a conscientização, esclarecimento e envolvimento do pessoal de uma empresa com o uso racional da

energia, permitindo uma irrefutável contestação das falácias anteriores. De qualquer forma, é sempre recomendável o realismo no reconhecimento dos limites a atingir e um especial cuidado no estabelecimento de metas compatíveis com a disponibilidade dos recursos materiais e humanos. É preciso, talvez, humildade para reconhecer que promover a eficiência energética é um processo, uma postura sujeita a recaídas e nunca uma conversão milagrosa ou uma rápida vitória. Esta luta apenas se inicia com a Auditoria Energética, mas como diziam os antigos, o início é metade da façanha.

4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUSTEAD, I., HANCOCK, G.F., **Handbook of Industrial Energy Analysis**, Ellis Horwood Publisher, London, 1985

CNP, **Economia de óleo combustível: Auditoria energética** (folheto nº 11, desenvolvido por Spirax Sarco), Conselho Nacional do Petróleo, Brasília, 1985

GORECKI, J., **"Gestão do uso de energia"**, Curso de Economia de Energia na Indústria, CNP/IBP/Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, 1982

KENNEY, W.F., **Energy Conservation in the Process Industries**, Academic Press, Orlando, 1984

LEONELLI, P.A., **"Diagnóstico energético em empresas: avaliação das metodologias patrocinadas pelo PROCEL"**, I Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, AIPSE/UNICAMP, 1991

MME, **Energia Renovável e Eficiência Energética**, Brasília, 2004

MME/DNDE, **Balço Energético Nacional - ano base 1999**, Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético, Brasília, 2000

NOGUEIRA, L.A.H., **"A análise exergética na otimização de processos industriais"**, Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, nº 1, vol. XI, Itajubá, 1986

NOGUEIRA, L.A.H., **Auditoria Energética, notas de aula**, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1990

ROCCHICCIOLI, C., **"Implantação de um Programa de Conservação de Energia"**, Seminário de Conservação de Energia, Instituto Brasileiro do Gás, São Paulo, 1981.

SALAZAR, S., **Avaliação dos Programas de Conservação de Energia para o Setor Industrial de Energia**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, 1992

SUSEMICHEL, A.H., **“A systematic approach to organizing an energy audit”**, in Energy auditing and conservation, Hemisphere Publishing, Washington, 1980

WEC, Energy Terminology (Section 16: Energy Balances and Energy Accounting), World Energy Conference, Pergamon Press, New York, 1985

Capítulo 5

TARIFICAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

5.1. INTRODUÇÃO

Várias medidas de eficiência e otimização energética não são implantadas pelos consumidores responsáveis devido aos elevados custos envolvidos quando comparados aos possíveis decréscimos nas faturas de energia elétrica. Estas apresentam a quantia total que deve ser paga pela prestação do serviço público de energia elétrica, referente a um período especificado, discriminando as parcelas correspondentes.

Assim, compreender a estrutura tarifária e como são calculados os valores expressos nas notas fiscais de energia elétrica é um parâmetro importante para a correta tomada de decisão em projetos envolvendo conservação de energia.

A análise dos elementos que compõem esta estrutura, seja convencional ou horo-sazonal, é indispensável para uma tomada de decisão quanto ao uso eficiente da energia. A conta de energia é uma síntese dos parâmetros de consumo, refletindo a forma como a mesma é utilizada. Uma análise histórica, com no mínimo 12 meses, apresenta um quadro rico de informações e torna-se a base de comparação para futuras mudanças, visando mensurar potenciais de economia. Nesse sentido, o estudo e o acompanhamento das contas de energia elétrica tornam-se ferramentas importantes para a execução de um gerenciamento energético em instalações.

Além disso, o resultado da análise permite que o instrumento contratual entre a concessionária e o consumidor torne-se adequado às necessidades deste, podendo implicar em redução de despesas com a eletricidade.

Atualmente, o principal instrumento regulatório que estabelece e consolida as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica é a Resolução ANEEL nº 456, de 29 de novembro de 2000. Além deste, serve como base legal o disposto no Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934 – Código de Águas, no Decreto nº 41.019, de 26 de fevereiro de 1957 – Regulamento dos Serviços de Energia Elétrica, nas Leis nº 8.987, de

13 de fevereiro de 1995 – Regime de Concessão e Permissão da Prestação dos Serviços Públicos, nº 9.074, de 7 de julho de 1995 – Normas para Outorga e Prorrogação das Concessões e Permissões de Serviços Públicos, nº 8.078, de 11 de setembro de 1990 - Código de Defesa do Consumidor, nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996 – Instituição da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, e no Decreto n.º 2.335, de 6 de outubro de 1997 - Constituição da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

O sistema tarifário de energia elétrica é um conjunto de normas e regulamentos que tem por finalidade estabelecer o valor monetário da eletricidade para as diferentes classes e subclasses de unidades consumidoras. O órgão regulamentador do sistema tarifário vigente é a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia - MME.

Ao longo da história do setor elétrico brasileiro as questões tarifárias, por um motivo ou outro, sempre estiveram presentes, quer seja do lado do consumidor, preocupado com os pagamentos de suas contas mensais, quer seja do lado das empresas concessionárias de energia elétrica, preocupadas com o fluxo de caixa, equilíbrio econômico-financeiro e rentabilidade dos seus negócios. Para os consumidores a tarifa pode servir como um sinal econômico, motivando-o a economizar energia.

No início do século passado, a entrada da Light canadense no Rio de Janeiro e em São Paulo foi protegida pela inclusão, nos contratos da época, de cláusulas prevendo a necessidade de atualizações tarifárias em decorrência de uma futura desvalorização da moeda brasileira. As empresas de capital externo precisavam adquirir divisas para honrarem seus compromissos financeiros externos e também remeterem os dividendos. Um caminho encontrado foi a introdução da chamada cláusula ouro, onde as tarifas eram definidas parcialmente em papel-moeda e em ouro, atualizada esta última pelo câmbio médio mensal.

Ainda na primeira metade do século passado, tem-se um período caracterizado pela forte presença do Estado na regulamentação dos serviços de energia elétrica, como pode ser comprovado pela publicação do Código de Águas, em 10 de julho de 1934, (Decreto nº 24.643), e da adoção do regime tarifário de serviço pelo custo (Decreto nº 41.019, de 26/02/57).

Com o Decreto-lei nº 1.383, de 1974, tem-se o estabelecimento da política nacional de equalização tarifária. Neste mesmo ano de 1974, foi instituída a Reserva Global de Garantia-RGG, instrumento que serviu para transferir recursos gerados por empresas rentáveis para outras menos rentáveis.

Ao longo dos anos, a fixação das tarifas serviu, ora como um instrumento econômico considerado por muitos como inadequado, caso da equalização tarifária, ora de política anti-inflacionária, como ocorreu no período de 1975 até 1986. Como consequência desta política e de um crescente endividamento externo de algumas empresas, instalou-se forte crise financeira no setor elétrico. Neste período de tarifas equalizadas, os reajustes tarifários se baseavam na evolução do “custo do serviço” das empresas concessionárias de energia elétrica, composto basicamente pelos custos de operação e manutenção, mais uma remuneração garantida sobre o capital investido.

Em 1993, com o advento das Leis nºs 8.631 e 8.724 e do Decreto regulamentar nº 774, iniciou-se uma nova fase do sistema de tarifas, buscando, entre outros objetivos, a recuperação do equilíbrio econômico-financeiro das empresas. A Lei nº 8.631 extinguiu o regime de remuneração garantida, terminou com a equalização tarifária e estabeleceu que a Eletrobrás também destinaria os recursos da Reserva Global de Reversão - RGR para, entre outras finalidades, a reativação do programa de conservação de energia elétrica, mediante projetos específicos. Este fato possibilitou estimular e injetar uma soma significativa de recursos nos programas do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL. Outras importantes alterações foram a solução para os débitos acumulados da União para com o setor elétrico (Conta Resultados a Compensar – CRC) e a implantação de uma nova sistemática para o reajuste das tarifas. A partir da referida Lei, passou-se a aplicar uma fórmula paramétrica que garantia às concessionárias o reajuste das tarifas iniciais, proposta com base nos seus custos, por indicadores específicos destes custos. As tarifas seriam revisadas a cada três anos. Na prática, tentou-se garantir aos concessionários um repasse para as tarifas das variações ocorridas nos seus custos.

Com a implantação do Plano Real, através da Lei nº 9.069, de 29 de junho de 1994, as tarifas foram convertidas em Real (URV) pela média dos valores praticados nos meses de dezembro de 1993 a março de 1994. A fórmula paramétrica, definida em 1993, ficou suspensa sendo que estabeleceu-se a condição de não poder ocorrer reajuste de tarifas em prazo inferior a um ano. Em novembro de 1995, para as unidades consumidoras classificadas como Residencial, foram alteradas as faixas de desconto, extinguindo-se a progressividade para os clientes não enquadrados como baixa renda, ao mesmo tempo que reduziram-se os descontos existentes para as menores faixas de consumo. Dentro da classe Residencial, criou-se a subclasse Residencial Baixa Renda, com o objetivo de manter os subsídios para as menores faixas de consumo, dos menos favorecidos economicamente.

As leis nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995 e nº 9.074, de 07 de julho de 1995,

que dispõem sobre o regime das concessões, constituem importante marco legal para o setor elétrico, estabelecendo novas diretrizes para a administração das tarifas. Com a lei nº 8.987, a política tarifária sofre nova alteração, instituindo-se o conceito de “tarifa pelo preço”. Ou seja, visando dar maiores incentivos à busca por eficiência e redução de custos, as tarifas seriam fixadas num processo licitatório onde a concessão seria dada ao agente que solicitasse a menor tarifa ou, alternativamente, uma vez fixadas no edital as tarifas iniciais, a concessão seria dada ao agente que oferecesse o maior pagamento pela concessão.

Cabe ainda destacar a introdução nos contratos de concessão de cláusulas de garantia de preço, com fórmula de reajuste anual e critérios de revisões periódicas e extraordinárias; a introdução de mecanismos de competição com a livre negociação de energia elétrica com a criação dos “Consumidores Livres”; promoção da desverticalização das atividades setoriais, visando dar transparência à definição dos preços de geração, transmissão, distribuição e comercialização.

Uma importante mudança no sistema tarifário brasileiro ocorreu com a implantação da tarifa horo-sazonal. O Decreto nº 86.463, de 1981, já determinava que o então existente Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, passaria a estabelecer diferenciações nas tarifas, tendo em vista os períodos do ano e os horários de utilização da energia. Optou-se, então, pelo emprego da teoria dos custos marginais, onde o custo marginal de fornecimento reflete o custo incorrido pelo sistema elétrico para atender o crescimento da carga.

Este sistema tarifário permitiu a implantação de um sinal econômico para os consumidores, incentivando-os à maior utilização de energia durante os períodos de menor demanda ou de maior disponibilidade de oferta pelo sistema elétrico. A THS, como é também conhecida a tarifa horo-sazonal, teve suas primeiras portarias publicadas em 1982, sendo que a portaria DNAEE nº 33, de 11 de fevereiro de 1988, consolidava todas as anteriores. A modalidade THS também prevê contemplar os consumidores de baixa tensão, notadamente os residenciais, através da tarifa amarela. Algumas concessionárias realizaram projetos pilotos de tarifa amarela, autorizadas na época pelo DNAEE, através da Portaria nº 740, de 07 de novembro de 1994.

O sistema de tarifação horo-sazonal permitiu a diferenciação na cobrança de energia elétrica de acordo com os períodos do dia (horários de ponta e fora de ponta) e com os períodos do ano (seco e úmido). Tal forma de tarifação trouxe vantagens para o sistema elétrico, pois levou a uma utilização mais racional da energia. Os consumidores por sua vez passaram a ter alternativas de deslocamento do seu consumo para períodos em que o custo é mais baixo, reduzindo gastos. Atualmente, este sistema tarifário bem como as modificações recentes envolvendo o Fator de Potência estão consolidadas na Resolução ANEEL nº 456, de 29 de novembro de 2000.

5.2. SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico de potência pode ser subdividido, na prática e para facilitar a compreensão, em sub-sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição:

- Transmissão: Alta Tensão (AT)
- Grandes unidades consumidoras: 69 a 500 kV
- Subtransmissão: Média Tensão (MT) e AT
- Médias unidades consumidoras: 13,8 a 138 kV
- Distribuição: MT e Baixa Tensão (BT)

Pequenas unidades consumidoras:

- Residencial
- Comercial
- Industrial
- Poder Público
- Rural

A localização das unidades consumidoras no sistema vai depender, basicamente, da característica de consumo de energia, isto é, de acordo com sua potência elétrica. Em sistemas de distribuição pode-se relacionar as cargas envolvidas da seguinte forma:

- Carga da unidade consumidora;
- Carga do transformador;
- Carga de uma rede primária ou linha de distribuição;
- Carga de uma subestação.

É importante considerar que o regime dessas cargas não é fixo, varia de um valor mínimo a um valor máximo. Assim, o sistema deve estar preparado para atender a esse valor máximo.

Deve-se considerar, ainda, que os valores máximos dessas cargas não ocorrem ao mesmo tempo, e para que não ocorra um superdimensionamento do sistema deve-se considerar uma diversidade de consumo para cada um dos níveis de carga.

As curvas de carga variam de acordo com as características de uso e hábito das unidades consumidoras. Assim, as unidades consumidoras residencial, industrial, comercial, rural, iluminação pública, etc., apresentam efeitos combinados sobre o sistema elétrico.

5.3. DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Para facilitar a compreensão dos conceitos e definições que virão a seguir, suponha a curva de carga apresentada pela Figura 5.1. Estas curvas representam as potências médias medidas em intervalos de 15 em 15 minutos de uma unidade consumidora.

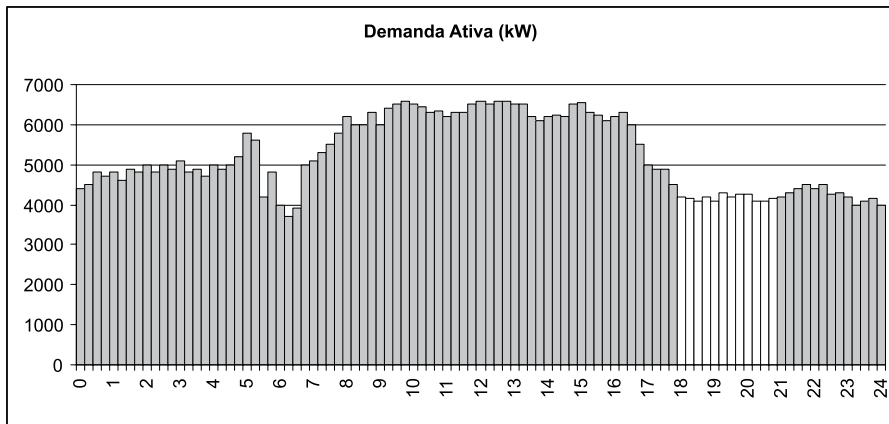


Figura 5.1 – Curva de carga típica de uma unidade consumidora, ao longo de um dia

5.3.1. Energia Elétrica Ativa

É o uso da potência ativa durante qualquer intervalo de tempo, sua unidade usual é o quilowatt-hora (kWh). Uma outra definição é “energia elétrica que pode ser convertida em outra forma de energia” ou ainda, conforme visto anteriormente, “é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste à esta mudança”.

5.3.2. Energia Elétrica Reativa

É a energia elétrica que circula continuamente entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, sem produzir trabalho, expressa em quilovolt-ampère-reactivo-hora (kvarh).

5.3.3. Demanda

É a média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado. Assim, esta potência média, expressa em quilowatts (kW), pode ser calculada dividindo-se a energia elétrica absorvida pela

carga em um certo intervalo de tempo Δt , por este intervalo de tempo Δt . Os medidores instalados no Brasil operam com intervalo de tempo $\Delta t = 15$ minutos (Decreto nº 62.724 de 17 de maio de 1968).

5.3.4. Demanda Máxima

É a demanda de maior valor verificado durante um certo período (diário, mensal, anual etc.). Ver Figura 5.2.

5.3.5. Demanda Média

É a relação entre a quantidade de energia elétrica (kWh) consumida durante um certo período de tempo e o número de horas desse período. Ver Figura 5.2.

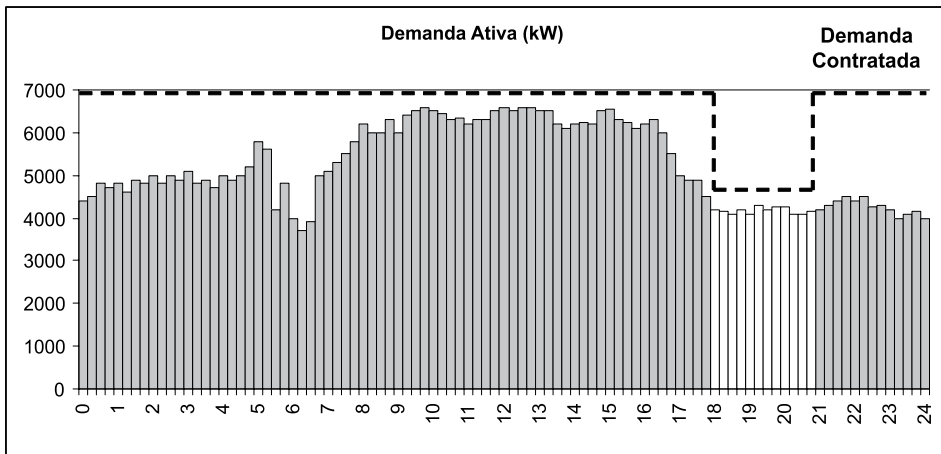


Figura 5.2 – Demandas Máxima e Média de uma curva de carga

5.3.6. Demanda Medida

É a maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 (quinze) minutos durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW). Considerando um ciclo de faturamento de 30 dias, tem-se 720 horas e 2880 intervalos de 15 min.

5.3.7. Demanda Contratada

É a demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência

fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada, durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW). A Figura 5.3 exemplifica a demanda contratada.

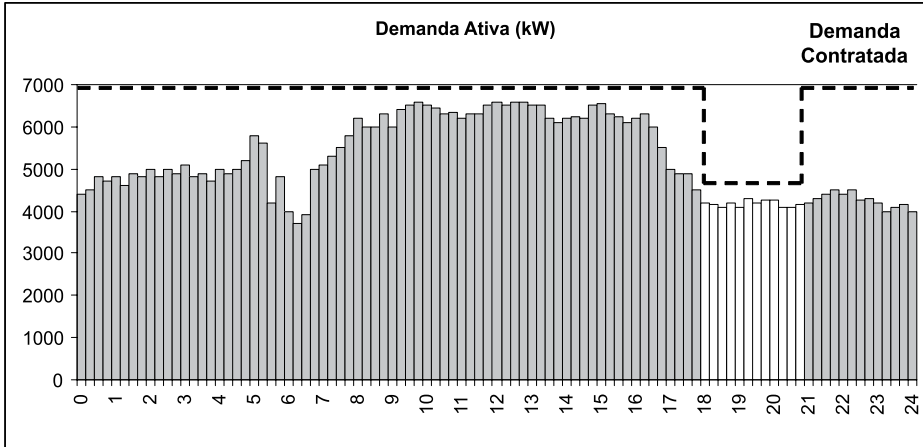


Figura 5.3 – Demanda contratada para a curva de carga da unidade consumidora

5.3.8. Demanda Faturável

É o valor da demanda de potência ativa, identificada de acordo com os critérios estabelecidos e considerada para fins de faturamento, com aplicação da respectiva tarifa, expressa em quilowatts (kW).

5.3.9. Fator de Carga

O Fator de Carga (FC) é a razão entre a demanda média (D_{MED}) e a demanda máxima (D_{MAX}) da unidade consumidora, ocorridas no mesmo intervalo de tempo (Δt) especificado.

$$FC = \frac{D_{MED}}{D_{MAX}} = \frac{D_{MED} \cdot \Delta t}{D_{MAX} \cdot \Delta t} = \frac{kWh}{D_{MAX} \cdot \Delta t}$$

sendo:

$$D_{MED} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} p \cdot dt}{T_2 - T_1}$$

Obs: O FC pode ser calculado considerando um dia, uma semana, um mês, etc.

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram a relação entre a demanda média e a máxima, através das áreas geradas pela curva de carga da unidade consumidora.

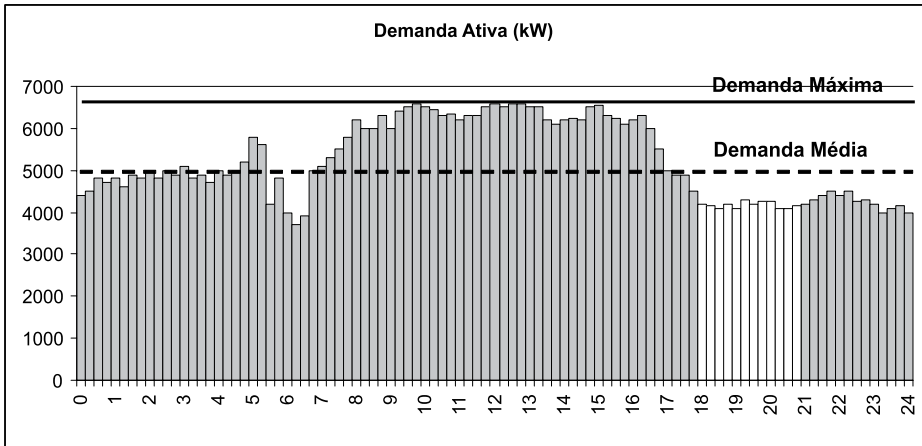


Figura 5.4 – Consumo de Energia baseado na Demanda Média

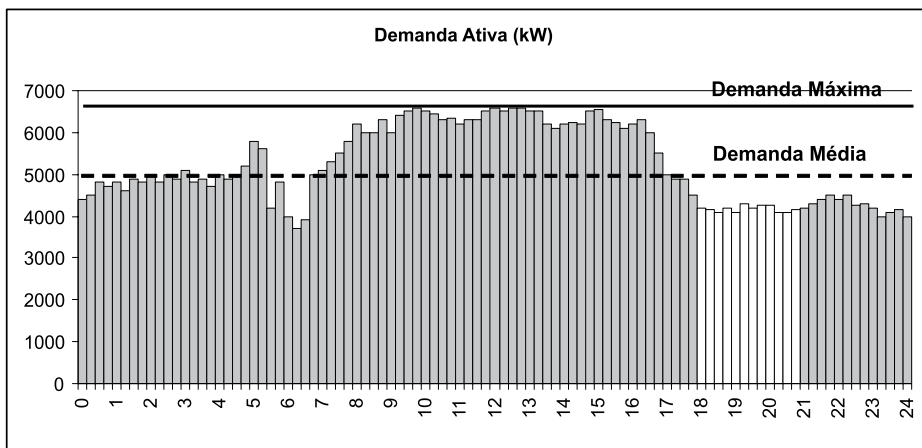


Figura 5.5 – Consumo de Energia baseado na Demanda Máxima

5.3.10. Fator de Potência

O Fator de Potência é a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado.

Pode-se observar que a relação entre o consumo de energia devido à demanda média, pelo consumo de energia devido à demanda máxima, se traduz no Fator de Carga da unidade consumidora.

Verifica-se, então, que o fator de carga pode ser expresso pela relação entre o consumo real de energia e o consumo que haveria se a carga solicitasse, durante todo o tempo, de uma potência constante e igual à demanda máxima. Deve-se procurar trabalhar com um Fator de Carga o mais próximo possível da unidade.

5.3.11. Horários Fora de Ponta e de Ponta

O horário de ponta (P) é o período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, "Corpus Christi", dia de finados e os demais feriados definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico. O horário fora de ponta (F) é o período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta. A Figura 5.6 apresenta um exemplo do exposto.

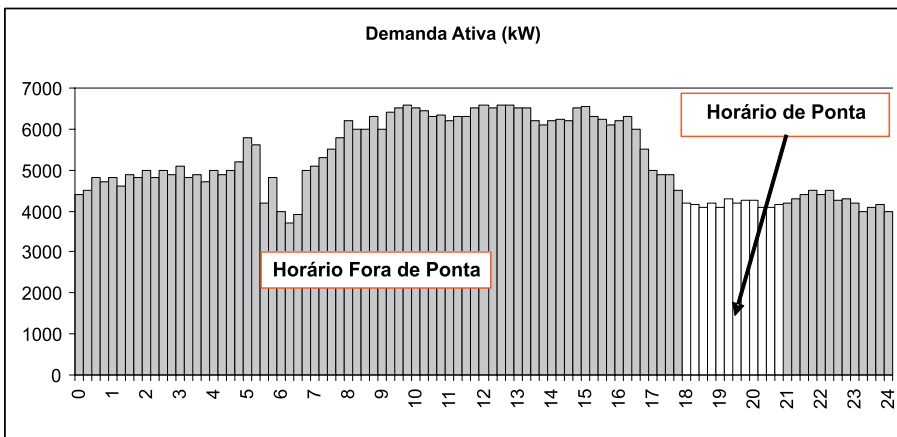


Figura 5.6 – Horários de Ponta e Fora de Ponta para uma unidade consumidora

Estes horários são definidos pela concessionária em virtude, principalmente, da capacidade de fornecimento que a mesma apresenta. A curva de fornecimento de energia típica de uma concessionária pode ser vista através da Figura 5.7, onde o maior valor de demanda ocorre geralmente no horário de ponta.

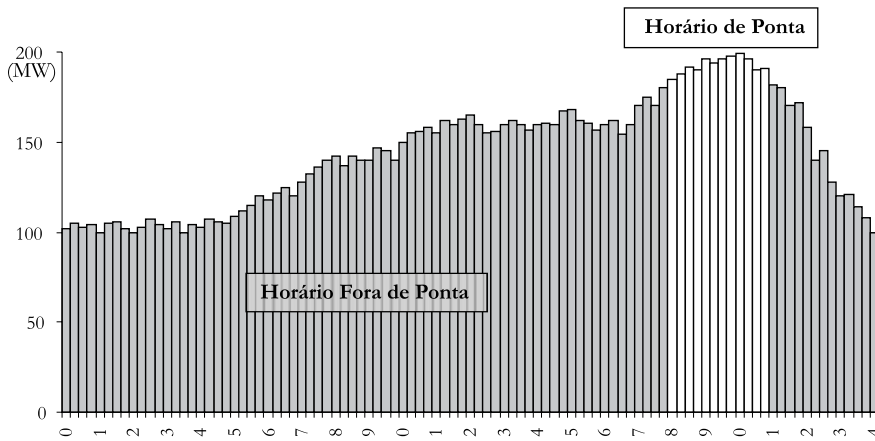


Figura 5.7 – Curva típica de fornecimento de potência de uma concessionária

5.3.12. Períodos Seco e Úmido

Estes períodos guardam, normalmente, uma relação direta com os períodos onde ocorrem as variações de cheias dos reservatórios de água utilizados para a geração de energia elétrica.

O período Seco (S) corresponde ao período de 07 (sete) meses consecutivos iniciando-se em maio e finalizando-se em novembro de cada ano; é, geralmente, o período com pouca chuva. O período Úmido (U) corresponde ao período de 05 (cinco) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte; é, geralmente, o período com mais chuva.

5.3.13. Consumidor

Pessoa física ou jurídica, ou comunhão de fato ou de direito, legalmente representada, que solicitar a concessionária o fornecimento de energia elétrica e assumir a responsabilidade pelo pagamento das faturas e pelas demais obrigações fixadas em normas e regulamentos da ANEEL, assim vinculando-se aos contratos de fornecimento, de uso e de conexão ou de adesão, conforme cada caso.

5.3.14. Unidade Consumidora

Conjunto de instalações e equipamentos elétricos caracterizado pelo recebimento de energia elétrica em um só ponto de entrega, com medição individualizada e correspondente a um único consumidor.

5.4. TENSÃO DE FORNECIMENTO

As Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica são estabelecidas pela Resolução ANEEL nº 456. Neste documento, as unidades consumidoras são divididas em grupos, distinguindo-se uns dos outros pelo nível de tensão de fornecimento, apresentando cada um deles valores definidos de tarifa. Este nível de tensão está relacionado com a carga instalada na unidade consumidora. Competirá a concessionária estabelecer e informar ao interessado a tensão de fornecimento para a unidade consumidora, com observância dos seguintes limites:

I - tensão secundária de distribuição: quando a carga instalada na unidade consumidora for igual ou inferior a 75 kW;

II - tensão primária de distribuição inferior a 69 kV: quando a carga instalada na unidade consumidora for superior a 75 kW e a demanda contratada ou estimada pelo interessado, para o fornecimento, for igual ou inferior a 2.500 kW;

III - tensão primária de distribuição igual ou superior a 69 kV: quando a demanda contratada ou estimada pelo interessado, para o fornecimento, for superior a 2.500 kW.

A empresa concessionária prestadora de serviço público de energia elétrica poderá estabelecer a tensão do fornecimento sem observar os limites de que trata a tabela anterior, quando a unidade consumidora incluir-se em um dos seguintes casos:

I - for atendível, em princípio, em tensão primária de distribuição, mas situar-se em prédio de múltiplas unidades consumidoras predominantemente passíveis de inclusão no critério de fornecimento em tensão secundária de distribuição, conforme o inciso I anterior, e não oferecer condições para ser atendida nesta tensão;

II - estiver localizada em área servida por sistema subterrâneo de distribuição, ou prevista para ser atendida pelo referido sistema de acordo com o plano já configurado no Programa de Obras da concessionária;

III - estiver localizada fora de perímetro urbano;

IV - tiver equipamento que, pelas suas características de funcionamento ou potência, possa prejudicar a qualidade do fornecimento a outros consumidores; e

V - havendo conveniência técnica e econômica para o sistema elétrico da concessionária e não acarretar prejuízo ao interessado.

O responsável por uma unidade consumidora atendível, a princípio, em tensão primária de distribuição, segundo os limites apresentados acima, poderá optar por tensão de fornecimento diferente daquela estabelecida pela concessionária,

desde que, havendo viabilidade técnica do sistema elétrico, assuma os investimentos adicionais necessários ao atendimento no nível de tensão pretendido.

Para fins de faturamento, as unidades consumidoras são agrupadas em dois grupos tarifários, definidos, principalmente, em função da tensão de fornecimento e também, como consequência, em função da demanda. Se a concessionária fornece energia em tensão inferior a 2,3 kV, o consumidor é classificado como sendo do “Grupo B” (baixa tensão); se a tensão de fornecimento for maior ou igual a 2,3 kV, será o consumidor do “Grupo A” (alta tensão). Estes grupos foram assim definidos:

5.4.1. Grupo A

Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo, em caráter opcional, nos termos definidos na Resolução ANEEL nº 456, caracterizado pela estruturação tarifária binômia e subdividido nos subgrupos A1, A2, A3, A3a, A4 e AS. A tabela seguinte apresenta estes subgrupos.

Tabela 5.1 - Tensão de Fornecimento – Grupo A

Subgrupo	Tensão de Fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
AS	Subterrâneo

5.4.2. Grupo B

Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão superior a 2,3 kV e faturadas neste Grupo, nos termos definidos na Resolução ANEEL nº 456, caracterizado pela estruturação tarifária monômia e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo B1 - residencial;
- b) Subgrupo B1 - residencial baixa renda;

- c) Subgrupo B2 - rural;
- d) Subgrupo B2 - cooperativa de eletrificação rural;
- e) Subgrupo B2 - serviço público de irrigação;
- f) Subgrupo B3 - demais classes;
- g) Subgrupo B4 - iluminação pública.

As tarifas aplicáveis aos fornecimentos de energia elétrica para iluminação pública serão estruturadas de acordo com a localização do ponto de entrega, a saber:

- I - Tarifa B4a: aplicável quando o Poder Público for o proprietário do sistema de iluminação pública;
- II - Tarifa B4b: aplicável quando o sistema de iluminação pública for de propriedade da concessionária.

Obs.: Para efeito de aplicação de tarifas, a Resolução ANEEL nº 456 apresenta a classificação das unidades consumidoras com as respectivas classes e subclasses, como por exemplo, unidade consumidora classe Rural e respectiva subclasse Agropecuária.

5.5. ESTRUTURA TARIFÁRIA

A estrutura tarifária é um conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e/ou à demanda de potência ativa, de acordo com a modalidade de fornecimento de energia elétrica.

5.5.1. Estrutura Tarifária Convencional

Esta estrutura é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, independentemente, das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.

5.5.2. Estrutura Tarifária Horo-Sazonal

Esta estrutura tarifária se caracteriza pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir:

- a) **Tarifa Azul:** modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os perí-

odos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia;

b) **Tarifa Verde:** modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência;

c) **Horário de ponta (P):** período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, "Corpus Christi", dia de finados e os demais feriados definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico;

d) **Horário fora de ponta (F):** período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta;

e) **Período úmido (U):** período de 05 (cinco) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte;

f) **Período seco (S):** período de 07 (sete) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

5.5.3. Critérios de Inclusão

Os critérios de inclusão na estrutura tarifária convencional ou horo-sazonal aplicam-se às unidades consumidoras do Grupo "A", conforme as condições apresentadas a seguir, estabelecidas na Resolução ANEEL nº 456.

I - na estrutura tarifária convencional: para as unidades consumidoras atendidas em tensão de fornecimento inferior a 69 kV, sempre que for contratada demanda inferior a 300 kW e não tenha havido opção pela estrutura tarifária horo-sazonal nos termos do item IV;

II - compulsoriamente na estrutura tarifária horo-sazonal, com aplicação da Tarifa Azul: para as unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico interligado e com tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV;

III - compulsoriamente na estrutura tarifária horo-sazonal, com aplicação da Tarifa Azul, ou Verde se houver opção do consumidor: para as unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico interligado e com tensão de fornecimento inferior a 69 kV, quando:

a) a demanda contratada for igual ou superior a 300 kW em qualquer segmento horo-sazonal; ou

b) a unidade consumidora faturada na estrutura tarifária convencional houver apresentado, nos últimos 11 (onze) ciclos de faturamento, 03 (três) registros consecutivos ou 06 (seis) alternados de demandas medidas iguais ou superiores a 300 kW; e

IV - opcionalmente na estrutura tarifária horo-sazonal, com aplicação da Tarifa Azul ou Verde, conforme opção do consumidor: para as unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico interligado e com tensão de fornecimento inferior a 69 kV, sempre que a demanda contratada for inferior a 300 kW.

O consumidor poderá optar pelo retorno à estrutura tarifária convencional, desde que seja verificado, nos últimos 11 (onze) ciclos de faturamento, a ocorrência de 09 (nove) registros, consecutivos ou alternados, de demandas medidas inferiores a 300 kW. Especificamente, para unidades consumidoras classificadas como Cooperativa de Eletrificação Rural, a inclusão na estrutura tarifária horo-sazonal será realizada mediante opção do consumidor.

5.6. FATURAMENTO

A Fatura de energia elétrica é a nota fiscal que apresenta a quantia total que deve ser paga pela prestação do serviço público de energia elétrica, referente a um período especificado, discriminando as parcelas correspondentes. O valor líquido da fatura é o valor em moeda corrente, resultante da aplicação das respectivas tarifas de fornecimento, sem incidência de imposto, sobre os componentes de consumo de energia elétrica ativa, de demanda de potência ativa, de uso do sistema, de consumo de energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes. Para as unidades consumidoras do Grupo B, tem-se um valor mínimo faturável referente ao custo de disponibilidade do sistema elétrico, de acordo com os limites fixados por tipo de ligação.

Segundo a Resolução ANEEL nº 456, a concessionária deve efetuar as leituras, bem como os faturamentos, em intervalos de aproximadamente 30 (trinta) dias, observados o mínimo de 27 (vinte e sete) e o máximo de 33 (trinta e três) dias, de acordo com o calendário respectivo. O faturamento inicial deve corresponder a um período não inferior a 15 (quinze) nem superior a 47 (quarenta e sete) dias.

A concessionária é obrigada a instalar equipamentos de medição nas unidades consumidoras, exceto em casos especiais, definidos na legislação, como por exemplo, para fornecimento destinado para iluminação pública.

O fator de potência das instalações da unidade consumidora, para efeito de faturamento, deverá ser verificado pela concessionária por meio de medição apropriada, observados os seguintes critérios:

I - unidade consumidora do Grupo A: de forma obrigatória e permanente;

II - unidade consumidora do Grupo B: de forma facultativa, sendo admitida a medição transitória, desde que por um período mínimo de 07 (sete) dias consecutivos.

5.6.1. Faturamento de Unidade Consumidora do Grupo B

O faturamento de unidade consumidora do Grupo B realiza-se com base no consumo de energia elétrica ativa, e, quando aplicável, no consumo de energia elétrica reativa excedente. Os valores mínimos faturáveis, referentes ao custo de disponibilidade do sistema elétrico, aplicáveis ao faturamento mensal de unidades consumidoras do Grupo B, serão os seguintes:

I - monofásico e bifásico a 02 (dois) condutores: valor em moeda corrente equivalente a 30 kWh;

II - bifásico a 03 (três) condutores: valor em moeda corrente equivalente a 50 kWh;

III - trifásico: valor em moeda corrente equivalente a 100 kWh.

Os valores mínimos serão aplicados sempre que o consumo, medido ou estimado, for inferior aos referidos acima e quando for constatado, no ciclo de faturamento, consumo medido ou estimado inferior, a diferença resultante não será objeto de futura compensação.

5.6.2. Faturamento de Unidade Consumidora do Grupo A

O faturamento de unidade consumidora do Grupo A, observados, no fornecimento com tarifas horo-sazonais, os respectivos segmentos, será realizado com base nos valores identificados por meio dos critérios descritos a seguir.

I - demanda faturável: um único valor, correspondente ao maior dentre os a seguir definidos.

a) a demanda contratada ou a demanda medida, no caso de unidade consumidora incluída na estrutura tarifária convencional ou horo-sazonal, exceto se classificada como Rural ou reconhecida como sazonal;

b) a demanda medida no ciclo de faturamento ou 10% (dez por cento) da maior demanda medida em qualquer dos 11 (onze) ciclos completos de faturamento anteriores, no caso de unidade consumidora incluída na estrutura tarifária convencional, classificada como Rural ou reconhecida como sazonal;

c) a demanda medida no ciclo de faturamento ou 10% (dez por cento) da demanda

contratada, observada a condição prevista na segunda observação abaixo, no caso de unidade consumidora incluída na estrutura tarifária horo-sazonal, classificada como Rural ou reconhecida como sazonal.

II - consumo de energia elétrica ativa: um único valor, correspondente ao maior dentre os a seguir definidos:

- a) energia elétrica ativa contratada, se houver; ou
- b) energia elétrica ativa medida no período de faturamento.

III - consumo de energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes: quando o fator de potência da unidade consumidora, indutivo ou capacitivo, for inferior a 0,92 (noventa e dois centésimos).

Uma parte da fatura de energia elétrica para a unidade consumidora incluída na estrutura tarifária convencional, pode ser determinada pela equação que segue:

$$VPF = (CF \cdot TC + DF \cdot TD) \cdot \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right)$$

onde

VPF – Valor Parcial da Fatura de energia elétrica (R\$)

CF - Consumo (kWh): é a quantidade de energia elétrica ativa faturada

TC - Tarifa de Consumo (R\$/kWh): é o preço único para o consumo de energia elétrica

DF - Demanda (kW): é a quantidade de demanda faturada

TD - Tarifa de Demanda (R\$/kW): é o valor cobrado por unidade de demanda

ICMS - índice do imposto sobre circulação de mercadorias e serviços.

Observações:

- Para fins de faturamento, na impossibilidade de avaliação do consumo nos horários de ponta e fora de ponta, esta segmentação será efetuada proporcionalmente ao número de horas de cada segmento.

- A cada 12 (doze) meses, a partir da data da assinatura do contrato de fornecimento, deverá ser verificada, por segmento horário, demanda medida não inferior à contratada em pelo menos 3 (três) ciclos completos de faturamento, ou, caso contrário, a concessionária poderá cobrar, complementarmente, na fatura referente ao 12º (décimo segundo) ciclo, as diferenças positivas entre as 3 (três) maiores demandas contratadas e as respectivas demandas medidas.

- Relativamente à unidade consumidora localizada em área servida por sistema subterrâneo ou prevista para ser atendida pelo referido sistema, de acordo com o programa de obras da concessionária, o consumidor poderá optar por faturamento com aplicação das tarifas do Subgrupo AS, desde que o fornecimento seja feito em tensão secundária de distribuição e possa ser atendido um dos seguintes requisitos:

I - verificação de consumo de energia elétrica ativa mensal igual ou superior a 30 MWh em, no mínimo, 3 (três) ciclos completos e consecutivos nos 6 (seis) meses anteriores à opção; ou

II - celebração de contrato de fornecimento fixando demanda contratada igual ou superior a 150 kW.

5.6.2.1. Tarifa Azul

A Tarifa Azul será aplicada considerando a seguinte estrutura tarifária:

I - demanda de potência (kW):

- a) um preço para horário de ponta (P); e
- b) um preço para horário fora de ponta (F).

II - consumo de energia (kWh):

- a) um preço para horário de ponta em período úmido (PU);
- b) um preço para horário fora de ponta em período úmido (FU);
- c) um preço para horário de ponta em período seco (PS); e
- d) um preço para horário fora de ponta em período seco (FS).

Uma parte da fatura de energia elétrica, para a unidade consumidora incluída na estrutura tarifária horo-sazonal azul, é calculada de acordo com as seguintes expressões:

- No período seco

$$VPF = (CF_{fs} \cdot TC_{fs} + CF_{ps} \cdot TC_{ps} + DF_f \cdot TD_f + DF_p \cdot TD_p) \cdot \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right)$$

- No período úmido

$$VPF = (CF_{fu} \cdot TC_{fu} + CF_{pu} \cdot TC_{pu} + DF_f \cdot TD_f + DF_p \cdot TD_p) \cdot \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right)$$

onde

f - índice que indica o horário fora de ponta;

p - índice que indica o horário de ponta;

s - índice que indica o período seco;

u - índice que indica o período úmido;

5.6.2.2. Tarifa Verde

A Tarifa Verde será aplicada considerando a seguinte estrutura tarifária:

I - demanda de potência (kW): um preço único.

II - consumo de energia (kWh):

a) um preço para horário de ponta em período úmido (PU);

b) um preço para horário fora de ponta em período úmido (FU);

c) um preço para horário de ponta em período seco (PS); e

d) um preço para horário fora de ponta em período seco (FS).

Uma parte da fatura de energia elétrica para a unidade consumidora incluída na estrutura tarifária horo-sazonal verde é calculado de acordo com as seguintes expressões:

- No período seco

$$VPF = (CF_{fs} \cdot TC_{fs} + CF_{ps} \cdot TC_{ps} + DF \cdot TD) \cdot \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right)$$

- No período úmido

$$VPF = (CF_{fu} \cdot TC_{fu} + CF_{pu} \cdot TC_{pu} + DF \cdot TD) \cdot \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right)$$

Observações:

- A ANEEL pode autorizar, mediante fundamentada justificativa técnica da concessionária, a adoção de horários de ponta ou de fora de ponta e de períodos úmidos ou secos diferentes daqueles estabelecidos (itens 5.3.11 e 5.3.12), em decorrência das características operacionais do subsistema elétrico de distribuição ou da necessidade de estimular o consumidor a modificar o perfil de consumo e/ou demanda da unidade consumidora.

- Com o propósito de permitir o ajuste da demanda a ser contratada, a concessionária

ria deve oferecer ao consumidor um período de testes, com duração mínima de 03 (três) ciclos consecutivos e completos de faturamento, durante o qual será faturável a demanda medida, observados os respectivos segmentos horo-sazonais, quando for o caso. A concessionária pode dilatar o período de testes mediante solicitação fundamentada do consumidor.

5.6.2.3. Tarifa de Ultrapassagem

Sobre a parcela da demanda medida, que superar a respectiva demanda contratada, será aplicada uma tarifa com valor majorado, denominada tarifa de ultrapassagem, caso aquela parcela seja superior aos limites mínimos de tolerância a seguir fixados:

I - 5% (cinco por cento) para unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV; e

II - 10% (dez por cento) para unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento inferior a 69 kV.

Esta tarifa de ultrapassagem aplicável a unidade consumidora faturada na estrutura tarifária convencional, será correspondente a 3 (três) vezes o valor da tarifa normal de fornecimento. Quando inexistir o contrato por motivo atribuível exclusivamente ao consumidor e o fornecimento não estiver sendo efetuado no período de testes, a concessionária aplicará a tarifa de ultrapassagem sobre a totalidade da demanda medida. O faturamento da ultrapassagem da demanda (FDU) será feito segundo as seguintes expressões:

a) Tarifa Azul

- Ultrapassagem na Ponta: $FDU_p = (DM_p - DC_p) \times TU_p$ (R\$)

- Ultrapassagem Fora da Ponta: $FDU_f = (DM_f - DC_f) \times TU_f$ (R\$)

b) Tarifa Verde

$$FDU = (DM - DC) \times TU \quad (\text{R\$})$$

onde:

DM - demanda medida (kW);

DC - demanda contratada (kW);

TU - tarifa de ultrapassagem (R\$/kW);

p - índice que indica horário de ponta;

f - índice que indica horário fora de ponta.

Resumo do Faturamento Tarifário

	AZUL	VERDE	CONVENCIONAL
Demanda (kW)	Um preço para ponta Um preço para fora de ponta	Preço único	Preço único
Consumo (kWh)	Um preço - ponta - período úmido Um preço - fora de ponta - período úmido Um preço - ponta - período seco Um preço - fora de ponta - período seco		Preço único

5.7. ETST - ENERGIA TEMPORÁRIA PARA SUBSTITUIÇÃO

É a energia suplementar à energia firme, ocasionalmente, disponível em sistemas de origem hidráulica, em decorrência de condições favoráveis, podendo seu fornecimento ser interrompido, a qualquer momento, por períodos e critérios estabelecidos contratualmente.

Destina-se à unidades consumidoras atendidas em tensão superior a 2,3 kV ou sistema subterrâneo, Grupo A e Subgrupo AS respectivamente, para uso exclusivo em processos bienergéticos, em substituição a outras fontes energéticas. Caso a ETST esteja disponível, é necessário encaminhar uma solicitação à concessionária com as seguintes informações:

- Cronograma de demandas em função da entrada em operação dos equipamentos, sendo que os valores poderão ser, no máximo iguais à potência nominal desses equipamentos.
- Montante mensal de energia elétrica a ser contratado deverá ser estabelecido em função do regime operativo do equipamento elétrico, sendo que o valor máximo não poderá exceder ao calculado, conforme a expressão a seguir:

$$EE = kW \times 665 \text{ horas}$$

onde:

EE - montante máximo mensal de energia elétrica a ser contratada;

kW - demanda contratada; e

665 - número médio de horas mensal do segmento fora de ponta.

- a quantidade, tipo e as características dos equipamentos que serão substituídos e/ou evitados, bem como os instalados.
- a quantidade mensal e tipo dos insumos energéticos que deixarão de ser utilizados.

5.8. ICMS: COBRANÇA E SUA APLICAÇÃO

O Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços - ICMS incidente sobre o fornecimento de energia elétrica é um imposto onde as suas alíquotas são definidas em lei estadual. Cabe à concessionária, na qualidade de contribuinte legal e substituto tributário do referido imposto, dentro de sua área de concessão, apenas a tarefa de recolher ao Erário Estadual as quantias cobradas nas Faturas de Energia Elétrica. O ICMS é devido por todos os consumidores.

O cálculo do ICMS é efetuado de forma onde o montante do imposto integra a sua própria base de cálculo (cálculo por dentro). Para operacionalizar o cálculo é adotada a fórmula abaixo, definida pelo Conselho de Política Fazendária - Confaz:

$$\text{ICMS} = F \cdot \left[\left(\frac{1}{1 - X} \right) - 1 \right]$$

onde:

F - Fornecimento

X - Alíquota / 100

5.9. COBRANÇA DE MULTA E SEU PERCENTUAL

Na hipótese de atraso no pagamento da fatura, sem prejuízo de outros procedimentos previstos na legislação aplicável, será cobrada multa limitada ao percentual máximo de 2 % (dois por cento) sobre o valor total da fatura em atraso, cuja cobrança não poderá incidir sobre o valor da multa eventualmente apresentada na fatura anterior. O mesmo percentual incidirá sobre a cobrança de outros serviços prestados, exceto quando o contrato entre o consumidor e o prestador do serviço estipular percentual menor.

5.10. FATOR DE POTÊNCIA OU ENERGIA REATIVA EXCEDENTE

As mudanças ocorridas com o Fator de Potência tiveram início na Portaria DNAEE nº 1569, de 23/12/1993 e, atualmente, estão consolidadas na Resolução ANEEL nº 456, de 29 de novembro de 2000. O fator de potência (FP) é um índice que reflete como a energia está sendo utilizada, mostrando a relação entre a energia realmente útil (ativa – W) e a energia total (aparente – VA), fornecida pelo sistema elétrico.

A resolução fixa o fator de potência de referência “fr”, indutivo ou capacitivo, em 0,92 o limite mínimo permitido para as instalações elétricas das unidades consumi-

doras. Para as unidades consumidoras do Grupo A, a medição do FP será obrigatória e permanente, enquanto que para aquelas do Grupo B, a medição será facultativa.

A energia reativa capacitiva passa a ser medida e faturada. Sua medição será feita no período entre 23 h e 30 min e 6 h e 30 min e a medição da energia reativa indutiva passa a ser limitada ao período diário complementar.

O faturamento correspondente ao consumo de energia elétrica e à demanda de potência reativas excedentes pode ser feito de duas formas distintas:

- **Por avaliação horária:** através de valores de energia ativa e reativa medidas de hora em hora durante o ciclo de faturamento, obedecendo aos períodos para verificação das energias reativas indutiva e capacitiva.

- **Por avaliação mensal:** através de valores de energia ativa e reativa medidas durante o ciclo de faturamento.

Os novos critérios para faturamento regulamentam a cobrança de excedente de energia reativa abandonando a figura do “ajuste por baixo fator de potência” a qual sempre se associou a idéia de multa. O excedente de reativo indutivo ou capacitivo, que ocorre quando o fator de potência indutivo ou capacitivo é inferior ao fator de potência de referência, 0,92, é cobrado utilizando-se as tarifas de fornecimento de energia ativa. Surge então o conceito de energia ativa reprimida, ou seja, a cobrança pela circulação de excedente de reativo no sistema elétrico.

5.10.1. Faturamento do Fator de Potência por Posto Horário

Para unidade consumidora faturada na estrutura tarifária horo-sazonal ou na estrutura tarifária convencional com medição apropriada, o faturamento correspondente ao consumo de energia elétrica e à demanda de potência reativas excedentes será calculado de acordo com as seguintes fórmulas:

$$I - FER(p) = \sum_{t=1}^n \left[CA_t \times \left(\frac{fr}{ft} - 1 \right) \right] \times TCA(p),$$

$$II - FDR(p) = \left[\max_{t=1}^n \left(DA_t \times \frac{fr}{ft} \right) - DF(p) \right] \times TDA(p),$$

onde:

FER(p) - valor do faturamento, por posto horário “p”, correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “fr”, no período de faturamento;

CA_t - consumo de energia ativa medida em cada intervalo de 1 (uma) hora "t", durante o período de faturamento;

fr - fator de potência de referência igual a 0,92;

ft - fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo "t" de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento, considerando as definições dispostas na observação 1 apresentada neste item;

TCA(p) - tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento em cada posto horário "p";

FDR(p) - valor do faturamento, por posto horário "p", correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência "fr" no período de faturamento;

DAt - demanda medida no intervalo de integralização de 1 (uma) hora "t", durante o período de faturamento;

DF(p) - demanda faturável em cada posto horário "p" no período de faturamento;

TDA(p) - tarifa de demanda de potência ativa aplicável ao fornecimento em cada posto horário "p";

MAX - função que identifica o valor máximo da fórmula, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto horário "p";

t - indica intervalo de 1 (uma) hora, no período de faturamento;

p - indica posto horário, ponta ou fora de ponta, para as tarifas horo-sazonais ou período de faturamento para a tarifa convencional; e

n - número de intervalos de integralização "t", por posto horário "p", no período de faturamento.

Observações:

1. Nas fórmulas FER(p) e FDR(p) serão considerados:

a) durante o período de 6 horas consecutivas, compreendido, a critério da concessionária, entre 23 h e 30 min e 06h e 30 min, apenas os fatores de potência "ft" inferiores a 0,92 capacitivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "t"; e

b) durante o período diário complementar ao definido na alínea anterior, apenas os fatores de potência "ft" inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "t".

2. O período de 6 (seis) horas definido na alínea "a" do parágrafo anterior deverá ser informado pela concessionária aos respectivos consumidores com antecedência mínima de 1 (um) ciclo completo de faturamento.

3. Havendo montantes de energia elétrica estabelecidos em contrato, o faturamento correspondente ao consumo de energia reativa, verificada por medição apropriada, que exceder às quantidades permitidas pelo fator de potência de referência "fr", será calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$FER(p) = \left[\left(\sum_{t=1}^n \frac{CA_t \times fr}{f_t} \right) - CF(p) \right] \times TCA(p)$$

onde:

FER(p) - valor do faturamento, por posto horário "p", correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência "fr", no período de faturamento;

CA_t - consumo de energia ativa medida em cada intervalo de 1 (uma) hora "t", durante o período de faturamento;

fr - fator de potência de referência igual a 0,92;

f_t - fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo "t" de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento, considerando as definições dispostas na observação 1 apresentada neste item;

CF(p) - consumo de energia elétrica ativa faturável em cada posto horário "p" no período de faturamento; e

TCA(p) - tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento em cada posto horário "p".

5.10.2. Faturamento do Fator de Potência por Valor Médio

Para unidade consumidora faturada na estrutura tarifária convencional, enquanto não forem instalados equipamentos de medição que permitam a aplicação das fórmulas apresentadas no item 10.1, a concessionária poderá realizar o faturamento de energia e demanda de potência reativas excedentes utilizando as seguintes fórmulas:

$$I - FER = CA \times \left(\frac{fr}{fm} - 1 \right) \times TCA ,$$

$$II - FDR = \left(DM \times \frac{fr}{fm} - DF \right) \times TDA$$

onde:

FER - valor do faturamento total correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, no período de faturamento;

CA - consumo de energia ativa medida durante o período de faturamento;

fr - fator de potência de referência igual a 0,92;

fm - fator de potência indutivo médio das instalações elétricas da unidade consumidora, calculado para o período de faturamento;

TCA - tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento;

FDR - valor do faturamento total correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, no período de faturamento;

DM - demanda medida durante o período de faturamento;

DF - demanda faturável no período de faturamento; e

TDA - tarifa de demanda de potência ativa aplicável ao fornecimento.

Observação:

1. Havendo montantes de energia elétrica estabelecidos em contrato, o faturamento correspondente ao consumo de energia reativa, verificada por medição apropriada, que exceder às quantidades permitidas pelo fator de potência de referência "fr", será calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$FER = \left(CA \times \frac{fr}{fm} - CF \right) \times TCA'$$

onde:

FER - valor do faturamento total correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, no período de faturamento;

CA - consumo de energia ativa medida durante o período de faturamento;

fr - fator de potência de referência igual a 0,92;

fm - fator de potência indutivo médio das instalações elétricas da unidade consumidora, calculado para o período de faturamento;

CF - consumo de energia elétrica ativa faturável no período de faturamento; e

TCA - tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento.

5.10.3. Faturamento do Fator de Potência com base em Medição Transitória

Para unidade consumidora do Grupo B, cujo fator de potência tenha sido verificado por meio de medição transitória (desde que por um período mínimo de 07 (sete) dias consecutivos), o faturamento correspondente ao consumo de energia elétrica reativa indutiva excedente só poderá ser realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

I - a concessionária deverá informar ao consumidor, via correspondência específica, o valor do fator de potência encontrado, o prazo para a respectiva correção, a possibilidade de faturamento relativo ao consumo excedente, bem como outras orientações julgadas convenientes;

II - a partir do recebimento da correspondência, o consumidor disporá do prazo mínimo de 90 (noventa) dias para providenciar a correção do fator de potência e comunicar à concessionária;

III - findo o prazo e não adotadas as providências, o fator de potência verificado poderá ser utilizado nos faturamentos posteriores até que o consumidor comunique a correção do mesmo; e

IV - a partir do recebimento da comunicação do consumidor, a concessionária terá o prazo de 15 (quinze) dias para constatar a correção e suspender o faturamento relativo ao consumo excedente.

5.10.4. Outras Considerações sobre o Fator de Potência

A concessionária deverá conceder um período de ajustes, com duração mínima de 03 (três) ciclos consecutivos e completos de faturamento, objetivando permitir a adequação das instalações elétricas da unidade consumidora, durante o qual o faturamento será realizado com base no valor médio do fator de potência, conforme disposto no item 5.10.2, quando ocorrer:

I - pedido de fornecimento novo passível de inclusão na estrutura tarifária horo-sazonal;

II - inclusão compulsória na estrutura tarifária horo-sazonal, conforme disposto no inciso III, item 5.5.3; ou

III - solicitação de inclusão na estrutura tarifária horo-sazonal decorrente de opção de faturamento ou mudança de Grupo tarifário.

A concessionária poderá dilatar o período de ajustes mediante solicitação fundamentada do consumidor. Durante o período de ajustes aqui mencionado, a concessionária informará ao consumidor os valores dos faturamentos que seriam

efetivados e correspondentes ao consumo de energia elétrica e a demanda de potência reativas excedentes, calculados nos termos do item 5.10.1.

Para fins de faturamento de energia e demanda de potência reativas excedentes serão considerados, somente, os valores ou parcelas positivas das mesmas. Nos faturamentos relativos à demanda de potência reativa excedente não serão aplicadas as tarifas de ultrapassagem.

5.11. ANÁLISE DO PERFIL DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

Com a possibilidade de reduções na carga total instalada, a partir do aumento de eficiência dos sistemas consumidores instalados, deve-se, também, considerar a otimização da demanda de potência em função de níveis mais baixos de consumo de kWh.

Outras possibilidades de otimização devem ser consideradas, tais como a análise da opção tarifária e a correção do fator de potência.

5.11.1. Otimização da Demanda de Potência

A análise da demanda tem por objetivo a sua adequação às reais necessidades da unidade consumidora. São analisadas as demandas de potência contratada, medidas e as efetivamente faturadas. A premissa básica é a de se procurar reduzir ou mesmo eliminar as ociosidades e ultrapassagens de demanda.

Assim, a unidade consumidora estará trabalhando adequadamente quando os valores de demanda de potência registrados, contratados e faturados tiverem o mesmo valor, ou, pelo menos, apresentarem valores próximos, pois assim estará pagando por aquilo que realmente necessita. As Figuras 5.8 e 5.9 exemplificam o exposto.

Deve-se, nesse ponto, considerar a possibilidade de reduções nas demandas contratadas em função de alterações nos principais sistemas consumidores, com a redução das cargas instaladas e a introdução de controles automatizados para a modulação ótima da carga. Para assegurar mínimas despesas mensais com a Fatura de Energia Elétrica, é fundamental a escolha dos valores para as demandas a serem contratadas junto às concessionárias de eletricidade, que devem ser adequados às reais necessidades da empresa. Esse procedimento deve ser observado tanto quando se faz a opção pela estrutura tarifária, como na renovação periódica do contrato.

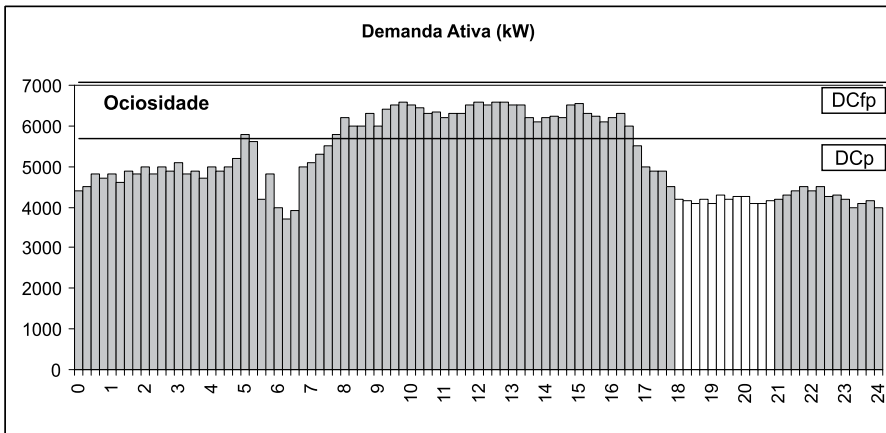


Figura 5.8 – Contrato ocioso de demanda

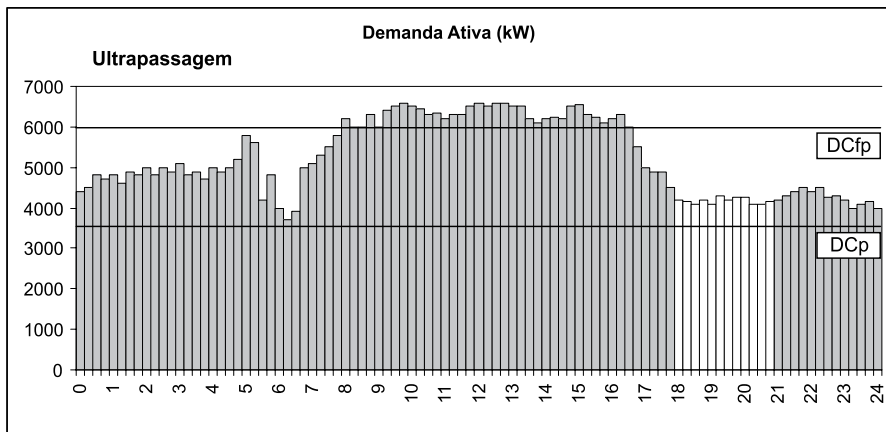


Figura 5.9 – Contrato insuficiente de demanda

A importância na fixação de valores adequados de contrato reside em dois pontos importantes da legislação:

- se a demanda solicitada for inferior à contratada, será faturada a demanda contratada;
- nos contratos de tarifas horo-sazonais, serão aplicadas as tarifas de ultrapassagem, caso a demanda registrada ultrapasse a contratada em percentuais superiores aos limites estabelecidos.

Dessa forma, se as demandas contratadas não forem aquelas realmente necessárias e suficientes para cada segmento horário, haverá elevação desnecessária dos custos com energia elétrica.

O super ou subdimensionamento das demandas contratadas geram aumentos de custos que podem e devem ser evitados. O ideal é ser sempre faturado pelo valor efetivamente utilizado em cada ciclo de faturamento.

Outro ponto importante é que, uma vez fixado os valores de contrato, deve-se supervisionar e controlar o consumo de energia de forma a evitar que algum procedimento inadequado venha a provocar uma elevação desnecessária da demanda. Para as empresas, onde a demanda registrada varia muito ao longo do tempo, pode ser conveniente a instalação de um sistema automático de supervisão e controle da demanda.

5.11.2. Análise de Opção Tarifária

A otimização tarifária é a escolha da tarifa mais conveniente para a unidade consumidora, considerando-se o seu regime de funcionamento, as características do seu processo de trabalho, bem como a oportunidade/possibilidade de se fazer modulação de carga. A simulação realizada com os dados obtidos nas contas de energia elétrica confirma, ou não, a tarifa utilizada como a mais conveniente, e com os fatores de carga vigentes e a legislação tarifária em vigor, aponta a tarifa que proporciona o menor custo médio. Conforme visto anteriormente, a estrutura tarifária brasileira atual oferece várias modalidades de tarifas, as quais, em função das características do consumo de cada empresa, apresentam maiores ou menores vantagens, em termos de redução de despesas com energia.

Não se podem fixar regras definidas para esta escolha, devendo ser desenvolvida uma análise detalhada do uso de energia elétrica, identificando-se as horas do dia de maior consumo e as flutuações de consumo ao longo do ano.

No entanto, é possível dizer que as tarifas horo-sazonais apresentam maiores possibilidades para gerenciamento das despesas com energia, permitindo obter menores custos, desde que se possam minimizar, ou mesmo evitar, o consumo e a demanda nos horários de ponta.

De maneira geral, para determinar o melhor sistema de tarifação, é preciso considerar:

- os valores médios mensais de consumo e de demanda em cada um dos segmentos de ponta e fora de ponta;
- os valores médios mensais a serem faturados em cada um dos segmentos horo-sazonais, ou os valores respectivos de demanda e consumo para tarifação convencional; e, também, os valores de ultrapassagem que porventura ocorram;
- as possibilidades de deslocamento do horário de trabalho de diversos equipamentos para minimizar o consumo e a demanda no segmento de ponta;

- as despesas mensais com cada um dos sistemas tarifários.

Considere uma unidade consumidora que apresente demanda contratada inferior a 300 kW e tenha o fornecimento de energia em tensão primária abaixo de 69 kV. Conforme apresentado nos Critérios de Inclusão das estruturas tarifárias, esta é uma condição que permite o maior número de opções, podendo ser convencional, horo-sazonal azul ou horo-sazonal verde. Os custos com energia reativa excedente, com ultrapassagem de demanda e com a ociosidade de demanda contratada devem ser analisados complementarmente à opção tarifária, pois todos eles são custos indesejáveis a uma unidade consumidora.

Partindo-se então do princípio que a demanda contratada estará próxima da demanda registrada, respeitando os limites de ultrapassagem, pode-se iniciar a análise com os dados dos registros de demanda e energia medidos. Se a unidade consumidora ainda fizer parte do sub-grupo B3, comercial, por exemplo, e a medição de uma curva de carga típica diária indicar que há uma demanda registrada inferior a 300 kW, também haverá a possibilidade de migração para o grupo A, desde que seja realizado um investimento numa cabine de transformação, o que deverá ser descontado do benefício obtido com a mudança da tarifa.

Considerando como referência um consumidor comercial que esteja localizado dentro da área de concessão de uma certa concessionária da região sudeste, onde, conforme a Resolução Homologatória da ANEEL de julho de 2006 aplicam-se as seguintes tarifas média no período de 04 de julho de 2006 a 03 de julho de 2007. Na análise tarifária haverá incidência de impostos (ICMS, PIS e COFINS).

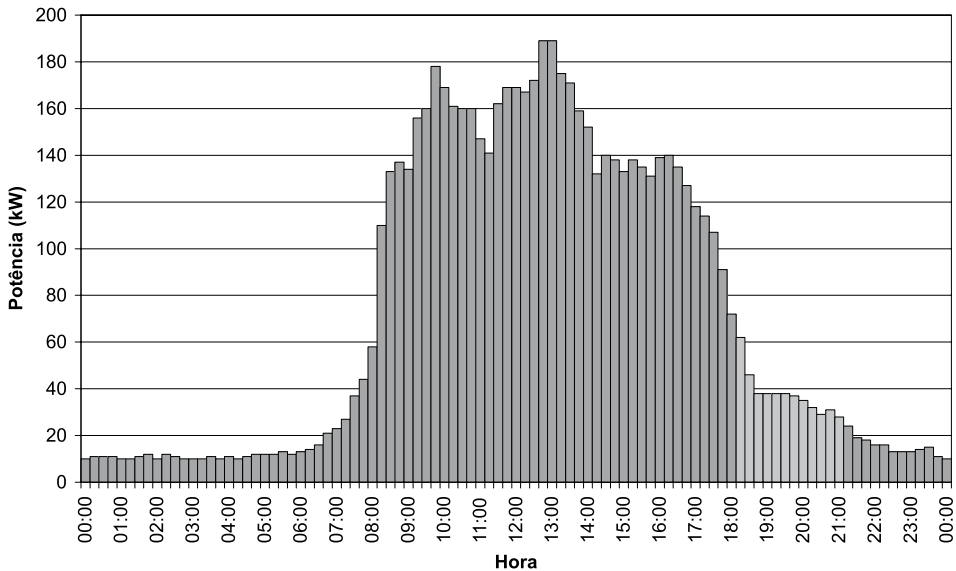
SUB-GRUPO A4					
Convencional		Azul		Verde	
160,86	R\$/MWh	144,39	R\$/MWh fora ponta	144,39	R\$/MWh fora ponta
34,00	R\$/kW	237,31	R\$/MWh ponta	771,32	R\$/MWh ponta
		8,78	R\$/kW	8,78	R\$/kW fora ponta
		32,17	R\$/kW ponta		

SUB-GRUPO B3		SUB-GRUPO A3a			
Comercial		Azul		Verde	
293,35	R\$/MWh	144,10	R\$/MWh fora ponta	144,10	R\$/MWh fora ponta
		236,68	R\$/MWh ponta	606,66	R\$/MWh ponta
		5,63	R\$/kW	5,63	R\$/kW fora ponta
		22,67	R\$/kW ponta		

A análise tarifária mostra-se como opção de redução do custo médio da energia da mesma forma que a correção do fator de potência ou a otimização da demanda contratada eliminando ultrapassagens ou ociosidades. Como poderão ser notadas em outras análises tarifárias, as diferenças das tarifas de uma região para outra, frente às revisões e ao realinhamento tarifário mostrarão que os resultados podem ser diferentes.

Ações de gerenciamento energético como a modulação de carga e a substituição do suprimento no horário de ponta, bem como ações de eficiência energética como a substituição tecnológica em usos finais, muitas vezes dependerão dos resultados obtidos numa recontração de demanda.

Caso 1: Uma unidade consumidora com atividade que tenha um funcionamento típico no horário comercial conforme a curva de carga a seguir.



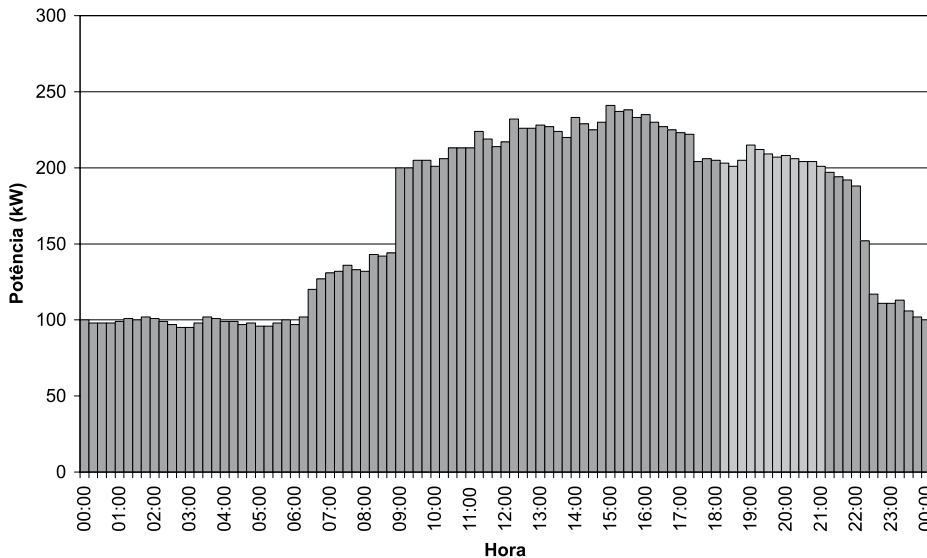
Partindo do princípio que a curva de carga acima representa um comportamento típico da unidade consumidora, pode-se dizer que o faturamento mensal dividido adequadamente em horários de ponta e fora de ponta terá um consumo total de 50.722 kWh e uma demanda de 189 kW.

Demanda Registrada	FP	189	kW
	P	72	kW
Energia consumida	FP	48.405	kWh/mês
	P	2.728	kWh/mês

Aplicando-se as tarifas acima poderá ser observado que para este consumidor será mais vantajoso mudar do sub-grupo B3 para o A4 horo-sazonal verde, reduzindo os custos mensais em aproximadamente R\$5.745,00 reais.

		SUB-GRUPO B3	SUB-GRUPO A4			
		Comercial	Convencional	Azul	Verde	
Custo com Demanda	FP		8.511,26	2.197,91	2.197,91	R\$
	P			3.067,87		R\$
Custo com Energia	FP	19.867,37	10.894,38	9.257,00	9.257,00	R\$
	P		857,45	2.786,97	R\$	
Custo Total	T	19.867,37	19.405,63	15.380,23	14.241,88	R\$

Caso 2: Uma unidade consumidora com atividade do tipo comércio varejista que tenha um perfil típico conforme a curva de carga a seguir.



Para esta curva típica o consumo total de energia no mês será de 115.487 kWh, a demanda no horário fora de ponta será de 241 kW e a demanda no horário de ponta de 215 kW.

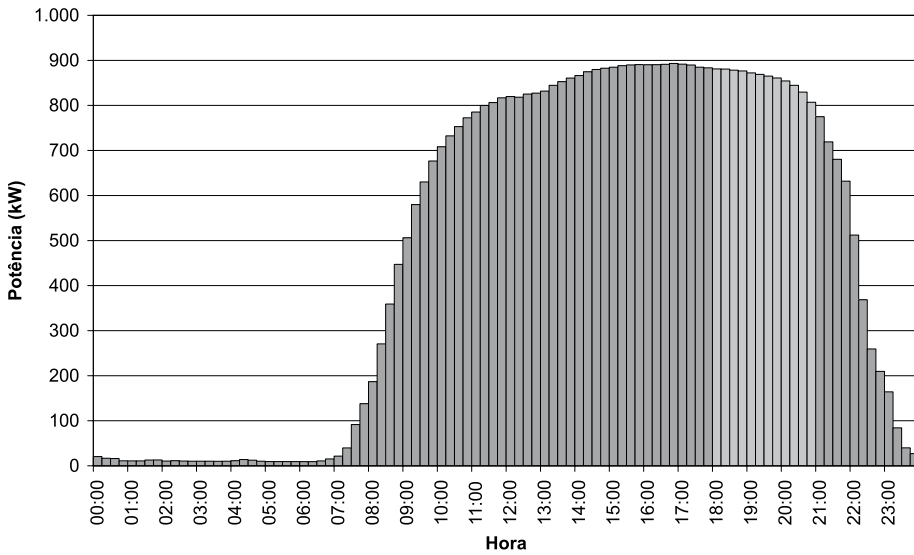
Demanda Registrada	FP	241	kW
	P	215	kW
Energia consumida	FP	102.308	kWh/mês
	P	13.635	kWh/mês

Neste caso a opção tarifária que começa ser mais interessante é a convencional do mesmo sub-grupo A4, representando uma economia de aproximadamente R\$9.413,00 mensais.

		SUB-GRUPO B3	SUB-GRUPO A4			
		Comercial	Convencional	Azul	Verde	
Custo com Demanda	FP		10.852,98	2.802,62	2.802,62	R\$
	P			9.160,99		R\$
Custo com Energia	FP	45.048,46	24.702,56	19.565,35	19.565,35	R\$
	P			4.285,52	13.929,25	R\$
Custo total	T	45.048,46	35.555,54	35.814,49	36.297,22	R\$

Para ambos os casos são interessantes avaliar a possibilidade de contratação de demandas diferentes para os períodos seco e úmido, o que poderá no caso 1 reduzir mais os custos e no caso 2 viabilizar a contratação na estrutura tarifária horo-sazonal azul. A viabilização desta mudança tarifária, quando se migra da baixa tensão para a alta tensão, depende do investimento em uma cabine primária de transformação que pode ser paga no curto prazo refletindo uma economia grande no médio e longo prazo.

Caso 3: Considere um sistema de ar condicionado com demanda igual a 900 kW que opera durante o período de funcionamento, por exemplo, de um shopping center, onde a tensão de fornecimento é igual a 34,5 kV.



Nesta situação a demanda no horário de ponta e fora de ponta são muito próximas e o consumo total mensal é de 325.027 kWh.

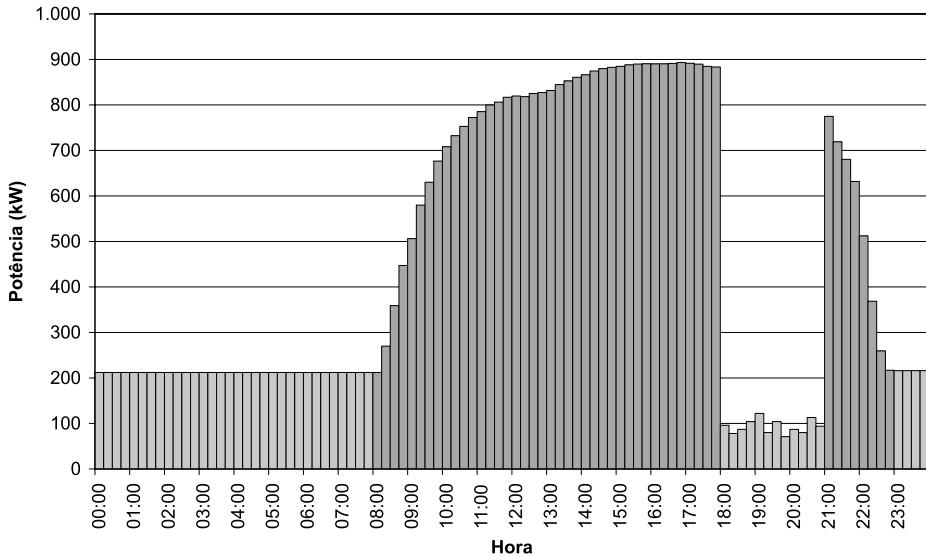
Demanda registrada	FP	893	kW
	P	881	kW
Energia consumida	FP	268.272	kWh/mês
	P	56.755	kWh/mês

Para o nível de tensão de fornecimento igual a 34,5 kV as tarifas aplicáveis são do sub-grupo A3a. Como a demanda é superior a 300 kW se aplicam compulsoriamente a tarifa horo-sazonal azul ou opcionalmente a horo-sazonal verde.

		SUB-GRUPO A3a		
		Azul	Verde	
Custo com Demanda	FP	6.660,34	6.660,34	R\$
	P	26.455,97		R\$
Custo com Energia	FP	51.202,28	51.202,28	R\$
	P	17.791,77	45.604,32	R\$
Custo Total	T	102.110,36	103.466,94	R\$

Para este perfil de consumo diário os custos mensais serão menores quando aplicada a estrutura tarifária horo-sazonal azul. No entanto, se houver um investi-

mento numa instalação de um sistema de termoacumulação de água gelada ou gelo, quase a totalidade da carga no horário de ponta poderá ser deslocada para o horário fora de ponta onde a tarifa é menor. Nesta nova situação a curva de carga ficaria aproximadamente como mostrada a seguir, mantendo o mesmo consumo total anterior de 325.027 kWh/mês.



Na situação real haverá variação da potência registrada no horário de ponta o que necessita uma contratação no horário de ponta que atenda a operação do sistema sem ultrapassagem. A diferença do custo desta demanda na opção horo-sazonal azul e do custo do consumo na opção horo-sazonal verde é o que viabilizará a opção tarifária horo-sazonal verde, como demonstrado a seguir. Contratualmente também será uma boa opção, pois haverá uma demanda única a ser contratada.

Demanda Registrada	FP	893	kW
	P	122	kW
Energia Consumida	FP	318.889	kWh/mês
	P	6.138	kWh/mês

		SUB-GRUPO A3a		
		Azul	Verde	
Csuto com Demanda	FP	6.660,34	6.660,34	R\$
	P	3.663,23		R\$
Custo com Energia	FP	60.863,05	60.863,05	R\$
	P	1.924,15	4.932,03	R\$
Custo Total	T	102.110,36	103.466,94	R\$

A redução de custo total com esta modulação de carga e mudança tarifária será de aproximadamente R\$356 mil por ano, que poderá ser investido no novo sistema de termoacumulação.

5.11.3. Correção do Fator de Potência

Alguns aparelhos elétricos, como os motores e transformadores, além de consumirem energia ativa, solicitam também energia reativa necessária para criar o fluxo magnético que seu funcionamento exige.

Com base na relação entre a energia reativa e ativa, determina-se o fator de potência indutivo médio num determinado período.

A análise das contas de energia elétrica aponta um fator de potência médio, na ponta e fora de ponta, que comparado aos 0,92, aponta ou não para a necessidade da implantação de medidas corretivas, tais como:

- instalação de banco de capacitores estáticos ou automáticos;
- através de motores síncronos;
- aumento do consumo de energia ativa.

Quando o fator de potência é inferior a 0,92, o total desembolsado a título de consumo de excedente reativo se constituirá num potencial de economia que poderá ser obtido através das medidas citadas.

5.12. A IMPORTÂNCIA DOS INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

De uma maneira geral, pode-se afirmar que a eficiência energética aumenta quando se consegue realizar um serviço e/ou produzir um bem com uma quantidade de energia inferior a que era usualmente consumida. Para se poder quantificar

esta melhoria utiliza-se os chamados indicadores de eficiência energética. Dentre os mais comuns e os que apresentam maior utilização, pode-se destacar:

- Consumo específico de energia (CE);
- Fator de Carga da Instalação (FC);
- Custo Médio de Energia.

5.12.1. Consumo Específico de Energia (CE)

A análise do consumo de energia (kWh) ou da carga instalada (kW) em relação ao produto gerado, serviço prestado ou à área ocupada produz indicadores de desempenho passíveis de comparação à padrões estabelecidos no país e no exterior. Em relação à área ocupada, o índice W/m² é determinado e comparado com as edificações tipológicas e funcionalmente semelhantes, mas, com diferentes níveis de eficiência. Pode-se, dessa forma, projetar padrões muito mais eficientes de consumo de energia elétrica, considerando-se a utilização de produtos e processos de melhor desempenho energético. Para o cálculo do consumo específico de energia (CE), faz-se:

$$CE_i = \frac{CA_i}{QP_i}$$

sendo

CA – o consumo mensal de energia dado em kWh/mês;

QP – a quantidade de produto ou serviço produzido no mês pela unidade consumidora;

i - índice referente ao mês de análise do histórico de dados.

Torna-se importante ressaltar que o consumo mensal de energia (CA) deve coincidir com o período da quantidade de produto ou serviço produzido no mês (QP). Isto para que não se obtenha resultados incorretos. Torna-se, portanto, importante saber qual o exato período de medição do consumo de energia e a real quantidade produzida neste mesmo período.

5.12.2. Custo médio de Energia e Fator de Carga da Instalação

O custo médio de energia elétrica depende grandemente da forma como ela é utilizada. Se estiver sendo usada eficientemente, seu custo médio é menor e, ao contrário, se o uso não é eficiente.

O fator de carga que é deduzido pelos dados das contas de energia é um dos

indicadores de eficiência, pois, mostra como a energia está sendo utilizada ao longo do tempo.

Quanto maior for o fator de carga, menor será o custo do kWh. Supondo-se a possibilidade de manter, ao longo do ano, o fator de carga na faixa do mais alto já obtido, no período analisado, projeta-se uma economia média em cima da fatura mensal de energia.

Um fator de carga próximo de 1 indica que as cargas elétricas foram utilizadas racionalmente ao longo do tempo. Por outro lado, um fator de carga baixo indica que houve concentração de consumo de energia elétrica em curto período de tempo, determinando uma demanda elevada. Isto se dá quando muitos equipamentos são ligados ao mesmo tempo.

Para obter um fator de carga mais elevado existem três formas básicas:

- a) aumentar o número de horas trabalhadas (ou seja, aumentando-se o consumo de kWh), porém conservando-se a demanda de potência;
- b) otimizar a demanda de potência, conservando-se o mesmo nível de consumo de kWh;
- c) atuar simultaneamente nos dois parâmetros acima citados.

Para se avaliar o potencial de economia, neste caso, deve-se observar o comportamento do fator de carga nos segmentos horo-sazonais e identificar os meses em que este fator apresentou seu valor máximo. Isto pode indicar que se adotou nestes meses uma sistemática de operação que proporcionou o uso mais racional de energia elétrica. Portanto, seria possível, repetir esta sistemática, após uma averiguação das causas deste alto fator de carga e determinando se este valor pode ser mantido ao longo dos meses. Desta forma, para cada período (ponta ou fora de ponta) existe um fator de carga diferente. O fator de carga pode ser assim calculado:

$$FC = \frac{CA}{h \cdot DR}$$

sendo

FC – fator de carga do mês na ponta e fora de ponta;

CA – consumo de energia (kWh) no mês na ponta e fora de ponta;

h – número médio de horas no mês, sendo geralmente 66 horas para a ponta e 664 horas para o período fora de ponta;

DR – demanda registrada máxima de potência no mês na ponta e fora de ponta.

Desta forma, determina-se o fator de carga para as tarifas.

- Convencional

$$FC = \frac{CA}{730 \cdot DR}$$

- Horo-sazonal Azul

No Horário de Ponta:

$$FC_p = \frac{CA_p}{66 \cdot DR_p}$$

No Horário Fora de Ponta

$$FC_f = \frac{CA_f}{664 \cdot DR_f}$$

Para a análise do custo médio de energia, tem-se:

$$CMe = \frac{\text{Custo Total da Conta}}{\text{Consumo de energia no mês}} = \frac{R\$}{\text{kWh}}$$

onde: CMe – custo médio de energia (R\$/kWh);

O custo médio de energia também é conhecido como custo unitário de energia.

5.13. COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA

Com os principais objetivos de promover a modicidade tarifária e garantir a segurança do suprimento de energia elétrica, a Lei nº 10.848 de 2004, propõe uma reestruturação no planejamento energético procurando obter, quando possível, competição na geração e formas de contratação de energia elétrica em dois ambientes distintos.

Os contratos de compra e venda de energia passam a ser celebrados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE entre os Agentes participantes. A CCEE contabiliza as diferenças entre o que foi produzido ou consumido e o que foi contratado. As diferenças positivas ou negativas são liquidadas no “Mercado de Curto Prazo” e valorado ao PLD (Preço de Liquidação das Diferenças), determinado semanalmente para cada patamar de carga e para cada submercado, tendo como base o custo marginal de operação do sistema, este limitado por um preço mínimo e por um preço máximo.

5.13.1. Agentes da CCEE

Os Agentes associados que participam da CCEE estão divididos nas categorias de Geração, de Distribuição e de Comercialização podendo ser facultativos ou obrigatórios.

As condições atualmente em vigor e que definem a obrigatoriedade dos agentes estão resumidas a seguir.

Agentes de geração

- Concessionários ≥ 50 MW instalados
- Produtores Independentes ≥ 50 MW instalados
- Autoprodutores ≥ 50 MW instalados

Agentes de distribuição

- Consumo ≥ 500 GWh/ano
- Agentes que adquirem toda energia com tarifa regulada

Agentes de comercialização

- Importadores e exportadores ≥ 50 MW intercambiados
- Comercializadores ≥ 500 GWh/ano
- Consumidores livres

5.13.2. Ambientes de Contratação

Nas bases do novo Modelo de comercialização foram criados dois ambientes de contratação de energia, o Ambiente de Contratação Regulado – ACR e o Ambiente de Contratação Livre – ACL.

No ACR a contratação é formalizada através de contratos bilaterais regulados, denominados Contratos de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR), celebrados entre Agentes Vendedores (comercializadores, geradores, produtores independentes ou autoprodutores) e Compradores (distribuidores) que participam dos leilões de compra e venda de energia elétrica.

Como resultado destas contratações a ANEEL no seu papel de agente regulador estabelece as tarifas de energia e os reajustes tarifários das distribuidoras.

Já no ACL há a livre negociação entre os Agentes Geradores, Comercializado-

res, Consumidores Livres, Importadores e Exportadores de energia, sendo que os acordos de compra e venda de energia são pactuados por meio de contratos bilaterais.

A busca por oportunidades de redução do custo da energia elétrica tem incentivado muitos consumidores migrar do ACR para o ACL podendo ter a opção de comprar toda a sua energia ou parte dela de comercializadoras ou diretamente de geradoras.

5.13.3. Tarifas aplicadas

No novo modelo de comercialização de energia elétrica são aplicadas aos agentes do mercado tarifas para o uso do sistema de transmissão – TUST e tarifas para o uso do sistema de distribuição – TUSD.

A Rede Básica é composta por uma rede de linhas de transmissão em tensão igual ou superior a 230 kV e as suas subestações transformadoras. O acesso às linhas de transmissão é garantido pela ANEEL aos agentes que atendam certas exigências técnicas e que necessitam de grandes fluxos de energia. A administração do sistema de transmissão desta Rede Básica e o gerenciamento do despacho de energia são uma atribuição do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

As regras de composição da Rede Básica, atualmente em vigor, determinam que o serviço de transmissão de unidades transformadoras deve ser pago exclusivamente pelas concessionárias de distribuição que delas se beneficiam. Sendo assim, foram criadas duas parcelas, a TUST-FR associada às demais instalações de transporte e a TUST-RB referente à Rede Básica, correspondendo à TUST – Fio determinado por um valor em R\$/kW para cada distribuidora.

Atualmente, o cálculo destas tarifas é feito através de um software e as parcelas componentes desta tarifa são calculadas com base nos custos de cada distribuidora tendo como suas componentes, especificamente para o período 2006/2007, as seguintes variáveis: RAP-RB (Receita Anual Permitida da Rede Básica), ONS, parcela de ajuste, parcela de ajuste PIS/COFINS, previsão de novas obras, RAP-FR (Receita Anual Permitida da Rede Básica de Fronteira), RAP-DIT (Receita Anual Permitida das Demais Instalações de Transmissão).

Aos consumidores livres e autoprodutores conectados diretamente à Rede Básica, a parcela TUST-RB é calculada individualmente tomando como referência o ponto de conexão ao sistema, formando a TUST – Encargo em R\$/MWh. Estas tarifas ainda incorporam três encargos setoriais, a Conta de Consumo de Combustíveis – CCC, a Conta de Desenvolvimento Energético – CDE, e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA.

O cálculo da TUSD também é realizado seguindo uma metodologia apresen-

tada pela ANEEL. Neste cálculo são necessárias informações das distribuidoras como sua receita de distribuição, o diagrama unifilar simplificado, o percentual de perdas técnicas e as tipologias representativas dos consumidores. As principais componentes que fazem parte da TUSD correspondem à Receita Requerida de Distribuição e aos Custos Marginais de Fornecimento de Potência. Os componentes de cada uma destas parcelas estão relacionados a seguir.

Receita requerida

TUSD – Fio (em R\$/kW)

- Parcela de Distribuição
- Perdas técnicas do sistema de distribuição
- Reserva Global de Reversão – RGR
- Encargos de Conexão
- Encargos do ONS
- Encargos de uso do sistema de distribuição
- Pesquisa e Desenvolvimento - P&D e Eficiência Energética
- PIS/PASEP e COFINS
- Taxa de fiscalização da ANEEL
- Uso da Rede Básica

TUSD – Encargo (em R\$/MWh)

- Conta Consumo de Combustíveis – CCC
- Transporte de Itaipu
- Perdas comerciais
- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA
- Encargo de Serviços do Sistema – ESS
- Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica – TFSEE
- PIS/PASEP e COFINS
- Conta de Desenvolvimento Energético – CDE
- Pesquisa e Desenvolvimento – P&D e Eficiência Energética

Custo Marginal de Fornecimento de Potência

- Custo incremental médio de longo prazo
- Perdas técnicas

5.14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Código de Águas, Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934

Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995

Lei nº 9.074, de 07 de julho de 1995

Resolução ANEEL nº 456, de 29 de novembro de 2000

Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004

Decreto 5.163, de 30 de julho de 2004

Site www.aneel.gov.br

Site www.ccee.org.br

Capítulo 6

ANÁLISE ECONÔMICA EM CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

6.1. INTRODUÇÃO

As decisões de investimento em alternativas e projetos de economia e uso eficiente da energia passam, necessariamente, por uma análise de viabilidade econômica. Tais questões podem se apresentar de duas formas: ou deseja-se decidir sobre a escolha entre duas alternativas mutuamente excludentes, ou deseja-se conhecer a economicidade de uma dada alternativa.

Estas análises, em geral, utilizam-se de índices econômicos que permitem traduzir a atratividade de um investimento. Dentre estes índices pode-se destacar o valor presente líquido, o valor anual uniforme, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno de capital. Para a execução de tais análises procura-se moldar o problema real em uma forma padrão, um fluxo de caixa, o que permite utilizar-se de certas equações previamente concebidas e, assim, avaliar economicamente o projeto.

O desenvolvimento destas equações, índices e o estabelecimento de considerações e limitações serão descritos a seguir. Exemplificando-se, sempre que possível, com problemas relacionados à eficiência energética e uso racional da energia.

6.2. O FLUXO DE CAIXA

O fluxo de caixa é uma maneira simplificada de se representar graficamente as receitas e as despesas de um projeto ao longo do tempo. Nesta modelagem, tudo o que for ganho, benefício, receita e semelhantes, é representado por uma seta apontando para cima. Por outro lado, tudo o que for gasto, despesa, investimento, custos e outros é representado por uma seta para baixo. A figura a seguir apresenta um fluxo de caixa onde foi feito um investimento I no instante zero (seta para baixo) que resultará em um retorno anual A (seta para cima) durante n períodos de tempo, ou em um valor futuro F após este mesmo período.

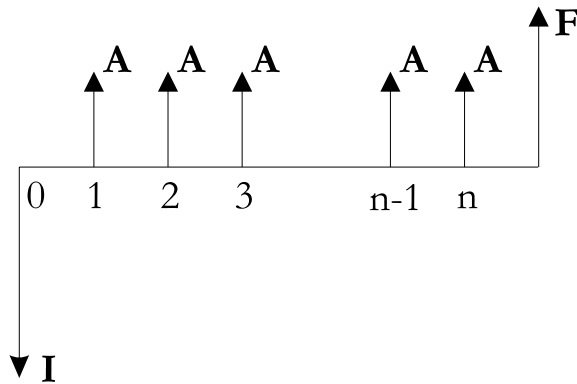


Figura 6.1 - Exemplo de fluxo de caixa

A unidade de tempo utilizada pode ser qualquer uma. Análises anuais e mensais são as mais comuns, uma vez que a maturação destes projetos normalmente está inserida dentro deste período de tempo.

Neste ponto é importante introduzir o que vem a ser a taxa de juros i . O conceito da taxa de juros procura exprimir o que vem a ser o “valor do dinheiro”. Por exemplo, desprezada qualquer inflação, para um indivíduo, mais vale receber mil reais hoje do que esperar para receber daqui a um ano. Esta é uma questão bastante intuitiva e individual, pois, na verdade, cada um sabe o quanto estaria disposto a receber por esperar. Considerando a taxa de juros como sendo um prêmio para que este indivíduo espere para receber o que lhe é devido, pode-se usar a taxa de juros para relacionar o valor futuro F com o valor presente P :

$$F = P + P \cdot i = P \cdot (1 + i)$$

Quando se considera mais de um período e tempo, ou seja, para n períodos, obtém-se a seguinte expressão:

$$F = P \cdot (1 + i)^n \tag{6.1}$$

Na prática, o número de períodos muitas vezes representa a vida útil de um equipamento, vida contábil, período de análise ou a duração do fluxo de caixa como ocorre em projetos que envolvam períodos de concessão.

Exemplo: Devo receber mil reais. Se eu não ganhar este valor hoje, quanto eu devo receber daqui a dois anos para compensar este atraso. Considere uma taxa de juros de 12% a. a. (obs: a.a. = ao ano).

$$F = 1000 \cdot (1 + 0,12)^2 = 1144$$

Ou seja, deverei receber 1144 reais.

Nestas análises é importante que a taxa de juros seja dividida por cem e esteja em conformidade com o período de tempo adotado, ou seja, deve-se adotar taxas de juros anuais para períodos anuais ou taxas de juros mensais para períodos mensais. Para o caso de se ter várias anuidades, o cálculo deve ser cumulativo. Seja por exemplo o seguinte fluxo de caixa:

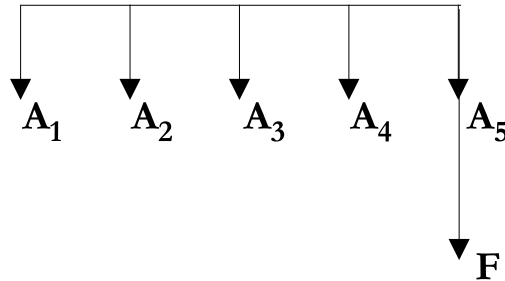


Figura 6.2 - Fluxo de caixa

O valor futuro será dado pela soma das contribuições de cada anuidade corrigida pela taxa de juros, da seguinte forma:

$$F = A_5 + A_4 \cdot (1 + i) + A_3 \cdot (1 + i)^2 + A_2 \cdot (1 + i)^3 + A_1 \cdot (1 + i)^4$$

Se as anuidades e os intervalos de tempo forem iguais, caracterizando a chamada *série uniforme*, pode-se lançar mão da fórmula da soma dos elementos de uma progressão geométrica para se obter uma equação generalizada.

Soma da p.g.:
$$S_n = a_1 \cdot \frac{q^n - 1}{q - 1}$$

Neste caso tem-se: $q = (1 + i)$ e $a_1 = A$

No que resulta:
$$\frac{F}{A} = \frac{(1 + i)^n - 1}{i} \quad (6.2)$$

Pode-se obter importantes relações entre A e P combinando-se (1) e (2). Logo, tem-se:

Fator de recuperação de capital:
$$FRC(i, n) = \frac{A}{P} = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (6.3)$$

Fator de valor presente:
$$FVP(i, n) = \frac{P}{A} = \frac{(1 + i)^n - 1}{i \cdot (1 + i)^n} \quad (6.4)$$

Em muitos casos, a série que se apresenta pode ser não uniforme. Um exemplo típico é a chamada *série gradiente*:

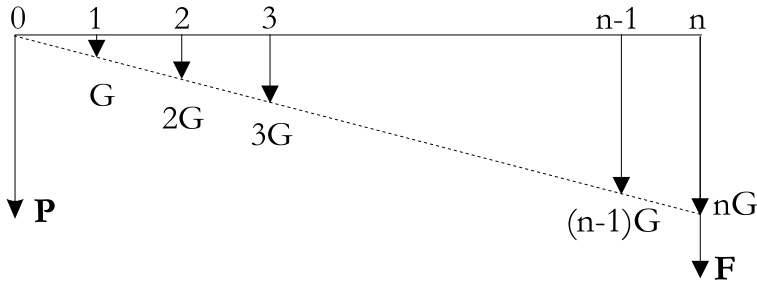


Figura 6.3 - Série Gradiente

Nestes casos, tem-se:

$$\frac{F}{G} = \frac{(1+i)^{n+1} - (1+n \cdot i + i)}{i^2} \quad (6.5)$$

$$\frac{P}{G} = \frac{(1+i)^{n+1} - (1+n \cdot i + i)}{i^2 \cdot (1+i)^n} \quad (6.6)$$

6.3. CRITÉRIOS PARA TOMADA DE DECISÃO

Os critérios de tomada de decisão baseados em análise econômica utilizam-se das expressões deduzidas anteriormente. Serão apresentados o método do valor presente líquido, do valor anual uniforme, do tempo de retorno de capital e da taxa interna de retorno. Naturalmente, as diversas técnicas apresentam certas vantagens e desvantagens quando comparadas entre si, devendo sempre ser aplicadas conhecendo as suas limitações.

A seguir serão apresentados estes conceitos através de exemplos de aplicação em problemas envolvendo questões energéticas. Na maioria dos casos, as séries serão consideradas uniformes. Na realidade, para que as equações apresentadas possam ser utilizadas, deve-se sempre tentar modelar os problemas reais como sendo séries uniformes.

6.3.1. Valor presente líquido

O método do valor presente líquido é bastante interessante quando se deseja comparar alternativas mutuamente excludentes. De modo que, todos os benefícios e custos em seus diversos instantes no tempo, sejam trazidos para o presente. A alternativa que oferecer o maior valor presente líquido será, dentro deste critério, a mais atraente.

É importante observar que ao se fazer comparações entre alternativas, deve-se sempre levar em consideração somente os aspectos que as diferenciam.

Por exemplo, sejam duas alternativas que ofereçam a mesma produção, porém uma energeticamente mais eficiente do que a outra. Neste caso os benefícios auferidos com a produção não deverão ser considerados, posto que é o mesmo para as duas alternativas e, em um momento ou no outro, serão cancelados entre si. Somente a redução no custo, pela eficiência energética, deve ser considerada.

Neste critério, deve-se trazer para o presente, usando o fator de valor presente, todos os custos e benefícios que ocorrem em cada período de tempo. É de fundamental importância, no entanto, que o período de análise seja o mesmo para as diversas alternativas. Mais adiante serão apresentadas técnicas adequadas para o estudo de casos com diferentes períodos de análise.

Seja o exemplo apresentado a seguir de aquisição de uma caldeira. Existem duas opções para se adquirir a caldeira: a primeira é mais cara, mas consome lenha, que é um combustível barato. A segunda é mais barata, mas consome óleo pesado, que é mais caro que a lenha. Pode-se construir dois fluxos de caixa, um para cada caldeira, assumindo-se uma vida econômica igual para os dois equipamentos, e igual a n_c . A taxa de juros adotada, conforme análise do mercado financeiro, é igual a $i\%$ a.a. Os fluxos de caixa são mostrados na Figura 6.4.

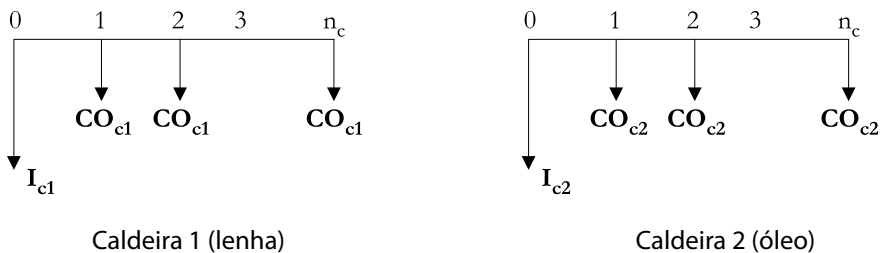


Figura 6.4 - Fluxo de caixa para as caldeiras

Nestes fluxos considerou-se o consumo anual do vapor constante, bem como a eficiência das caldeiras. Se os custos das manutenções são considerados constantes, chega-se a custos anuais constantes de operação e manutenção das caldeiras (CO_{c1} e CO_{c2}). A melhor opção será obtida através do valor presente líquido, **VPL**.

O VPL para cada investimento, considerando o instante zero, é a soma do investimento I mais o valor presente da série correspondente ao custo de operação e manutenção. Assim, tem-se para as caldeiras:

$$VPL_{c1} = I_{c1} + CO_{c1} \cdot FVP(i, n_c)$$

$$VPL_{c2} = I_{c2} + CO_{c2} \cdot FVP(i, n_c)$$

O melhor investimento é o que apresentar o maior valor presente líquido.

Utilizando-se ainda do exemplo anterior, pode-se introduzir o conceito de custo de oportunidade. O custo de oportunidade é um artifício que permite considerar vantagens tecnológicas ou benefícios oriundos de uma determinada alternativa em uma análise econômica. Neste caso, suponha-se que além das duas alternativas de caldeiras anteriores, tenha-se também uma caldeira a gás natural. Sabe-se que ao se utilizar o gás natural como combustível tem-se grande benefício ambiental, dado à reduzida emissão de poluentes e particulados. Para considerar este benefício, pode-se, por exemplo, adicionar ao custo de investimento das outras alternativas, o custo de um filtro que igualasse os níveis de emissão ao da caldeira a gás natural.

O mesmo ocorre com alternativas que melhorem o fator de potência. Neste caso, o custo de oportunidade é igual ao valor de um banco de capacitores que conduzisse ao mesmo efeito de melhoria no fator de potência.

Sendo assim, fica evidenciada a importância de uma análise de sensibilidade. Esta deve fazer variar alguns parâmetros importantes, dentro de faixas relativamente estreitas, a fim de se verificar como se comporta o valor presente. Isto contribuirá sobremaneira na tomada de decisão.

6.3.2. Valor anual líquido

O método do valor anual líquido também é indicado para comparar alternativas mutuamente excludentes. A grande vantagem deste método é que se pode analisar alternativas com vidas úteis diferentes lançando-se mão do conceito de reposição contínua, ou seja, passada a vida útil do equipamento, ele será repostado por um outro idêntico, sendo que isto irá ocorrer indefinidamente.

Este critério trabalha com a distribuição de custos e de investimentos que estejam concentrados em um determinado instante do tempo através do fator de recuperação de capital. Dessa forma, o que apresentar o valor uniforme mais atraente será a alternativa escolhida.

Uma questão interessante a ser observada neste critério, assim como no critério do valor presente líquido, é a influência da inflação. Embora esta seja uma variável de importante valor, pode-se desprezá-la nestas análises, se considerar-se que ela atua com a mesma intensidade sobre as duas alternativas. Como colocado anteriormente, somente as variáveis que diferenciam as alternativas devem ser consideradas.

Como exemplo, considere-se o caso de se fazer o estudo da colocação de um banco de capacitores para compensação do fator de potência. A viabilidade econômica deste empreendimento será mostrada se os benefícios superam os custos. É exatamente aí que está a dificuldade do problema. Sabe-se que a compensação de reativo traz como benefícios a diminuição das perdas, menores gastos com a energia comprada, além de liberação de capacidade dos equipamentos. Desses, o mais difícil

de se avaliar é a liberação da capacidade, pois isto só será benéfico se esta capacidade for utilizada para alimentar outro sistema. O benefício será, exatamente, igual ao custo de aquisição e equipamentos para abastecer o outro sistema. Caso não exista outro sistema a se alimentar, a capacidade ociosa dos equipamentos pode ser considerada como fundo perdido. Ou seja, o que se investiu a mais não interfere na decisão presente. O fluxo de caixa do problema em questão, mostrando a reposição contínua é mostrado na Figura 6.5. Neste caso, a capacidade ociosa só será utilizada a partir do período m .

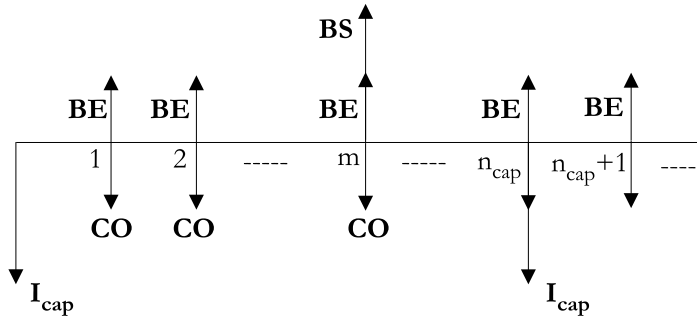


Figura 6.5 - Fluxo de caixa para a compensação de reativos

O custo de instalação I_{cap} , bem como o de operação CO são relativamente fáceis de serem determinados. Já o benefício pela redução das perdas e diminuição da multa por baixo fator de potência BE é extremamente dependente da operação da planta industrial. Isto leva a se estabelecer um cenário para a análise.

Entende-se por cenário um conjunto de hipóteses de operação, baseadas nas características do processo, que permitem estabelecer o comportamento do sistema. É importante observar que uma boa análise econômica deve conter vários cenários.

Avaliado BE , para um cenário, tem-se que avaliar o benefício pela capacidade ociosa BS . Esta só existe a partir da entrada de um outro sistema no período m que faça uso desta capacidade ociosa. De fato, não se vai calcular BS , mas sim, o custo anual BA correspondente aos equipamentos que não foram adquiridos. Este é o custo deles I_e multiplicado pelo correspondente FRC , sendo n_e a vida dos equipamentos. Em caso de diferentes equipamentos com vidas diferentes, tem-se que calcular os custos anuais de cada um, somando-os no final.

$$BA = I_e \cdot FRC(i, n_e)$$

Pode-se, também, transformar I_{cap} em uma série uniforme, como mostrado a seguir, onde n_{cap} é a vida do empreendimento.

$$CA = IA \cdot FRC(i, n_{cap})$$

Tem-se, então, a partir de m , uma série uniforme, até infinito, cujos valores anuais são (BA-CO-CA). Esta série infinita pode ser transformada em um valor anual, localizado no período $m-1$. Para isto basta multiplicar (BA-CO-CA) pelo FVP, com n igual a infinito. Pode-se mostrar que este fator é o inverso da taxa de juros i . O valor atual calculado, localizado em $m-1$, pode ser transportado para o instante zero, no que resulta:

$$BT = \frac{BA - CO - CA}{i} \cdot \frac{1}{(1+i)^{m-1}}$$

Para se ter o valor atual líquido final do empreendimento VAL, tem-se que trazer para o instante zero a série uniforme que vai até $m-1$, cujos termos são BE-CO, o que é possível aplicando-se o FVP, resultando:

$$VAL = BT + (BE - CO) \cdot FVP(i, m - 1)$$

Se VAL for positivo, o empreendimento é atrativo, caso contrário, não o será.

Assim, para o exemplo dos capacitores, pode-se avaliar o índice “dólares por quilowatt-hora”. Este é o custo anual dividido pela economia de energia que se obtém com a compensação de reativos, que é um benefício do empreendimento. Este índice pode ser, a fim de estimativa, comparado com índices semelhantes, resultantes da relação entre o montante da “conta de luz” pelo consumo total de energia. Caso o primeiro seja menor que o segundo, tem-se um indicativo da conveniência do empreendimento.

É oportuno observar a influência da taxa de juros na tomada de decisão. Maiores taxas de juros desestimulam altos investimentos, isto é, não incentivam a produção, favorecendo a especulação financeira. Para as vidas úteis, no entanto, uma vida útil maior irá favorecer o investimento que exigir menores custos de operação e manutenção.

A análise econômica está fundamentada nos custos e benefícios dos investimentos. Detectá-los e equacioná-los é, sem dúvida, a principal tarefa do analista, pois, a partir daí, pode-se manipular, convenientemente, as equações da engenharia econômica, resultando na escolha da melhor opção. Como exemplo, pode-se citar o caso dos motores analisados. Se, ao invés de se considerar rendimentos constantes com o tempo, pode-se considerá-los decrescentes, conforme ocorre o envelhecimento do equipamento e, além disto, um aumento gradativo dos custos de manutenção. Sendo assim, os fluxos de caixa apresentados para os motores serão alterados ao se adotar que estes custos cresçam ΔCO ano a ano, o fluxo de caixa resultante fica como o mostrado na Figura 6.6.

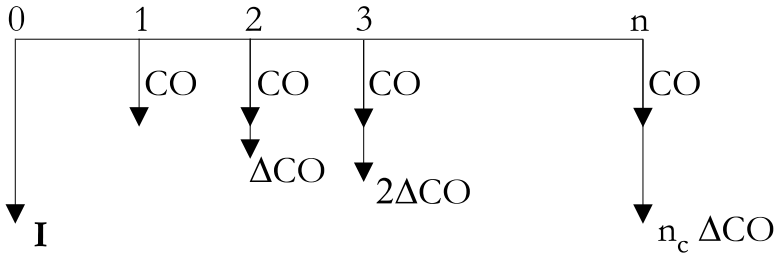


Figura 6.6 - Custos de operação crescentes com o tempo

Para fazer a análise pelo custo anual deve-se inicialmente calcular o valor atual da série uniforme de CO, no instante zero e, em seguida, calcular o valor atual da série gradiente correspondente a ΔCO , no período 1. Transpondo-se este valor para o instante zero, pode-se somá-lo com o investimento I e com o valor de CO atualizado, resultando no valor atual total. Para transformá-lo em uma série de custos anuais, basta multiplicá-lo pelo fator de recuperação de capital, no que resulta:

$$CA = \left[I + CO \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} + \Delta CO \cdot \frac{(1+i)^{n+1} - (1+n \cdot i + i)}{i^2 \cdot (1+i)^{n+1}} \cdot \frac{1}{(1+i)^n} \right] \cdot \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

6.3.3. Taxa interna de retorno

Um dos critérios que tem alcançado grande aceitação é o da taxa interna de retorno, principalmente quando se analisa um projeto por si mesmo, com seus custos e benefícios. Esta é a taxa de juros que zera o valor líquido presente, ou anual, do empreendimento. A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de juros que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente, ou seja, é a taxa que torna nulo o valor presente líquido do projeto dentro de um período de tempo estipulado.

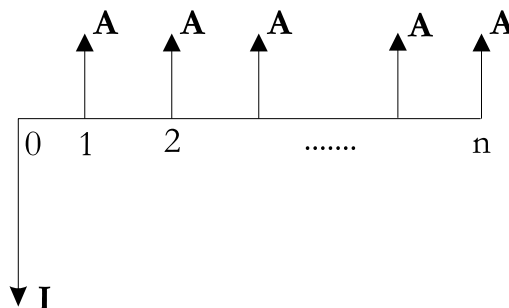


Figura 6.7 - Taxa interna de retorno

Igualando o valor presente a zero, fica:

$$A \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - I = 0$$

Não se consegue determinar algebricamente o valor de i que anule o valor presente líquido, uma vez que esta é uma equação transcendental. A sua solução exige a aplicação de métodos numéricos como o de Newton-Raphson ou outro processo iterativo. Para o caso presente, a maneira mais fácil de se encontrar a TIR é calculando o VPL para crescentes taxas de juros, e marcando estes pontos em um gráfico. Após alguns pontos a curva VPL x i já é suficientemente definida para se avaliar o ponto de VPL nulo, que corresponde à TIR. A figura a seguir ilustra o exposto.

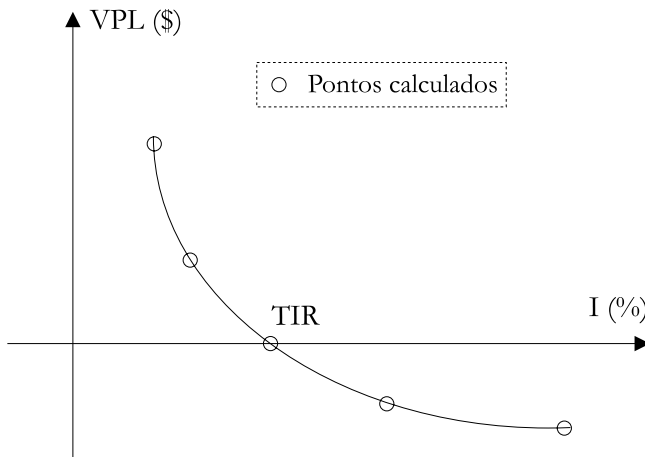


Figura 6.8 - Processo gráfico para o cálculo da TIR

Quando a TIR for superior à taxa de juros, considerada para o empreendimento, tem-se que este é atrativo, e vice-versa. A análise comparativa entre dois empreendimentos através da TIR não é recomendável. Basicamente, a justificativa desta afirmação está baseada no princípio de se maximizar o lucro, sendo que este pode ser o VAL, que é a diferença entre o benefício total atual e custo total atual. Entretanto, pode-se ter um empreendimento cujo VAL é bem inferior, entretanto, a relação entre o benefício total atual e o custo total atual é bem mais elevada, resultando maior TIR. Em termos práticos, por exemplo, no primeiro caso, exige-se maior investimento, mas resulta num lucro maior, enquanto o investimento é menor no segundo caso, resultando menor lucro, mas para cada unidade monetária investida tem-se um retorno maior.

Uma outra maneira de se analisar a viabilidade é comparar a TIR com a taxa mínima de atratividade. A taxa mínima de atratividade (TMA) é a expectativa mínima de lucratividade, em termos de taxa de juros, que se espera em um investimento. Na

prática, esta pode ser definida através de dois enfoques: Ou toma-se a taxa de juros equivalente à maior rentabilidade das aplicações correntes de pouco risco; ou adota-se o custo do capital mais o risco do investimento.

No primeiro caso, quando um investidor possui um capital e deseja aplicá-lo, evidentemente ele não vai aplicar em um projeto que possua uma taxa de rentabilidade menor do que uma outra aplicação já existente no mercado, já que esta última apresenta pouco risco ou, em outras palavras, ele só irá aplicar o seu capital em um projeto com taxa de retorno se esta for maior que em aplicações garantidas comumente encontradas no mercado. Já o segundo caso poderá ser esclarecido supondo-se que o capital a ser investido seja obtido junto ao mercado, a um custo de uma determinada taxa de juros, considerando que o projeto possua um determinado nível de risco, a taxa mínima de atratividade não deverá ser menor que o custo do capital adicionado ao risco do investimento. Note-se que o risco pode atuar tanto negativamente como positivamente sobre o projeto e, sendo assim, deve-se considerar a pior alternativa.

Uma análise que embute o conceito da TIR, tendo as mesmas limitações, é a de custo-benefício. Esta é, como explicita o nome, a relação entre o custo total atual, ou anual, pelo benefício total atual, ou anual. É bastante comum, em empreendimentos energéticos, utilizar-se índices, para comparação entre investimentos ou simples acompanhamento, que são, na verdade, a relação custo-benefício. Matematicamente pode-se demonstrar esta afirmação quando, na expressão do fator de valor presente, o período de análise assume valores muito grandes. No limite, quando n tende a infinito, a expressão do valor presente fica.

$$VPL = -I + \frac{A}{i} = 0$$

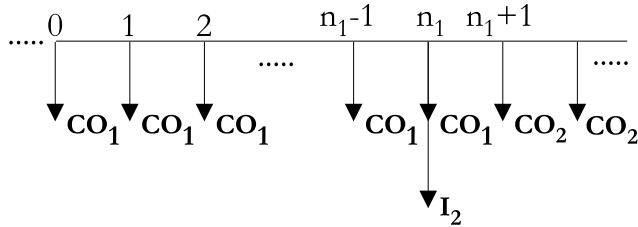
Se i é a taxa interna de retorno, tem-se, realmente, que esta está diretamente ligada à relação benefício-custo, ou custo-benefício:

$$TIR = \frac{A}{I}$$

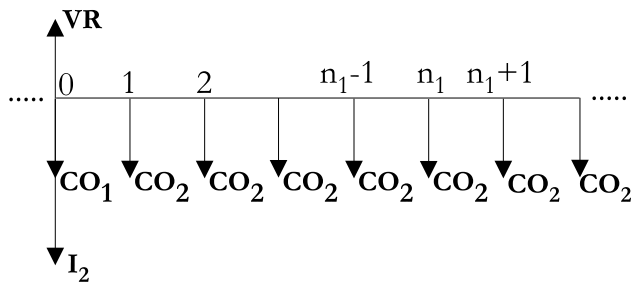
Em uma aplicação real, quando se verifica a ineficiência de um sistema, surge imediatamente a seguinte indagação: Deve-se substituir imediatamente o equipamento ineficiente ou esperar o fim de sua vida útil para fazê-lo. A viabilidade da imediata substituição ocorrerá quando o benefício obtido com a substituição, entendida-se redução das perdas, for suficiente para pagar a substituição do equipamento durante a vida residual daquele instalado atualmente.

Aplicando esta questão à substituição de um motor sobredimensionado,

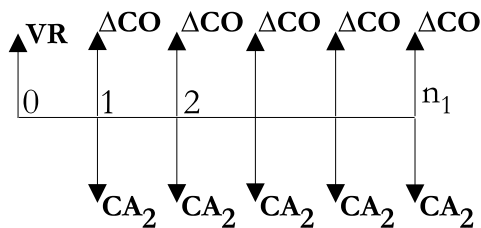
pode-se montar o seguinte fluxo de caixa considerando a opção de se manter o motor atual (1) até o fim de sua vida útil e, então comprar um motor novo (2), mais adequado do que o primeiro.



A opção de se trocar imediatamente o motor resulta no seguinte fluxo de caixa. Observe-se que como o motor atual ainda se encontra em condições de operação, ele pode ser vendido ao preço de um valor residual.



Distribuindo o investimento no motor 2 ao longo de toda a sua vida útil e subtraindo-se os dois fluxos de caixa, tem-se o fluxo de caixa resultante:



VR é o valor residual do motor atual, ΔCO é a diferença do custo operacional anual dos dois motores e CA₂ é o custo anualizado de investimento no motor 2, dados por:

$$\Delta CO = 0,735 \cdot TE \cdot H \cdot \left(\frac{P_2}{h_2} - \frac{P_1}{h_1} \right)$$

$$CA_2 = I_2 \cdot FRC(i, n_2)$$

Nestas equações P1 e P2, η_1 e η_2 , são a potência em cavalos e o rendimento dos motores 1 e 2, respectivamente. TE é a tarifa de energia elétrica (\$/kWh) e H é o número de horas de operação por ano. I_2 e n_2 são o investimento e a vida útil do motor 2. É importante observar que os custos de manutenção são considerados iguais para ambos os motores. A TIR é calculada fazendo o valor presente líquido igual a zero:

$$VR + (\Delta CO - CA_2) \cdot FVP(TIR, n_1) = 0$$

Neste exemplo foram introduzidos os conceitos de *valor residual* e de *vida residual*. Dado um equipamento existente, o valor residual pode ser comparado ao preço que se ganharia ao vendê-lo em seu estado atual. Da mesma forma, a vida residual é a diferença entre a vida útil do equipamento e o tempo de uso do mesmo.

6.3.4. Tempo de retorno de capital

O critério do tempo de retorno de capital, ou *payback*, é, sem dúvida, o mais difundido no meio técnico para análises de viabilidade econômica, principalmente devido à sua facilidade de aplicação. Nestes termos fala-se do chamado payback não descontado, isto é, um procedimento de cálculo onde não se leva em consideração o custo de capital, ou seja, a taxa de juros. Esta análise é feita apenas dividindo-se o custo da implantação do empreendimento pelo benefício auferido. Em outras palavras, este critério mostra quanto tempo é necessário para que os benefícios se igualem ao investimento.

O tempo de retorno descontado é o número de períodos que zera o valor líquido presente, ou anual, do empreendimento. Neste caso, a taxa de juros adotada é o próprio custo de capital.

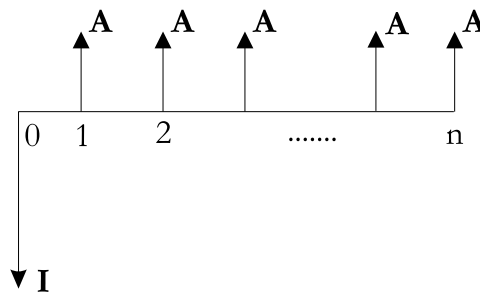


Figura 6.9 - Taxa interna de retorno

Igualando o valor presente a zero, tem-se:

$$A \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - I = 0$$

Diferentemente do cálculo da TIR, felizmente, o tempo de retorno de capital pode ser calculado algebricamente a partir da expressão anterior, no que resulta:

$$n = - \frac{\ln(1 - I / A \cdot i)}{\ln(1 + i)}$$

Pode-se também desenvolver uma interpretação gráfica para o tempo de retorno descontado, calculando-se o VPL para diferentes tempos de retorno, e marcando estes pontos em um gráfico. Após alguns pontos a curva já é suficientemente definida para se avaliar o ponto de VPL nulo, que corresponde ao tempo procurado. A figura a seguir ilustra o exposto.

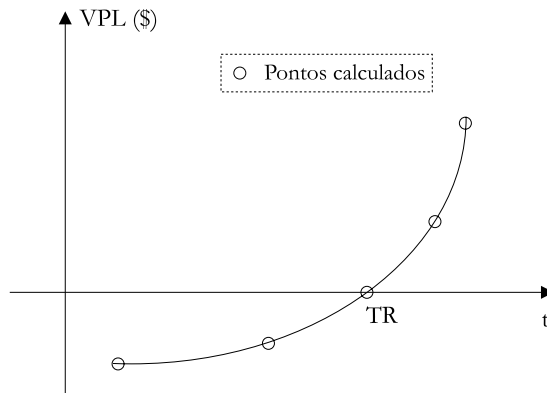


Figura 6.10 - Processo gráfico para o cálculo da TIR

Exemplo: Investimento em tecnologias de iluminação

Calcular o tempo de retorno simples (não descontado), para um investimento em uma tecnologia de iluminação que garante a economia de \$50,00 mensais, a um investimento inicial de \$300,00. Calcular também o tempo de retorno descontado considerando uma taxa de juros de 2% ao mês.

a) Tempo de retorno simples

No tempo de retorno simples basta dividir o investimento pela economia, no que resulta:

$$n = \frac{300}{50} = 6 \text{ meses}$$

b) Tempo de retorno descontado

$$n = -\frac{\ln(1 - 300 / 50 \cdot 0,02)}{\ln(1 + 0,02)} = 6,45 \text{ meses}$$

Ou seja, se o custo de capital for considerado, neste exemplo, o retorno levará quase 14 dias a mais para se verificar. O negócio será efetivado se o tempo de retorno for aceitável pelo investidor.

6.4. TÓPICOS AVANÇADOS

Determinar a espessura ótima de isolamento térmico é um problema que extrapola as técnicas usuais de engenharia econômica, pois envolve conceitos de otimização. Seja, pois, CA_i o custo anual do isolamento, dado por:

$$CA_i = I_i \cdot FRC(i, n_i)$$

Onde I_i é o investimento realizado, por unidade de comprimento e n_i é a vida útil estimada do isolamento. À medida em que se aumenta a espessura do isolamento, há uma redução das perdas de energia. Pode-se para cada espessura, calcular a perda anual, PA, associando-a com o custo de geração do vapor. Este último depende da eficiência e tipo da caldeira, bem como do preço do combustível utilizado, PC. Então o custo anual em virtude das perdas, CA_p, é:

$$CA_p = PA \cdot PC \cdot \alpha$$

Onde α é um parâmetro que considera o poder calorífico do combustível, bem como a eficiência da caldeira. O benefício anual de se aumentar o isolamento BA_p equivale à redução do CA_p. Isto é mostrado na Figura 6.11.

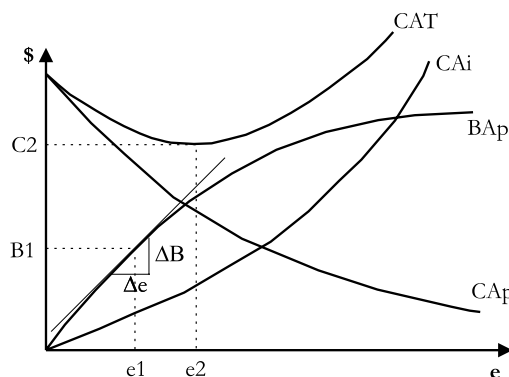


Figura 6.11 - Custos e benefícios em função da espessura do isolamento

Desta figura também se pode levantar a espessura ótima de isolamento, bastando para tanto, construir a curva do custo anual total CAT, e localizar o seu ponto mínimo. Uma outra maneira de calcular a espessura ótima é fazendo a curva do benefício marginal BM e a do custo marginal CM. Chama-se de benefício (custo) marginal, em um determinado ponto, a derivada da curva de benefício (custo) neste ponto. Isto é mostrado na Figura 6.9, no ponto (e1,B1). O benefício marginal é quanto o benefício crescerá ao se fazer um pequeno incremento unitário no isolamento ou, genericamente:

$$BM = \frac{\Delta B}{\Delta e} \cong \frac{dB}{de}$$

A Figura 6.12 mostra as curvas de custo marginal ($dCAi/de$) e do benefício marginal ($dBAp/de$) em função da espessura.

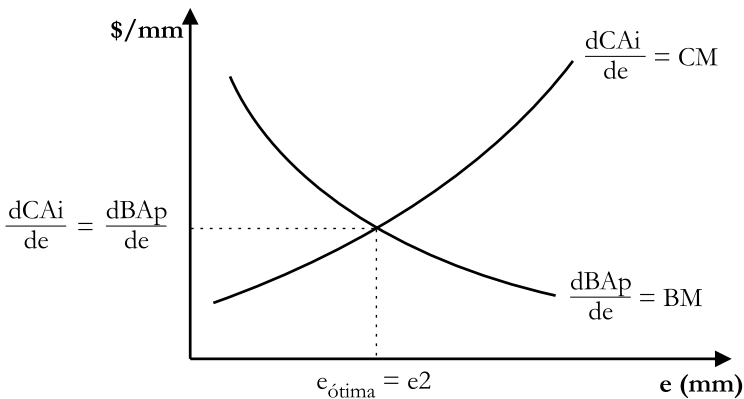


Figura 6.12 - Curvas do custo e benefício marginais

Uma maneira ainda mais fácil de se fazer a análise marginal graficamente, a fim de se calcular o ponto ótimo é construir uma curva do CM em função do BM, ou vice-versa. Assim, para cada espessura calcula-se CM e BM correspondente, marcando-os em um gráfico. O ponto ótimo corresponde ao ponto onde CM e BM são iguais, isto é, onde a curva tem uma derivada unitária (tg 45°), como mostrado na Figura 6.13.

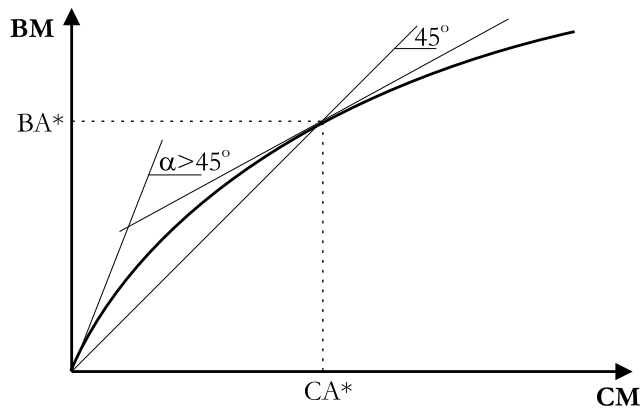


Figura 6.13 - Curva do BM em função de CM

Uma outra maneira de se interpretar a curva da Figura 6.12 é a seguinte: partindo-se da origem, vê-se se um incremento de isolamento é compensador, isto é, se o seu custo anual é menor que o benefício anual. Se o for, aplica-se este isolamento e parte-se para a análise posterior, ou seja, se um incremento adicional de isolamento é vantajoso. Faz-se esta análise até o ponto onde um incremento no isolamento traz um benefício igual ao custo. A partir daí, o benefício seria menor que o custo. Isto não quer dizer que a partir do ponto ótimo o valor atual líquido passa a ser negativo. Mas este começa a decrescer. Portanto, a análise marginal implica na maximização do lucro. É interessante observar que se se estivesse procurando o ponto onde ocorre a maior TIR, este é próximo à origem, pois uma fina isolação tem baixo custo e alto benefício. Por outro lado, caso se procure o ponto até onde o investimento é compensador, ou seja, onde a TIR é igual à taxa de juros, este é bem acima do ponto ótimo. Para localizá-lo é necessário voltar-se à Figura 6.11, procurando o ponto de interseção entre as curvas “ $BA_p \times e$ ” e “ $CA_i \times e$ ”. Neste ponto a TIR é igual à taxa de juros adotada.

Capítulo 7

ILUMINAÇÃO

7.1. INTRODUÇÃO

A iluminação é responsável por, aproximadamente, 24% do consumo de energia elétrica no setor residencial, 44% no setor comercial e serviços públicos e 1% no setor industrial. Em relação aos serviços públicos, aproximadamente dois terços são utilizados para iluminação de ruas. Pode-se, então, dizer que a iluminação pública é responsável por cerca de 3,3% de toda a eletricidade consumida no Brasil.

Vários trabalhos desenvolvidos mostram que a iluminação ineficiente é comum no Brasil. Uma combinação de lâmpadas, reatores e refletores eficientes, associados a hábitos saudáveis na sua utilização, podem ser aplicados para reduzir o consumo de energia elétrica.

A seção 7.2 apresenta as definições básicas, a 7.3 apresenta os sistemas de iluminação existentes e as próximas apresentam estudos relacionados à conservação e qualidade da energia elétrica envolvendo sistema de iluminação.

Os autores agradecem a colaboração recebida por Giuseppe Meliande Neto, Flávio Gonzalez, Fabrício Romano e Júlio Cezar Gaia, da equipe técnica da GE Lighting Brasil, pelos comentários realizados.

7.2. DEFINIÇÕES

Nesta seção faz-se uma seleção de termos e definições relacionadas com a iluminação. Procura-se descrever os principais conceitos utilizados em luminotécnica.

7.2.1. Absorção

Transformação de energia radiante numa forma diferente de energia por interação com a matéria, por exemplo: transformação de energia ultravioleta em luz visível através da camada de fósforo em lâmpadas fluorescentes.

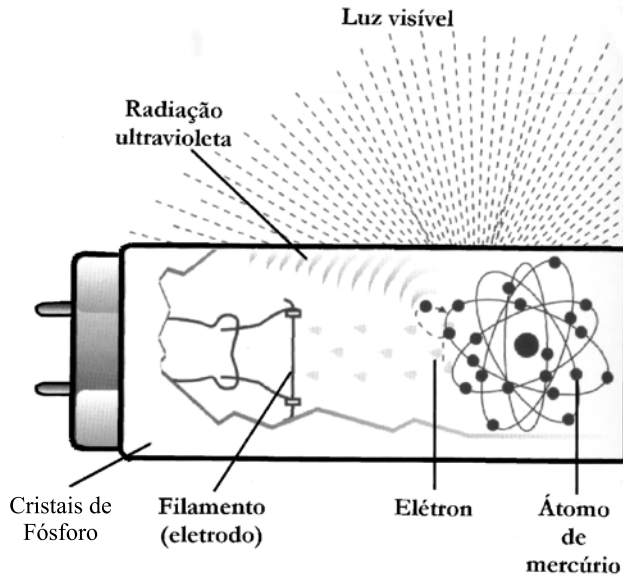


Figura 7.1 - Transformação de energia ultravioleta em luz visível

7.2.2. Área projetada

A área projetada de uma luminária, numa dada direção, é a área de projeção ortogonal da superfície luminosa, num plano perpendicular à direção específica. Unidade - m²

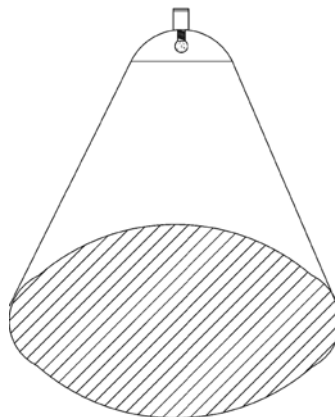


Figura 7.2 - Área projetada de uma luminária

7.2.3. Campo visual

Campo visual do olho é a extensão angular do espaço no qual um objeto pode ser percebido, é dado por: 50° para cima, 60° para baixo e 80° horizontalmente para cada lado.

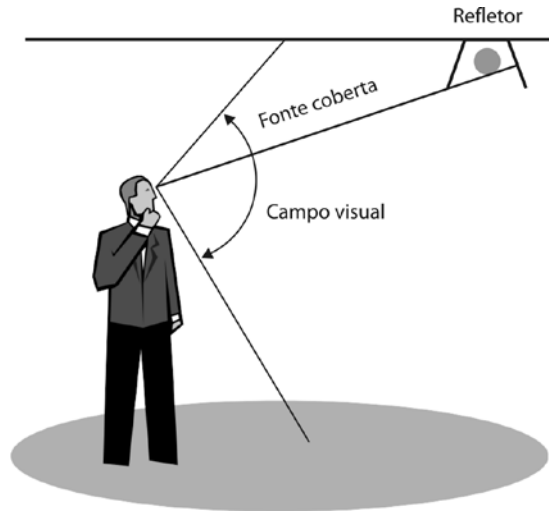


Figura 7.3 - Campo visual do olho

7.2.4. Comprimento de onda (λ)

É a distância na direção de propagação de uma onda periódica entre dois pontos sucessivos em concordância de fase. Unidade: metro - m.

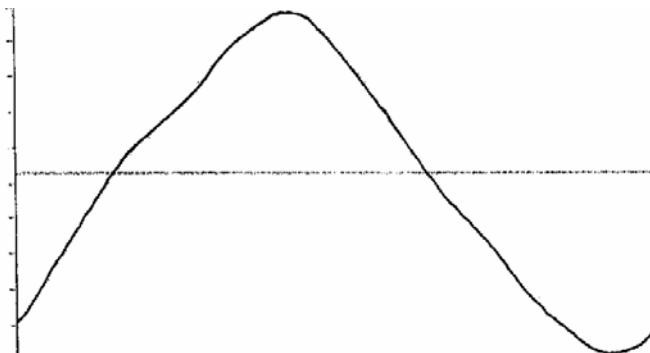


Figura 7.4 - Forma de onda

7.2.5. Controlador de luz

É a parte da luminária projetada para modificar a distribuição espacial do fluxo luminoso das lâmpadas; podendo ser do tipo refletor, refrator, difusor, lente e colméia.

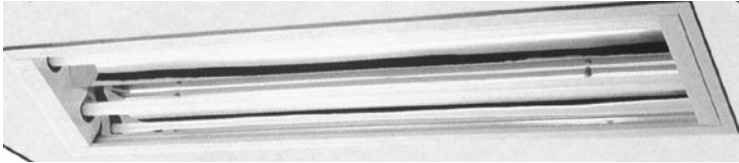


Figura 7.5 - Luminária com refletor

7.2.6. Curva de Distribuição Luminosa (CDL)

A Curva de Distribuição Luminosa de uma lâmpada é a curva que representa, em coordenadas polares, as intensidades luminosas nos planos transversal e longitudinal e, normalmente, é fornecida em candelas/1000 lúmens.

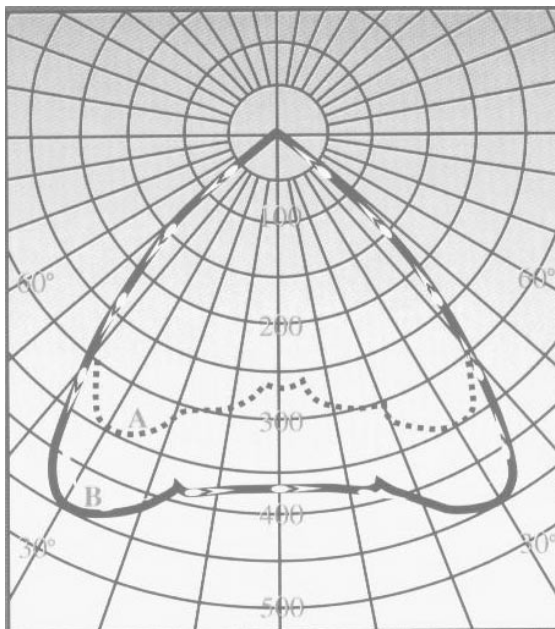
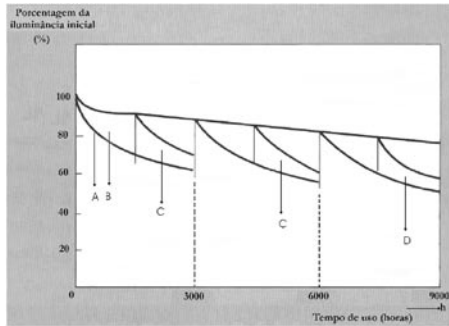


Figura 7.6 - Exemplo de curva de distribuição luminosa

7.2.7. Depreciação do fluxo luminoso

É a diminuição progressiva da iluminância do sistema de iluminação devido ao acúmulo de poeira nas lâmpadas e luminárias, e, ao decréscimo do fluxo luminoso das lâmpadas.



A-Perda devido à depreciação da lâmpada
 B-Perda devido à sujeira da lâmpada
 C-Benefício com uma limpeza semestral
 D-Benefício com reposição semestral
 y-anos, com um suposto uso de 3000 horas por ano
 h-horas de uso

Figura 7.7 - Efeito da depreciação, limpeza e reposição de lâmpadas na iluminância E, de uma instalação de lâmpadas fluorescentes

7.2.8. Difusor

Dispositivo colocado em frente à fonte de luz com a finalidade de diminuir sua luminância, reduzindo as possibilidades de ofuscamento.

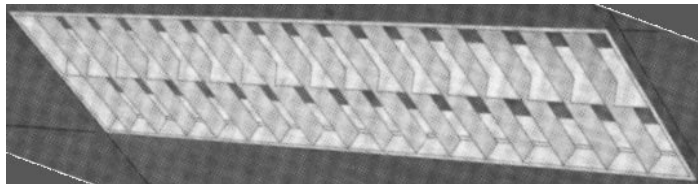


Figura 7.8 - Difusor para luminária com lâmpada fluorescente

7.2.9. Eficiência Luminosa (EL) de uma fonte

É o quociente do fluxo luminoso total emitido por uma fonte de luz em lúmens e a potência por ela consumida em Watts. Por exemplo, para uma lâmpada incandescente de 100 W que produz um fluxo luminoso de 1.470 lúmens, possui uma EL de 14,7 lm/W; por outro lado, uma lâmpada fluorescente compacta de 23 W, que produz um fluxo luminoso de 1500 lúmens, possui uma EL de 65,2 lm/W.

7.2.10. Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético contém uma série de radiações, que são fenômenos vibratórios, cuja velocidade (v) de propagação é constante e que diferem entre si por sua frequência (f) e por seu comprimento de onda (λ), tal que $v = \lambda \cdot f$. Para o estudo da iluminação, é especialmente importante o grupo de radiações compreendidas entre os comprimentos de onda de 380 e 780 nanômetro (nm), pois elas são capazes de estimular a retina do olho humano. As radiações com comprimento de onda entre 100 e 380 nm são chamadas de radiação ultravioleta e entre 780 e 1.000 nm são chamadas de radiação infravermelho.

Tabela 7.1 - Faixa do comprimento de onda para o espectro visível

Comprimento de onda	Cor
de 380 a 436 nm	Violeta
de 436 a 495 nm	Azul
de 495 a 566 nm	Verde
de 566 a 589 nm	Amarelo
de 589 a 627 nm	Laranja
de 627 a 780 nm	Vermelho

7.2.11. Fator de manutenção (Fm)

É a razão da iluminância média no plano de trabalho, após um certo período de uso, pela iluminância média obtida sob as mesmas condições da instalação nova. Os valores estão apresentados na Tabela 7.2.

7.2.12. Fator de utilização (Fu)

É a razão do fluxo utilizado pelo fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas. É um índice da luminária e influi no rendimento desta. Por exemplo, uma luminária para lâmpada fluorescente com fator de utilização de 0,82, com uma lâmpada que produz um fluxo luminoso de 3.100 lúmens, fornecerá um fluxo utilizado de 2.542 lúmens.

Tabela 7.2 - Fatores de manutenção

Período de uso sem limpeza (meses)	Ambiente limpo	Ambiente médio	Ambiente sujo
0	1,00	1,00	1,00
2	0,97	0,92	0,85
4	0,95	0,87	0,76
6	0,93	0,85	0,70
8	0,92	0,82	0,66
10	0,91	0,80	0,63
12	0,90	0,78	0,61
14	0,89	0,77	0,59
16	0,88	0,76	0,57
18	0,87	0,75	0,56
20	0,86	0,74	0,54

7.2.13. Fluxo luminoso (ϕ)

Quantidade de luz produzida pela lâmpada, emitida pela radiação, de acordo com a sua ação sobre um receptor seletivo, cuja sensibilidade espectral é definida pelas eficiências espectrais padrão. Unidade: lúmen - lm.

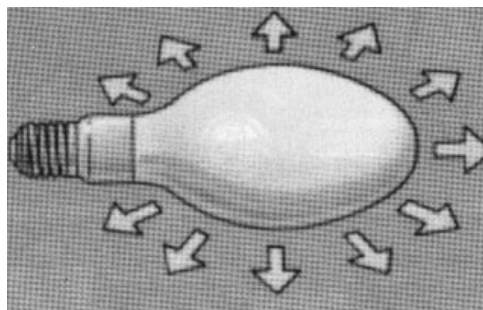


Figura 7.9 - Fluxo luminoso de uma lâmpada

7.2.14. Iluminância (E)

A iluminância é definida como sendo o fluxo luminoso incidente por unidade de área iluminada, ou ainda, em um ponto de uma superfície, a densidade superficial de fluxo luminoso recebido.

$$E = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta S} = \frac{d\phi}{dS}$$

A unidade de medida usual é o lux, definido como sendo a iluminância de uma superfície plana, de área igual a 1 m², que recebe, na direção perpendicular, um fluxo luminoso igual a 1 lm, uniformemente distribuído.

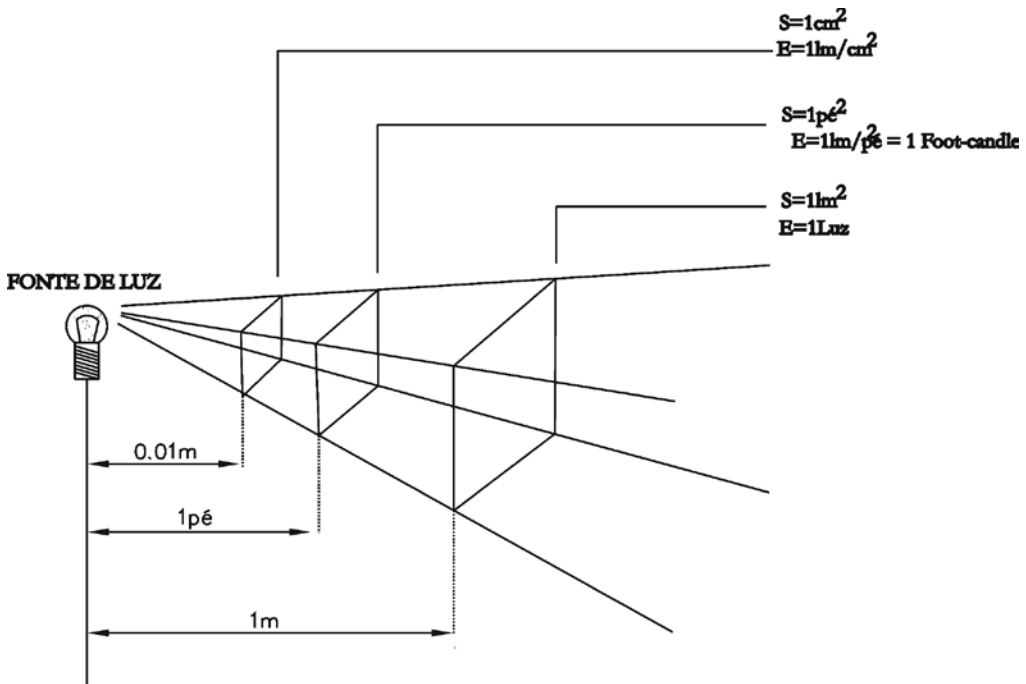


Figura 7.10 - Iluminância de uma fonte de luz

Considerando agora ambientes de trabalho, a iluminância é definida como iluminância mínima no plano de trabalho, cujos valores recomendados pela NBR 5413 estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 7.3 – Níveis de iluminância recomendados pela norma NBR 5413

ATIVIDADE	ILUMINÂNCIA (Lux)	
	mínimo	máximo
Mínimo para ambientes de trabalho	150	---
Tarefas visuais simples e variadas	250	500
Observações contínuas de detalhes médios e finos (trabalho normal)	500	1000
Tarefas visuais contínuas e precisas (trabalho fino, por exemplo, desenho)	1000	2000
Trabalho muito fino (iluminação local, por exemplo, conserto de relógio)	2000	---

7.2.15. Índice de Reprodução de Cor (IRC)

O IRC, no sistema internacional de medidas, é um número de 0 a 100 que classifica a qualidade relativa de reprodução de cor de uma fonte, quando comparada com uma fonte padrão de referência da mesma temperatura de cor. O IRC identifica a aparência como as cores dos objetos e pessoas serão percebidos quando iluminados pela fonte de luz em questão. Quanto maior o IRC, melhor será o equilíbrio entre as cores.

7.2.16. Intensidade Luminosa (IL)

A Intensidade Luminosa de uma fonte, numa dada direção, é o quociente do fluxo luminoso saindo da fonte, propagado num elemento de ângulo sólido, contendo a direção dada e o elemento de ângulo sólido. Unidade: candela - cd.

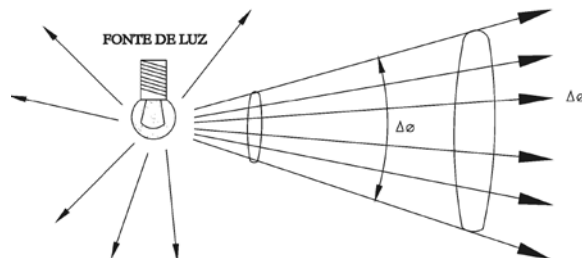


Figura 7.11 - Intensidade luminosa de uma fonte de luz

7.2.17. Luminância (L)

A luminância de uma superfície é uma medida da luminosidade que um observador percebe refletido desta superfície. Unidade: candela por metro quadrado - cd/m^2 .

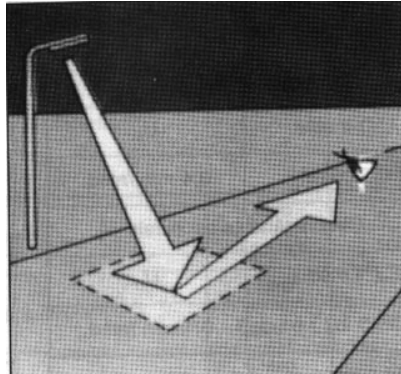


Figura 7.12 - Luminância de uma superfície

7.2.18. Luxímetro

Instrumento utilizado para medição de iluminâncias em ambientes com iluminação natural e / ou artificial.



Figura 7.13 - luxímetro digital

7.2.19. Mortalidade de lâmpadas

É o número de horas de funcionamento das lâmpadas antes que uma certa porcentagem delas deixe de funcionar. É dependente do número de vezes que se acendem e apagam em um dia.

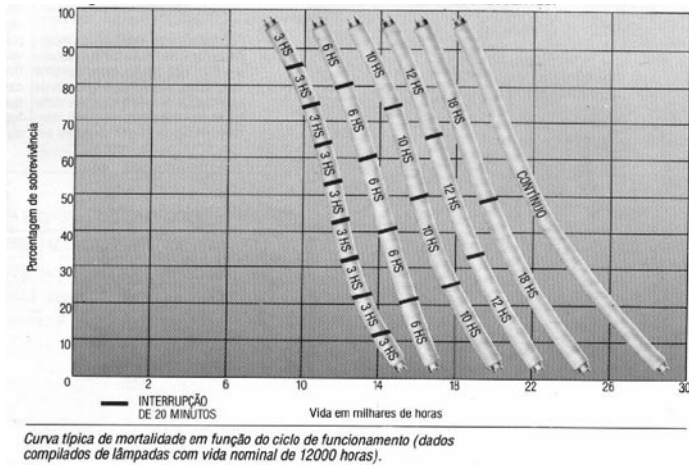


Figura 7.14 - Gráfico de desempenho das lâmpadas fluorescentes

7.2.20. Ofuscamento

Efeito de uma luz forte no campo de visão do olho. Pode provocar sensação de desconforto e prejudicar o desempenho visual nas pessoas presentes neste ambiente.

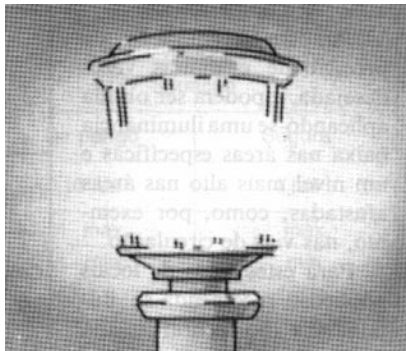


Figura 7.15 - Ofuscamento de uma luminária

7.2.21. Reator

Equipamento que limita a corrente em uma lâmpada fluorescente e também fornece a tensão adequada para dar partida na lâmpada. Pode ser do tipo eletromagnético ou eletrônico, com partida rápida ou convencional, e com alto ou baixo fator de potência.

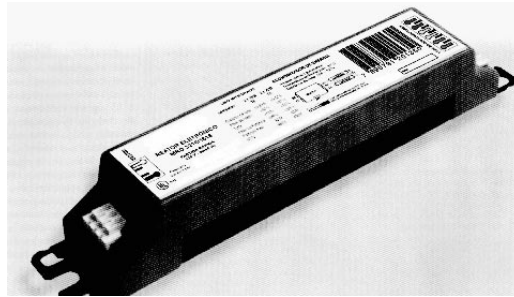


Figura 7.16 - Reator eletrônico para lâmpada fluorescente

7.2.22. Starter

Equipamento que fecha o circuito de partida convencional da lâmpada fluorescente para aquecer os filamentos, e depois abre o circuito para a partida da lâmpada.

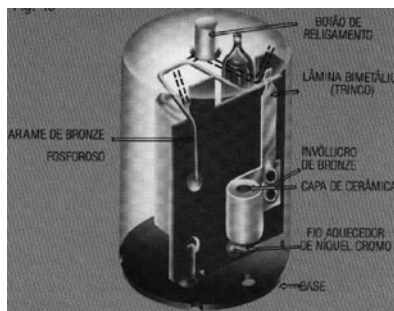


Figura 7.17 - Mecanismo de um starter com religação manual

7.2.23. Temperatura de Cor Correlata (TCC)

É um termo usado para descrever a cor de uma fonte de luz. A TCC é medida em Kelvin, variando de 1.500K, cuja aparência é laranja/vermelho até 9.000K, cuja aparência é azul. As lâmpadas com TCC maior que 4.000K são chamadas de aparência "fria", as lâmpadas com TCC menores que 3.100K são de aparência "quente" e as lâmpadas com TCC entre 3.100 e 4.000K são chamadas de aparência "neutra".

7.2.24. Vida Mediana Nominal (horas)

Corresponde ao valor no qual 50% de uma amostra de lâmpadas ensaiadas se mantém acesas sob condições controladas em laboratório.

A seguir são apresentadas as características das principais lâmpadas utilizadas em sistemas de iluminação.

7.3. LÂMPADAS INCANDESCENTES

7.3.1. Lâmpadas Incandescentes Comuns

7.3.1.1. Funcionamento

A iluminação incandescente resulta da incandescência de um fio percorrido por corrente elétrica, devido ao seu aquecimento, quando este é colocado no vácuo ou em meio gasoso apropriado.

7.3.1.2. Características construtivas

Uma lâmpada incandescente é composta pelos seguintes elementos:

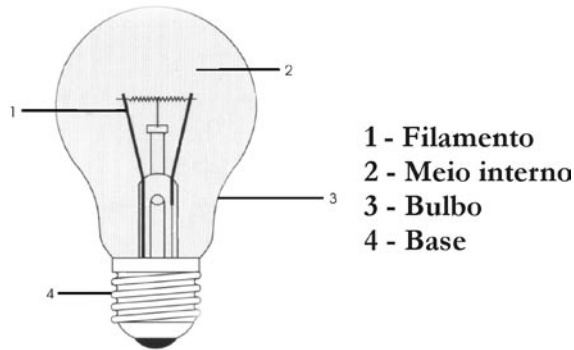


Figura 7.18 - Lâmpada incandescente

- **Bulbo:** Serve para isolar o filamento do meio externo, proteger o conjunto interno, alterar a iluminância da fonte de luz e também como decoração para o ambiente. As lâmpadas incandescentes são construídas normalmente de vidro-cal, tipo de vidro macio e com baixa temperatura de amolecimento, de vidro boro-silicato, tipo duro que resiste a altas temperaturas, ou ainda de vidro pirex que resiste a choques térmicos.
- **Filamento:** para que o filamento possa emitir luz, eficientemente, deverá possuir um elevado ponto de fusão e baixa evaporação. Os filamentos são, atualmente, construídos de tungstênio trefilado pois apresentam um ponto de fusão de 3.655 K, além de possuírem uma boa resistência mecânica e ductilidade.
- **Meio interno:** para diminuir a evaporação e a oxidação do filamento das lâmpadas incandescentes, antigamente, era feito o vácuo no interior destas, ou seja, retirada de todo o oxigênio. Hoje, é utilizado como meio interno, uma mistura de argônio e nitrogênio e em alguns casos criptônio.

- Bases: têm como função fixar a lâmpada mecanicamente ao seu suporte e fazer a ligação elétrica desta com seu circuito de alimentação.

7.3.1.3. Vida mediana

A vida mediana de uma lâmpada é considerada com a mesma trabalhando em condições nominais, ou seja, na tensão nominal e temperatura ambiente. Assim, uma lâmpada incandescente para uso geral possui uma vida mediana de 1.000 horas.

7.3.1.4. Eficiência luminosa

Sabe-se que a eficiência luminosa é determinada por $\eta = \frac{\phi}{P}$

Considerando que uma lâmpada de 200 W possui um fluxo luminoso de aproximadamente 3.400 lm, a mesma irá apresentar uma eficiência luminosa de:

$$\eta = \frac{3.400}{200} \Rightarrow \eta = 17 \text{ lm/W}$$

7.3.1.5. Aplicações

As lâmpadas incandescentes são muito utilizadas em iluminação residencial e de pequenas áreas devido à sua baixa eficiência luminosa.

Existem alguns tipos de lâmpadas incandescentes que são utilizadas para aplicações específicas como, por exemplo, aparelhos domésticos, painéis de sinalização e decorativos.

7.3.2. Lâmpadas Halógenas

As lâmpadas halógenas pertencem à família das lâmpadas incandescentes de construção especial, pois contêm halogênio dentro do bulbo, adicionado ao gás criptônio, e funcionam sob o princípio de um ciclo regenerativo que tem como funções evitar o escurecimento, aumentar a vida mediana e a eficiência luminosa da lâmpada.

Em uma lâmpada incandescente normal, a alta temperatura do filamento causa evaporação das partículas de tungstênio, que se condensam nas paredes internas do bulbo e causam seu escurecimento.

Nas lâmpadas halógenas, a temperatura do bulbo é suficientemente alta para evitar a condensação do tungstênio evaporado.

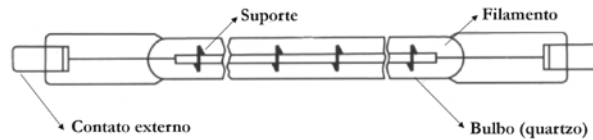


Figura 7.19 - Lâmpada Halógena

A lâmpada halógena possui uma vida mediana e uma eficiência luminosa um pouco maiores do que a incandescente comum. Devido ao fato de apresentarem um fluxo luminoso maior e uma melhor reprodução de cores, suas aplicações são diversas como iluminação de fachadas, áreas de lazer e de estacionamentos, artes gráficas, teatros e estúdios de TV, máquinas fotocopiadoras, filmadoras, faróis de automóveis, entre outras.

7.4. LÂMPADAS DE DESCARGA

7.4.1. Características Gerais

7.4.1.1. Funcionamento

Conforme apresentada anteriormente, em uma lâmpada incandescente, a luz é produzida pelo aquecimento de um filamento. No caso de uma lâmpada de descarga, a luz é produzida por uma descarga elétrica contínua em um gás ou vapor ionizado, às vezes, combinado com fósforo depositado no bulbo que, excitado pela radiação de descarga, provocam uma luminescência.

Uma lâmpada de descarga sempre funciona com equipamento auxiliar (reator e em alguns casos um ignitor) ligado ao seu circuito elétrico. O reator tem como função limitar a corrente da lâmpada e o ignitor ajudar a produzir a tensão necessária para o início da descarga elétrica.

Após a ignição acontece a estabilização do gás, dependendo do tipo de lâmpada, pode demorar mais ou menos tempo. Durante este tempo o fluxo luminoso aumenta até que a lâmpada atinja seu valor nominal.

As lâmpadas de descarga são divididas em lâmpadas de baixa e alta pressão sendo:

- Lâmpadas de alta pressão: Mercúrio, Sódio, Mista e Vapores Metálicos;
- Lâmpadas de baixa pressão: Mercúrio (Fluorescente) e Sódio baixa pressão.

De uma maneira geral são utilizadas em iluminação residencial, comercial e de grandes áreas.

7.4.1.2. Características construtivas

- Meio interno: as lâmpadas de descarga possuem, internamente, gases ou vapores que podem variar de acordo com o tipo de lâmpada. Os gases utilizados com maior frequência são o argônio, o neônio, o xenônio, o hélio ou o criptônio e os vapores de mercúrio e de sódio muitas vezes com alguns aditivos.
- Tubo de descarga: onde é feita a composição dos gases e vapores e onde ocorre a descarga elétrica. Apresenta normalmente a forma tubular e é constituído por materiais diferentes, conforme o tipo de lâmpada.
- Eletrodos: São normalmente feitos de tungstênio espiralado de forma helicoidal, contendo um material emissivo (óxido de bário ou estrôncio) que facilita a emissão dos elétrons. É fixado à base da lâmpada através de uma ligação hermética (selo). Algumas lâmpadas possuem dois eletrodos principais e uma auxiliar, outras, somente os dois principais.
- Bulbo externo: tem por função proteger o tubo de descarga, que é colocado em seu interior, contra influências externas. O bulbo é cheio de um gás inerte (nitrogênio) ou opera a vácuo e, pode ser internamente coberto com uma camada difusora ou de fósforo para melhorar a reprodução de cores, além de absorver a radiação ultravioleta emitida pelas lâmpadas. A lâmpada fluorescente não possui bulbo externo, sendo que o próprio tubo de descarga tem essa função.

7.4.2. Lâmpadas Fluorescentes

São lâmpadas de descarga de baixa pressão, onde a luz é produzida por pós fluorescentes que são ativados pela radiação ultravioleta da descarga. A lâmpada possui, normalmente, o formato do bulbo tubular longo com um filamento em cada extremidade, contendo vapor de mercúrio em baixa pressão com uma pequena quantidade de gás inerte para facilitar a partida. O bulbo é recoberto internamente com um pó fluorescente ou fósforo que, compostos, determinam a quantidade e a cor da luz emitida.

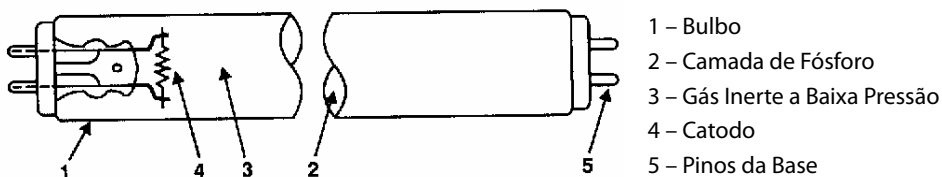


Figura 7.20 - Lâmpada Fluorescente

As lâmpadas fluorescentes podem ainda possuir os eletrodos (catodos) quentes com ou sem pré-aquecimento ou frios. No caso do catodo quente com pré-aquecimento, a lâmpada necessita de um reator e de um starter. Na de catodo quente sem pré-aquecimento, é necessário apenas um reator de construção especial. As de catodo frio também utilizam somente um reator de construção especial.

O starter é um dispositivo que consiste em um pequeno bulbo de vidro que contém em seu interior gás argônio ou neônio e dois eletrodos, um fixo e o outro uma lâmina bimetálica em forma de curva.

O reator é constituído por uma bobina de fio de cobre esmaltado e por um núcleo de lâminas de material ferromagnético prensadas. Existem, hoje, reatores eletrônicos mais modernos que proporcionam maior economia de energia e menor manutenção, além de serem mais leves e de pequenas dimensões. O esquema de ligação de uma lâmpada fluorescente de catodo quente pré-aquecido é apresentado a seguir:

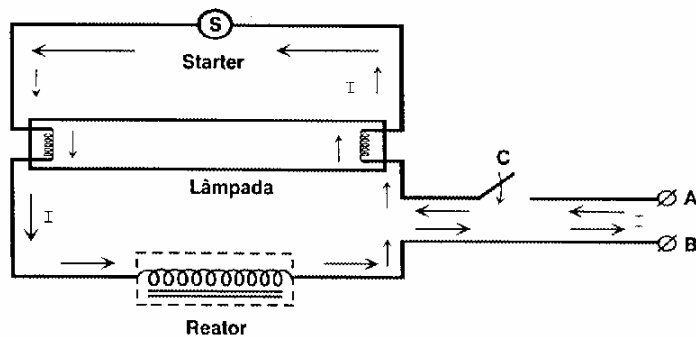


Figura 7.21 - Esquema de ligação da lâmpada fluorescente de catodo quente pré-aquecido

As lâmpadas fluorescentes de catodo quente e partida rápida diferem das de catodo quente com pré-aquecimento por terem eletrodos de construção especial, que são aquecidos continuamente, desde a partida, por bobinas de baixa tensão que são incorporadas ao reator. Para possibilitar sua partida é necessária uma fita de ignição externa à lâmpada, normalmente constituída pela luminária metálica devidamente aterrada.

O reator de construção especial funciona no período de partida como um autotransformador, elevando a tensão da rede elétrica até se iniciar o arco elétrico no interior do bulbo.

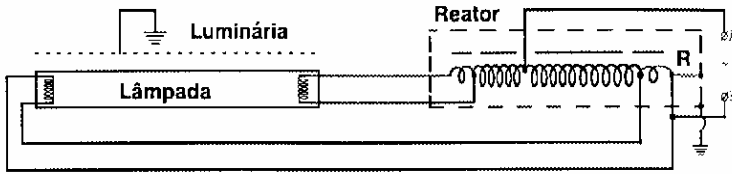


Figura 7.22 - Circuito de ligação da lâmpada fluorescente de catodo quente e partida rápida

7.4.2.1. Lâmpadas fluorescentes compactas

São lâmpadas fluorescentes de tamanho reduzidas, criadas para substituir com vantagens as lâmpadas incandescentes em várias aplicações. Estão disponíveis em várias formas e tamanhos, podendo vir com o conjunto de controle incorporado ou não, e ainda com bases tipo Edison (rosca) ou Pino.

Suas vantagens, em relação às incandescentes, estão, principalmente, no fato de apresentarem o mesmo fluxo luminoso com potências menores, o que gera uma economia de energia de até 80 %, uma vida útil maior, além de possuírem uma boa definição de cores.

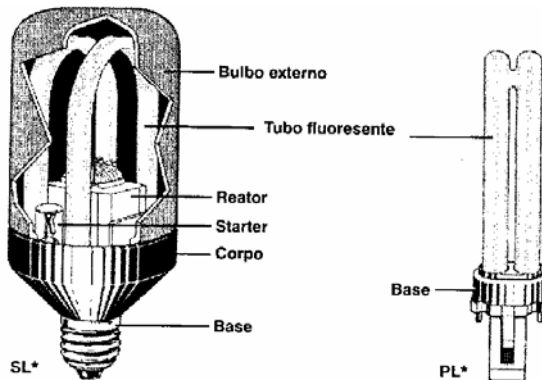


Figura 7.23 - Lâmpadas fluorescentes compactas

7.4.2.2. Vida mediana e eficiência luminosa

A eficiência luminosa de uma lâmpada fluorescente é maior em comparação com as incandescentes, conforme mostram abaixo os cálculos para lâmpadas incandescentes de 100 W e fluorescente compacta de 23 W, que produzem respectivamente 1.470 e 1.520 lúmens:

- fluorescente compacta: $\eta = \frac{\phi}{P} = \frac{1.520}{23} = 66 \text{ lm/W}$

- incandescente: $\eta = \frac{\phi}{P} = \frac{1.470}{100} = 15 \text{ lm/W}$

A vida mediana das lâmpadas fluorescentes é considerada em função de seu tipo, ou seja:

- lâmpadas de catodo quente = 7.500 a 20.000 horas

- lâmpadas compactas = 3.000 a 12.000 horas

7.4.3. Lâmpadas a Vapor de Mercúrio de Alta Pressão

7.4.3.1. Características construtivas

Consta basicamente de um bulbo de vidro duro, que contém em seu interior um tubo de descarga feito de quartzo para suportar altas temperaturas. Possui em seu interior argônio e mercúrio que, quando vaporizado, produzirá o efeito luminoso. Em cada uma de suas extremidades possui um eletrodo principal de tungstênio. Junto a um dos eletrodos principais existe um eletrodo auxiliar ligado em série com um resistor de partida que se localiza na parte externa do tubo de descarga.

No interior do bulbo externo é colocado gás inerte na pressão atmosférica, para estabilizar a lâmpada mantendo-a em temperatura constante.

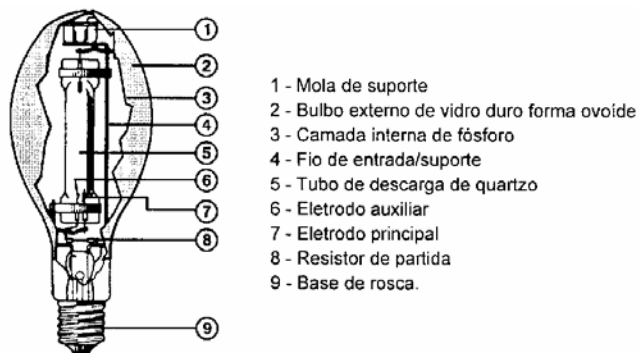


Figura 7.24 - Lâmpada a vapor de mercúrio de alta pressão

A distribuição de cores na composição do espectro do fluxo luminoso desta lâmpada é pobre (luz branca azulada com emissão na região visível nos comprimen-

tos de onda de amarelo, verde e azul, faltando o vermelho), porém, o tubo de descarga emite uma quantidade considerável de energia ultravioleta.

Torna-se então necessário fazer uma correção de cor nesta lâmpada, visando aumentar a cor vermelha. Isso é feito através da transformação da radiação ultravioleta em luz vermelha, adicionando-se uma camada de fósforo no bulbo.

Assim como a fluorescente, a lâmpada a vapor de mercúrio também necessita de um reator para que este forneça tensão necessária na partida e limite a corrente normal de operação.

7.4.3.2. Vida mediana e eficiência luminosa

A vida mediana de uma lâmpada a vapor de mercúrio de alta pressão é superior a 15.000 horas com 30 % de depreciação do fluxo luminoso no período, e sua eficiência luminosa pode ser calculada, por exemplo, para uma lâmpada de 400 W que produz 22000 lúmens como:

$$\eta = \frac{\phi}{P} = \frac{22000}{400} = 55 \text{ lm/W}$$

Comparando-a com as lâmpadas incandescentes e fluorescentes do tipo série SPX 27 que apresentam respectivamente uma eficiência luminosa de 15 e 66 lm / W, pode-se concluir que a fluorescente é a que apresenta uma melhor eficiência luminosa.

As lâmpadas de vapor de mercúrio são utilizadas em iluminação pública, industrial interna e externa (cor corrigida), em iluminação de fachadas de prédios, monumentos e jardins (tubular de vidro claro).

Estas lâmpadas devem ser instaladas em locais que possuam um pé direito (altura) superior a 4 metros para não produzir ofuscamento para as pessoas.

7.4.4. Lâmpadas a Vapor Metálicas

7.4.4.1. Características construtivas

Com a popularização das lâmpadas a vapor de mercúrio sob alta pressão e o aperfeiçoamento da tecnologia, surgiram as lâmpadas de vapor de mercúrio com iodetos metálicos, ou simplesmente, lâmpadas de vapor metálico.

As lâmpadas de vapor metálico são semelhantes com as lâmpadas de va-

por de mercúrio, com exceção da presença de iodetos metálicos, pelo seu maior desempenho, e pela possibilidade de variação da coloração da lâmpada em função da seleção dos iodetos metálicos presentes dentro do tubo de descarga. Esta lâmpada possui um revestimento de alumina nas extremidades do tubo de descarga, cujo objetivo é refletir o calor produzido pela descarga para os eletrodos, impedindo a condensação dos iodetos no interior do tubo de descarga da lâmpada.

A lâmpada de vapor metálica opera em conjunto com um reator, que irá produzir picos de alta tensão de até 5.000 volts para a ignição. Existe no mercado versões que possuem eletrodo auxiliar tornando desnecessária a geração de pulsos de alta tensão, ou ainda, modelo contendo um ignitor interno tipo starter.

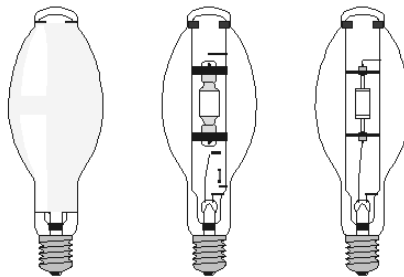


Figura 7.25 - Lâmpadas de vapor metálico: revestida, com eletrodo auxiliar, e com tubo de descarga cerâmico

7.4.4.2. Vida mediana e eficiência luminosa

A vida mediana de uma lâmpada a vapor metálico está na ordem de 15.000 horas com 30 % de depreciação do fluxo luminoso no período, e sua eficiência luminosa pode ser calculada, por exemplo, para uma lâmpada de 400 W que produz 36000 lúmens como:

$$\eta = \frac{\phi}{P} = \frac{36000}{400} = 90 \text{ lm/W}$$

Comparando-a com a lâmpada de vapor de mercúrio apresentada no item anterior, que possui uma eficiência luminosa de 55 lm/W, pode-se concluir que a vapor metálico apresenta uma melhor eficiência luminosa.

As lâmpadas de vapor metálicas possuem um grande número de aplicações, a se destacar a iluminação de lojas de departamentos, estádios de futebol, monumentos, indústrias, iluminação residencial, e até para iluminação automotiva, com

as lâmpadas de xenônio, que são lâmpadas de vapor metálico com atmosfera de xenônio, capazes de acender instantaneamente.

7.4.5. Lâmpadas Mistas

7.4.5.1. Características Construtivas

São idênticas às lâmpadas a vapor de mercúrio de alta pressão, diferenciando-se apenas por possuírem um filamento montado ao redor do tubo de descarga e ligado em série com este.

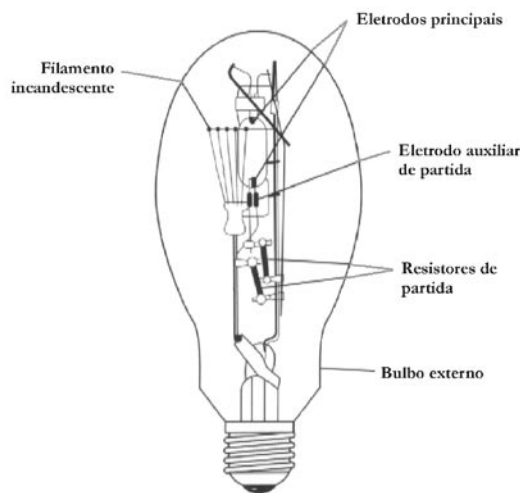


Figura 7.26 - Lâmpada mista

Seu funcionamento é similar ao da lâmpada vapor de mercúrio, porém, a lâmpada mista não necessita de reator para funcionar, pois o filamento além de emitir a energia luminosa, funciona também como elemento de estabilização da lâmpada.

A luz produzida por essa lâmpada é de cor branca difusa, derivada da lâmpada vapor de mercúrio de alta pressão e da luz de cor quente da incandescente, o que dá uma aparência agradável.

7.4.5.2. Vida mediana e eficiência luminosa

A vida mediana de uma lâmpada mista é superior a 6.000 horas com 30 % de depreciação do fluxo luminoso no período e, sua eficiência luminosa pode ser calculada para uma lâmpada de 250 W que produz 5500 lúmens como:

$$\eta = \frac{\phi}{P} = \frac{5500}{250} = 22 \text{ lm/W}$$

Sendo, portanto, mais eficiente apenas que a lâmpada incandescente.

Por apresentarem boa reprodução de cores podem ser usados em vias públicas, jardins, praças, estacionamentos, comércio em geral e na modernização de instalações feitas com lâmpadas incandescentes. Quanto à altura de montagem tem a mesma restrição das lâmpadas a vapor de mercúrio de alta pressão, ou seja, devem ser instaladas em locais onde o pé direito for superior a 4 metros.

7.4.6. Lâmpadas a Vapor de Sódio

As lâmpadas a vapor de sódio podem ser divididas em duas classes: as de baixa pressão e as de alta pressão, conforme apresentados a seguir:

7.4.6.1. Lâmpadas a vapor de sódio de baixa pressão

Consta de um tubo de descarga em forma de U, com um eletrodo em cada extremidade, e cheios de gás argônio e neônio em baixa pressão para facilitar a partida, contendo também sódio metálico que irá se vaporizar durante o funcionamento.

O conjunto é protegido por um invólucro de vidro tubular no qual existe vácuo, coberto na superfície interna por óxido de índio, que funciona como um refletor infravermelho, mantendo a parede do tubo de descarga na temperatura de funcionamento apropriada (270°C).

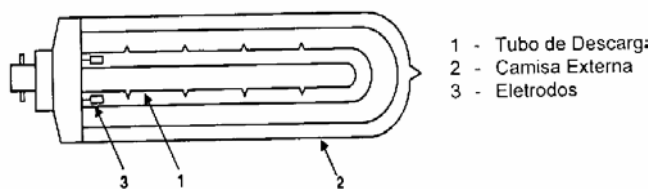


Figura 7.27 - Lâmpadas a vapor de sódio de baixa pressão

A descarga elétrica na partida inicia-se com o gás neônio, que provoca a produção de um pequeno fluxo luminoso de cor rosa e elevação da temperatura, o que causa uma progressiva vaporização do sódio. A lâmpada atinge sua condição normal de funcionamento em aproximadamente 15 minutos, produzindo um fluxo luminoso de cor amarela, devido à descarga no vapor de sódio.

A vida mediana de uma lâmpada a vapor de sódio de baixa pressão é superior a 15.000 horas com depreciação de 30 % do fluxo luminoso no período e sua efi-

ciência luminosa é da ordem de 200 lm/W, portanto, maior do que todas as lâmpadas apresentadas anteriormente.

Devido ao fato de sua luz ser monocromática, sua aplicação fica limitada a locais em que não é necessário um alto índice de reprodução de cores, ou seja, auto-estradas, portos, pátios de manobras, entre outras.

7.4.6.2. Lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão

Seu formato é similar ao da lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão, diferenciando-se apenas pelo formato do tubo de descarga que é comprido, estreito e feito de óxido de alumínio sinterizado translúcido (material cerâmico que suporta altas temperaturas, pois no tubo de descarga dessa lâmpada pode-se atingir 1.000°C) onde é colocado xenônio para iniciar a partida, mercúrio para corrigir a cor e sódio em alta pressão, além de possuir em cada uma de suas extremidades um eletrodo principal feito de nióbio. O tubo de descarga é colocado dentro de um bulbo externo onde é produzido o vácuo entre eles visando diminuir a perda de calor externo, além de aumentar a pressão no tubo de descarga e a eficiência luminosa da lâmpada.

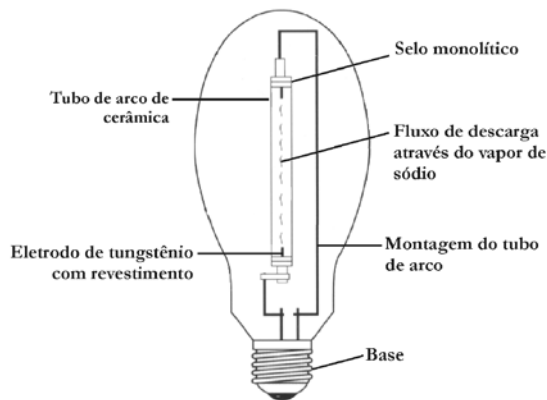


Figura 7.28 - Lâmpada a vapor de sódio de alta pressão

Seu funcionamento é similar ao das lâmpadas de descarga de modo genérico, frisando-se apenas que necessita de tensões altas para a partida em função da geometria do tubo de descarga e, portanto, é necessário o uso de um ignitor.

Essas lâmpadas demoram cerca de 3 a 4 minutos para atingir seu brilho máximo, e neste tempo, existem várias mudanças das cores emitidas devido à composição dos gases internos, até chegar a sua cor branca-dourada.

A vida mediana de uma lâmpada a vapor de sódio de alta pressão é superior a 24.000 horas com 25 % de depreciação do fluxo luminoso no período e sua eficiên-

cia luminosa é da ordem de 120 lm / W, menor que sua similar de baixa pressão.

Pelo fato de possuírem uma propriedade de cor mais agradável que as de baixa pressão, encontram um número maior de aplicações, sendo usadas em vias públicas, ferrovias, áreas de estacionamento, e todo tipo de iluminação externa, bem como em iluminação interna de indústrias.

Pode ser encontrada nas versões com bulbo oval, no caso com camada difusora na parede interna ou bulbo tubular de cor clara. Devem também ser instaladas em locais cujo pé direito seja superior a 4 metros.

7.4.7. Diodos emissores de luz (LEDs)

Os diodos emissores de luz (LEDs) são componentes semicondutores que convertem corrente elétrica em luz visível. Com tamanho bastante reduzido, o LED oferece vantagens através de seu desenvolvimento tecnológico, tornando-o numa alternativa real na substituição das lâmpadas convencionais. Diferentemente do que ocorre com a lâmpada incandescente, que abrange todo espectro de cores o LED é monocromático, gerando apenas uma única cor, que depende do tipo de material utilizado, como por exemplo, galênio, arsênio e fósforo.

Os LEDs estão disponíveis em encapsulamentos comerciais de 3mm, 5mm e 10mm nas cores vermelho, verde, laranja, azul, branco entre outros. Os LEDs de alto brilho mais encontrados no mercado são azul, branco, vermelho e verde.

A eficiência do LED aumentou consideravelmente e atualmente, dependendo da cor, chega a 40 lm/W. Esta alta eficiência foi obtida devido às melhorias no processo produtivo e ao avanço tecnológico, com tendências de aumentar rapidamente nos próximos anos.

A tecnologia LED está sendo produzida com custos cada vez menores e está sendo utilizada em iluminação para diversas aplicações, como por exemplo, sinalização e orientação (degraus e escadas), letreiros luminosos, iluminação de piso, balizamento, etc.

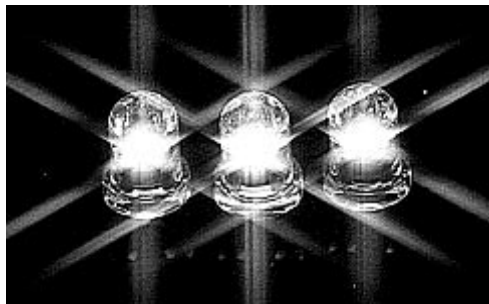


Figura 7.29 – Luz emitida pelo LED

Os LEDs apresentam alguns benefícios conforme listados a seguir:

- Longa durabilidade (pode-se obter até 100.000 horas de funcionamento);
- Alta eficiência luminosa;
- Variedade de cores;
- Dimensões reduzidas;
- Alta resistência a choques e vibrações;
- Não gera radiação ultravioleta e infravermelha;
- Baixo consumo de energia e pouca dissipação de calor;
- Redução nos gastos de manutenção, permitindo a sua utilização em locais de difícil acesso;
- Possibilidade de utilização com sistemas fotovoltaicos em locais isolados.

7.5. CÁLCULO DE ILUMINAÇÃO

7.5.1. Introdução

O método dos lúmens é utilizado para calcular o número de lâmpadas e luminárias, levando em conta as dimensões e o tipo do ambiente que será iluminado. Um roteiro que pode ser seguido para se fazer os cálculos necessários é o seguinte:

- Escolha do nível de iluminamento; (E)
- Determinação do fator do local (K);
- Escolha das lâmpadas e das luminárias;
- Determinação do fator de utilização (η);
- Determinação do fluxo total (ϕT);
- Cálculo do número de luminárias;
- Distribuição das luminárias.

7.5.2. Escolha do Nível de Iluminamento (E)

A primeira providência será a de escolher o nível médio de iluminamento em função do tipo de atividade visual que será desenvolvida no local.

Para isso são utilizadas tabelas constantes da norma NB-57 da ABNT, registrada no INMETRO como NB-5413, que nos fornecem os valores mínimo, médio e máximo admissíveis para cada tipo de ambiente.

7.5.3. Determinação do Fator do Local (K)

A segunda providência será calcular o fator do local que depende das dimensões do ambiente.

Para isso pode-se utilizar a seguinte fórmula:

$$K = \frac{C \cdot L}{(C + L) \cdot A}$$

onde:

C - Comprimento do local

L - Largura do local

A - Altura da luminária ao plano de trabalho

7.5.4. Escolha das Lâmpadas e das Luminárias

Neste item, devem ser levados em conta fatores como a adequada iluminação do plano de trabalho, custo, manutenção, estética, índice de reprodução de cores, aparência visual e funcionalidade.

7.5.5. Determinação do Fator de Utilização (Fu)

O fator de utilização é a razão do fluxo útil que incide efetivamente sobre um plano de trabalho e o fluxo total emitido. Depende da distribuição de luz e do rendimento da luminária, da reflexão do teto, paredes e plano de trabalho ou piso a do fator do local (K).

Para determinar o fator de utilização da luminária escolhida admite-se para K o valor mais próximo do calculado e avaliam-se as reflexões médias do teto, das paredes e do plano de trabalho pelo seguinte critério de índices:

1 - superfície escura - 10% de reflexão

3 - superfície média - 30% de reflexão

5 - superfície clara - 50% de reflexão

7 - superfície branca - 70% de reflexão

A seguir, monta-se um número com três algarismos onde:

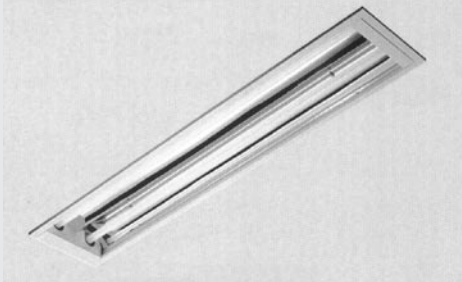
1º algarismo corresponde ao índice de reflexão do teto

2º algarismo corresponde ao índice de reflexão das paredes

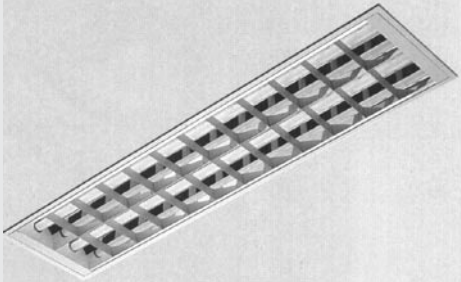
3º algarismo corresponde ao índice de reflexão do piso

Com esses dados, entra-se na tabela da luminária escolhida e obtém-se o valor do fator de utilização. A seguir, como exemplo, tem-se uma tabela de luminárias para determinação do fator de utilização.

Tabela 7.4 - Fator de utilização obtido em catálogo (Lustres Projeto)



C-2198/Embutir (2x16W/32W)



C-2261/Embutir (2x16W/32W)

K	773	751	573	531	353	331	131	000	K	773	751	573	531	353	331	131	000
0,60	0,53	0,40	0,51	0,34	0,40	0,34	0,34	0,30	0,60	0,43	0,33	0,41	0,29	0,33	0,29	0,29	0,25
0,80	0,61	0,48	0,57	0,42	0,48	0,41	0,41	0,36	0,80	0,50	0,39	0,48	0,35	0,39	0,35	0,35	0,31
1,00	0,67	0,54	0,63	0,48	0,53	0,47	0,46	0,42	1,00	0,54	0,45	0,52	0,40	0,45	0,39	0,39	0,36
1,25	0,73	0,59	0,69	0,53	0,59	0,52	0,51	0,48	1,25	0,60	0,48	0,56	0,45	0,49	0,44	0,43	0,41
1,50	0,77	0,63	0,72	0,57	0,63	0,57	0,56	0,51	1,50	0,63	0,51	0,59	0,48	0,52	0,47	0,47	0,44
2,00	0,83	0,69	0,78	0,63	0,69	0,63	0,62	0,58	2,00	0,67	0,56	0,63	0,52	0,57	0,51	0,51	0,48

7.5.6. Determinação do Fluxo Total (ϕT)

Para se determinar o fluxo total pode-se utilizar a expressão abaixo, que determina o valor da iluminância média:

$$Em = \frac{\phi T \cdot Fu \cdot Fm}{S} \Rightarrow \phi T = \frac{Em \cdot S}{Fu \cdot Fm}$$

onde:

Em - Iluminância Média (Nível de Iluminamento)

S - Área do Ambiente

Fu - Fator de Utilização

Fm - Fator de Manutenção

7.5.7. Cálculo do Número de Luminárias

Cada tipo de lâmpada fornece um certo valor de lúmens (fluxo luminoso) conforme apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 7.5 - Lâmpada incandescente para iluminação geral (GE)

Tipo	Potência (W)	Acabamento	Fluxo luminoso (lm)		IRC	Vida Mediana (hora)
			127V	220V		
Cristal	25	Claro	235	230	100	1000
	40		455	415		
	60		780	715		
	100		1470	1350		
	150		2430	2180		
	200		3325	3090		
Refletora	40	Silica	305	280	100	2000
	60		535	460		
	100		1060	895		

Tabela 7.6 - Lâmpada fluorescente tubular (GE)

Código Comercial	Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Diâmetro (mm)	Temperatura de Cor (K)	IRC	Vida Mediana (hora)
F15-T8	15	700	25	6.250	75	7.500
FX20SD-T12	20	1.060	38	5.520	70	12.000
F30-T8	30	1.850	25	6.250	75	7.500
F32-T8	32	2.950	25	4.100	80	20.000
FX40SD-T12	40	2.700	38	5.250	70	12.000
F96-T12	110	8.900	38	6.500	75	12.000

Tabela 7.7 - Lâmpada fluorescente compacta (GE)

Código Comercial	Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Temperatura de Cor (K)	IRC	Vida Mediana (hora)
F7BX	7	400	3.500	82	10.000
F13BX	13	850	3.500	82	10.000
FLE23TBX	23	1.520	3.500	82	10.000

Através do número de lúmens por luminárias(ϕ_l) tem-se o número de luminárias dado por:

$$\text{n}^\circ \text{ de luminárias} = \frac{\phi_T}{\phi_l}$$

7.5.8. Distribuição das Luminárias

O espaçamento entre as luminárias depende de sua altura ao plano de trabalho (altura útil) e da sua distribuição de luz. Esse valor situa-se geralmente, entre 1 a 1,5 vezes o valor da altura útil em ambas as direções. O espaçamento até as paredes deverá ser a metade desse valor.

Vale ressaltar que, se o número de luminárias calculadas resultar em valores incompatíveis com esses limites, os mesmos deverão ser ajustados para não se correr o risco do ambiente ficar com sombras. O ajuste é feito sempre elevando-se o número de luminárias ou mudando-se a sua distribuição.

7.5.9. Considerações sobre as luminárias

A luminária, além de ser uma peça decorativa, deve atender os seguintes requisitos:

- sustentar a lâmpada;
- garantir a alimentação elétrica;
- direcionar o fluxo luminoso.

São peças projetadas para determinadas aplicações envolvendo o tipo de lâmpada e devem assegurar conforto visual com o máximo de eficiência. O fluxo lu-

minoso deve ser adequadamente direcionado evitando-se, desta forma, o fenômeno de ofuscamento: sensação desagradável que ocorre quando o olho recebe um fluxo luminoso excessivo ou quando sofre um contraste muito forte de luz em um mesmo ambiente. Para evitar o ofuscamento pode-se embutir a luminária, mas tal providência pode resultar em perdas da ordem de 20 a 70 % do fluxo luminoso.

Uma outra solução mais adequada consiste em instalar a lâmpada acima do campo visual ou, se estiver baixa, utilizar um anteparo que a cubra parcialmente, concentrando-se o fluxo luminoso sobre a tarefa visual em questão. Pode-se classificar a maior parte das luminárias em cinco grandes grupos, conforme a Tabela 7.8.

Na Tabela 7.9 são apresentados os principais tipos de lâmpadas e suas características gerais.

É importante desenvolver uma manutenção periódica visando a limpeza destes sistemas de iluminação. Com o passar do tempo, a poeira vai se acumulando na luminária e, conseqüentemente, reduzindo a intensidade de fluxo luminoso, fazendo com que a luz ambiente diminua.

Se isto ocorre na instalação, a empresa está utilizando a energia elétrica para aquecer a poeira, não para iluminar. Na prática, pode-se afirmar que com a manutenção inadequada das luminárias perde-se cerca de 20 % de luz no ambiente.

Quanto maior for o ambiente e mais claros os acabamentos, menor será a absorção de luz e maior será a iluminação que incide sobre o plano de trabalho. Assim sendo, com a melhora das condições do ambiente pode-se reduzir o gasto de energia com iluminação sem prejuízo do conforto visual.

Algumas dicas são especialmente importantes para melhorar as condições do ambiente:

- Manter sempre limpas as paredes, tetos e pisos;
- Durante a reforma do ambiente utilizar cores claras pois refletem melhor a luz;
- Quando as divisórias não puderem ser removidas totalmente, deve-se instalar divisórias baixas para reduzir a absorção de luz e permitir o uso da luz nas áreas adjacentes;
- Utilizar mobiliários com cores claras, que não tenham superfícies brilhantes (lustrosas) ou que não proporcionem reflexões indesejáveis;
- Em ambientes com pé direito muito alto, verificar a possibilidade de rebaixar as luminárias, tomando cuidado com o ofuscamento.

Tabela 7.8 - Classificação das luminárias

Tipo	Características Gerais
Embutidas	- Normalmente usadas com lâmpadas incandescentes comuns
	- Apresentam baixo rendimento
	- Normalmente apresentam problemas de superaquecimento
	- Difícil manutenção
Fechadas (lâmpadas fluorescentes)	- São encontradas com vários tipos de elementos de controle de luz (refletores espelhados com proteção visual, difusor prismático, etc.)
	- Rendimento moderado, dependendo do tipo de elemento de controle da luz
	- Difícil manutenção
	- Podem ser fixadas sobre a superfície do teto e, em alguns casos, podem ser embutidas
	- Os que dispõem de refletores sem elementos de controle de luz apresentam melhor rendimento.
Abertas	- Podem ser encontradas com ou sem elementos de controle de luz
	- Apresentam rendimentos superiores aos das luminárias fechadas
	- Fácil manutenção
	- Podem ser fixadas sobre a superfície do teto ou suspensas
Spots	- São utilizadas com vários tipos de lâmpadas incandescentes refletores ou coloridas
	- Utilizados para iluminação direcional do fluxo luminoso
	- Fácil manutenção
	- Podem ser fixados sobre as superfícies ou embutidos
Projetores	- Encontrados em vários tamanhos
	- Apresentam bom rendimento luminoso
	- São fixados sobre as superfícies ou suspensos
	- Podem ser usados com lâmpadas incandescentes comuns até lâmpadas a vapor de sódio
	- Fácil manutenção, dependendo das condições do local.

Tabela 7.9 - Principais características das lâmpadas

Tipo	Características gerais
Incandescente Comum	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente reprodução de cores - Baixa eficiência luminosa - Vida mediana: 1.000 horas - Não exige equipamentos auxiliares - Grande variedade de formas
Incandescente halógena	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente reprodução de cores - Vida mediana: 2.000 horas - Eficiência luminosa maior que a incandescente comum - Exige equipamentos auxiliares, dependendo da tensão - Vários tamanhos, inclusive com refletores
Fluorescente	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente a moderada reprodução de cores, dependendo do tipo - Boa eficiência luminosa - Vida mediana: 7.500 a 20.000 horas - Exige equipamentos auxiliares: reator e starter (partida convencional) ou só reator (partida rápida) - Forma tubular em vários tamanhos
Fluorescente Compacta	<ul style="list-style-type: none"> - Boa reprodução de cores - Boa eficiência luminosa - Vida mediana: 3.000 a 12.000 horas - Exige equipamentos auxiliares (reator) - Pequenas dimensões
Mista	<ul style="list-style-type: none"> - Moderada reprodução de cores - Vida mediana: 8.000 horas - Eficiência luminosa moderada - Não exige o uso de equipamentos auxiliares
Vapor de mercúrio	<ul style="list-style-type: none"> - Moderada reprodução de cores - Vida mediana: 12.000 a 24.000 horas - Boa eficiência luminosa - Exige o uso de equipamentos auxiliares (reator)
Vapor metálico	<ul style="list-style-type: none"> - Boa reprodução de cores - Vida mediana: 3.000 a 20.000 horas - Boa eficiência luminosa - Exige o uso de equipamentos auxiliares (reator)
Vapor de sódio alta pressão	<ul style="list-style-type: none"> - Pobre reprodução de cores - Alta eficiência luminosa - Vida mediana: 12.000 a 55.000 horas - Exige o uso de equipamentos auxiliares (reator e ignitor)

7.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **“Iluminância de interiores - Especificação”**, NBR 5413, Brasil, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, **“Verificação de iluminância de interiores - Procedimento”** NBR 5382, Brasil, 1985.

BORG, N., **“Lâmpada T5: Ganhos de Eficiência dependem de cuidados na Aplicação”**, Revista Eletricidade Moderna, pp 102-110, Brasil, Agosto de 1997.

COSTA, G. J. C., **“Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação”** EDIPUCRS, Brasil, 1998.

FONSECA, R. S., **“Iluminação Elétrica”**, Editora McGraw-Hill do Brasil, Brasil, 1974.

GARCIA JR, E., **“Instalações Elétricas - Luminotécnica”**, Editora Érica, Brasil, 1996.

GENERAL ELETRIC – Consumer & Industrial - Catálogo Geral de Produtos, Brasil, 2003.

GENERAL ELETRIC DO BRASIL S.A., **“Cálculo de Iluminação Interna”**, Departamento de Lâmpadas e Iluminação, Brasil, 1992.

HADDAD, J., **“Uma contribuição à análise de conservação de Energia Elétrica utilizando a teoria dos conjuntos Fuzzy”**, Tese de Doutorado, UNICAMP, Brasil, Abril de 1993.

HADDAD, J.; YAMACHITA, R.A.; GAMA, P.H.R.P., DELGADO, A.C.V.; FUJIWARA, J.K.; DORNELLAS, V.F.S. **“Interferência no Sistema Elétrico causado pela utilização de lâmpadas fluorescentes compactas em consumidores residenciais”** - II SBQEE - Seminário Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica - São Lourenço - MG, Novembro de 1997.

HELFONT - Reatores Eletromagnéticos e Eletrônicos, Catálogo, Brasil, 2004.

INTRAL - Reatores, Estabilizadores e Transformadores, Catálogo, Brasil, 2005.

ITAIM - Indústria Elétrica Itaim Comercial Ltda - Catálogo de Luminárias, Brasil, 2003.

LEONELLI, P.; MONTEIRO, R.; ARAÚJO, I.; POLLIS, H.; GELLER, H., **“Evolução do mercado para Produtos Eficientes de Iluminação”** - Revista Eletricidade Moderna, pp 60-76, Brasil, Agosto de 1997.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, PROCEL / ELETROBRÁS, **“Estratégias de Conservação de Energia Elétrica para o Brasil”**, Seminário Internacional, Brasil, Outubro de 1994.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - PROCEL / ELETROBRÁS, **“Uso Racional de Energia Elétrica em Edificações - Iluminação”**, Brasil, 1992.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - PROCEL / ELETROBRÁS, **“Manual de Iluminação Eficiente”**, Brasil, 2002.

MOREIRA, V. A., **“Iluminação Elétrica”**, 1ª Edição, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1999.

OSRAM - Produtos para Iluminação Geral - Catálogo, Brasil, 2006.

PHILIPS ILUMINAÇÃO – Guia de Iluminação, Brasil, 2004.

PHILIPS ILUMINAÇÃO, **“Benefícios de uma boa Iluminação”**, Brasil, 1996.

PHILIPS, **“Manual de Iluminação”**, Centro de Projetos e Engenharia de Iluminação, Holanda, 1986.

SYLVÂNIA - Lâmpadas Fluorescentes - Boletim Técnico de Engenharia, Brasil, 1995.

SYLVÂNIA ILUMINAÇÃO, Catálogo de Lâmpadas, Brasil, 2004.

YAMACHITA, R. A., **“Conservação de Energia Utilizando Sistemas de Iluminação”** Dissertação de Mestrado – Escola Federal de Engenharia de Itajubá – 1998.

Capítulo 8

BOMBAS DE FLUXO E VENTILADORES

8.1. INTRODUÇÃO

A recessão, pela qual tem passado a sociedade nos últimos tempos, tem exigido a minimização dos custos, de maneira a otimizar os investimentos, nos levando inexoravelmente à conservação de energia. Isto é feito diminuindo-se as perdas de energia no processo produtivo, especificando os equipamentos com eficiência máxima e operando os mesmos o mais próximo desta condição.

No caso das bombas de fluxo e dos ventiladores, esse procedimento não é diferente, pois eles possuem um ponto melhor de funcionamento para uma determinada vazão, altura e rotação, em que suas perdas inerentes do melhor escoamento são mínimas. Entretanto, a maioria das instalações exige da bomba ou do ventilador operação fora desse ponto de melhor funcionamento em função da necessidade de variação de vazão.

Normalmente na indústria, nas empresas de saneamento e em outras aplicações, as instalações de bombeamento ou de ventilação operam suas máquinas na rotação constante e, para obter a variação de vazão, principalmente na sua diminuição, utilizam válvulas que estrangulam a tubulação, aumentando a pressão da bomba ou ventilador com o aumento das perdas do sistema. Essa prática, normalmente, penaliza energeticamente a instalação se comparada com a variação de vazão através da rotação variável.

Neste capítulo, mostrar-se-ão as definições, os tipos, o comportamento da bomba de fluxo e do ventilador operando com rotação constante e variável, além da análise do comportamento da instalação com o objetivo de dar subsídios para se analisar enfocando a conservação de energia.

Além disso, serão apresentados o Laboratório de Etiquetagem de Bombas da Universidade Federal de Itajubá e o Grupo de Trabalho de Bombas formado por representantes do INMETRO, PROCEL, CEPEL, UNIFEI, ABIMAQ e fabricantes de bombas centrífugas.

8.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

8.2.1. Máquinas de Fluxo

Máquinas de fluxo são aquelas em que o escoamento flui continuamente, operando transformações de energia do tipo

$$E_{\text{mecânica}} \leftrightarrow E_{\text{cinética}} \leftrightarrow E_{\text{pressão}}$$

As máquinas de fluxo podem ser:

- **Motoras:** transformam energia do tipo

$$E_{\text{pressão}} \leftrightarrow E_{\text{cinética}} \leftrightarrow E_{\text{mecânica}}$$

Exemplos: Turbinas hidráulicas, turbinas à gás;

- **Geradoras:** transformam energia do tipo

$$E_{\text{mecânica}} \leftrightarrow E_{\text{cinética}} \leftrightarrow E_{\text{pressão}}$$

Exemplos: Compressor de fluxo, bombas de fluxo.

As máquinas de fluxo podem ser térmicas ou hidráulicas. Nas máquinas de fluxo térmicas, o fluido é compressível, enquanto que, nas hidráulicas, o fluido é incompressível. Nesse capítulo, estudar-se-ão as máquinas de fluxo hidráulicas geradoras.

8.2.2. Bombas de Fluxo

8.2.2.1. Definição

São máquinas nas quais a movimentação do líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de rotor com um certo número de pás especiais. A distinção entre os diversos tipos de bombas de fluxo é feita, fundamentalmente, em função da forma como o rotor cede energia ao líquido, bem como pela orientação do líquido ao passar pelo rotor.

8.2.2.2. Classificação

De acordo com a norma NBR-10131, Nov/1987, Bombas Hidráulicas de Fluxo, tem-se a seguinte classificação:

De acordo com a forma do rotor.

- Centrífugas ou radiais – aquelas em que o formato do rotor impõe um escoamento

predominantemente segundo planos perpendiculares ao eixo;

- Fluxo misto – aquelas em que o formato do rotor impõe um escoamento simultaneamente nas direções axial e perpendicular ao eixo;
- Axiais – aquelas em que o formato do rotor impõe um escoamento predominantemente na direção paralela ao eixo.

A Figura 8.1 mostra os três rotores. É importante ressaltar que o rotor radial opera vazões pequenas e grandes alturas; o rotor misto, médias vazões e médias alturas; e o axial, grandes vazões e pequenas alturas. Isto quer dizer que existe a bomba certa para o lugar certo. Em outras palavras, a escolha correta da bomba para uma determinada instalação favorecerá a um melhor rendimento.

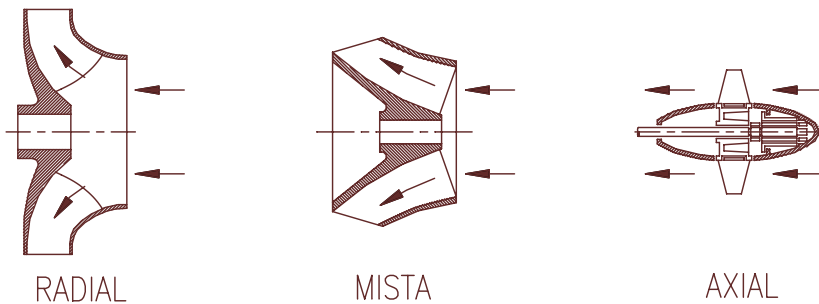


Figura 8.1 – Rotores radial, misto e axial

De acordo com o modo de entrada do líquido no rotor:

- Simples Sucção – tem a entrada do líquido em um lado do rotor;
- Dupla Sucção – tem a entrada do líquido nos dois lados do rotor.

A Figura 8.2 ilustra rotores de simples sucção e dupla sucção, sendo este último conhecido como rotor gêmeo e tem a finalidade de dobrar a vazão para a mesma pressão.

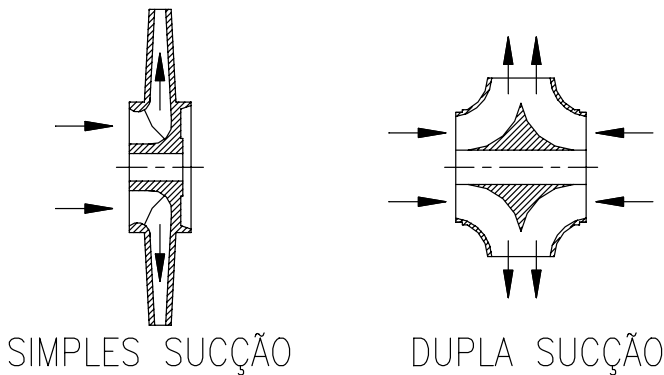


Figura 8.2 – Rotores radiais de simples sucção e dupla sucção

De acordo com o número de rotores em uma mesma carcaça.

- Um estágio – a bomba possui apenas um rotor;
- Vários estágios – a bomba possui mais de um rotor.

A Figura 8.3 apresenta uma bomba com um rotor radial, enquanto a Figura 8.4 mostra uma bomba de vários rotores ou estágios.

A finalidade da bomba de vários estágios é aumentar a pressão com a mesma vazão. Normalmente, a bomba de vários estágios apresenta rendimentos inferiores à de um estágio.

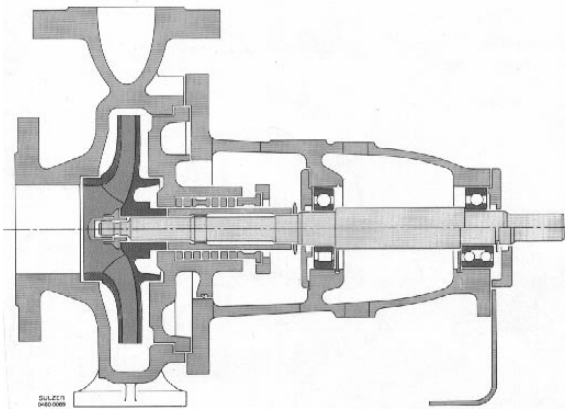


Figura 8.3 – Bomba radial, simples sucção, um estágio e eixo horizontal (Sulzer)

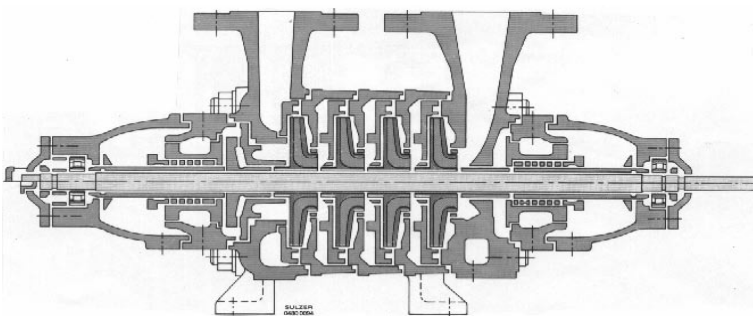


Figura 8.4 – Bomba radial, simples sucção, quatro estágios e eixo horizontal (Sulzer)

De acordo com a posição da bomba.

- Eixo horizontal;
- Eixo vertical – de eixo prolongado,
– bomba submersa.

As figuras 8.3 e 8.4 mostram bombas de eixo horizontal, enquanto a Figura 8.5 mostra uma bomba de eixo vertical prolongado. As bombas de eixo vertical prolongado, o motor de acionamento encontra-se externo ao líquido, enquanto as bombas submersas o conjunto moto-bomba opera no interior do líquido. Estas últimas são utilizadas para poços profundos.

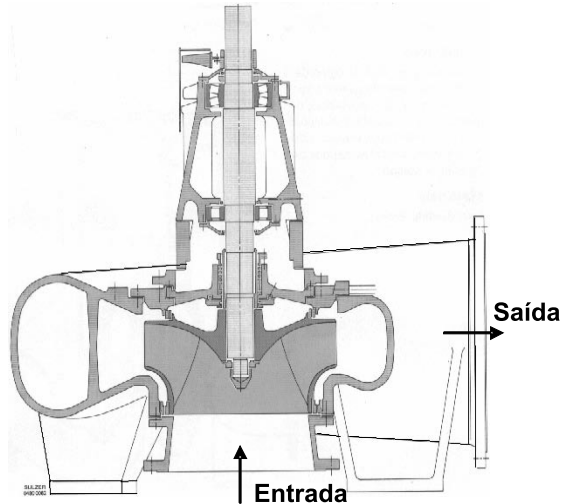


Figura 8.5 – Bomba de eixo vertical, rotor radial e 01 estágio (Sulzer)

De acordo com a posição das pás no rotor.

- Rotor fechado – possui dois discos, o traseiro e o dianteiro;
- Rotor semi-aberto – possui apenas um disco, onde são fixadas as pás;
- Rotor aberto – não possui nenhum disco, e as pás são fixadas no cubo do mesmo.

A Figura 8.6 ilustra os rotores fechado, semi-aberto e aberto. Normalmente o rotor fechado é utilizado para líquidos limpos, enquanto os rotores semi-aberto e aberto são utilizados para líquidos sujos e viscosos. Existem ainda outros rotores de bombas de fluxo com desenhos diferentes, que visam a aplicações específicas e que, portanto, não se enquadram dentro dessa classificação.

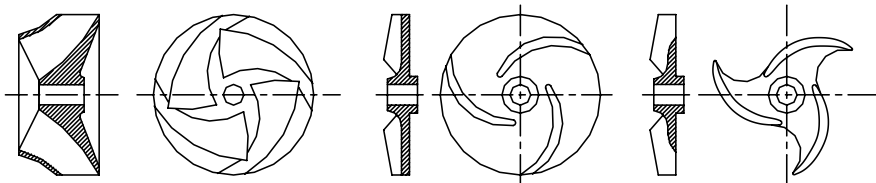


Figura 8.6 – Rotores fechado, semi-aberto e aberto

É importante salientar que, no caso da Figura 8.6, o rotor fechado apresenta maior rendimento que o semi-aberto que, por sua vez, apresenta maior rendimento que o aberto. Doolin (3), no seu trabalho, realizou testes em bombas com rotor fechado e rotor aberto, operando com água misturada com areia. A bomba de rotor fechado obteve menos desgaste que a de rotor aberto, com conseqüente queda de rendimento mais acentuada para o rotor aberto. Em função disto, Doolin (3) recomenda que, se as condições de obstrução no rotor não forem severas, escolher bombas de rotor fechado que possuem naturalmente rendimento melhor que o rotor aberto e ainda caso haja desgastes, o rendimento do rotor fechado cai menos que o aberto.

8.2.2.3. Características

a) Vazão

A vazão é definida pela NBR-10131, Nov, 1987 como sendo o volume de líquido bombeado em um segundo, excluindo a fuga pelas vedações e tubulações de equilíbrio de empuxo axial (quando houver).

A vazão nominal da bomba é definida como sendo aquela para qual a bomba é especificada. Entende-se, nessa especificação, a vazão para o rendimento máximo. No sistema internacional, a vazão é dada em m^3/s .

b) Altura

Alturas geométricas da instalação

- Altura geométrica de sucção: diferença de elevação entre o centro do eixo da bomba e nível de líquido do reservatório de sucção;
- Altura geométrica de recalque: diferença de elevação entre o centro do eixo da bomba e o nível líquido do reservatório de recalque;
- Altura geométrica total: diferença de elevação entre os níveis de líquido dos reservatórios de recalque e sucção.
- Altura total de elevação da bomba

Por definição, é a diferença entre a altura total na saída e altura total na entrada da bomba.

No caso da altura total de elevação nominal da bomba é definida como sendo aquela para qual a bomba é especificada. Neste caso considera-se esta altura para o rendimento máximo. A altura total em metros de coluna d'água de uma posição

qualquer do escoamento é dada pelo somatório das alturas de pressão, de velocidade e de posição. A equação 8.1 representa a altura total em um ponto de um escoamento.

$$H_t = \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (8.1)$$

pressão velocidade posição

H_t (m) - altura total de uma posição qualquer em escoamento

p (N/m²) - pressão manométrica no ponto considerado

ρ (kg/m³) - massa específica da água

g (m/s²) - aceleração da gravidade

v (m/s) - velocidade média de escoamento

z (m) - cota da posição (normalmente em relação ao nível do mar).

A Figura 8.7 mostra uma instalação de bombeamento com suas cotas e nomenclaturas. Com a definição de altura total de elevação da bomba, obtém-se a equação 8.2.

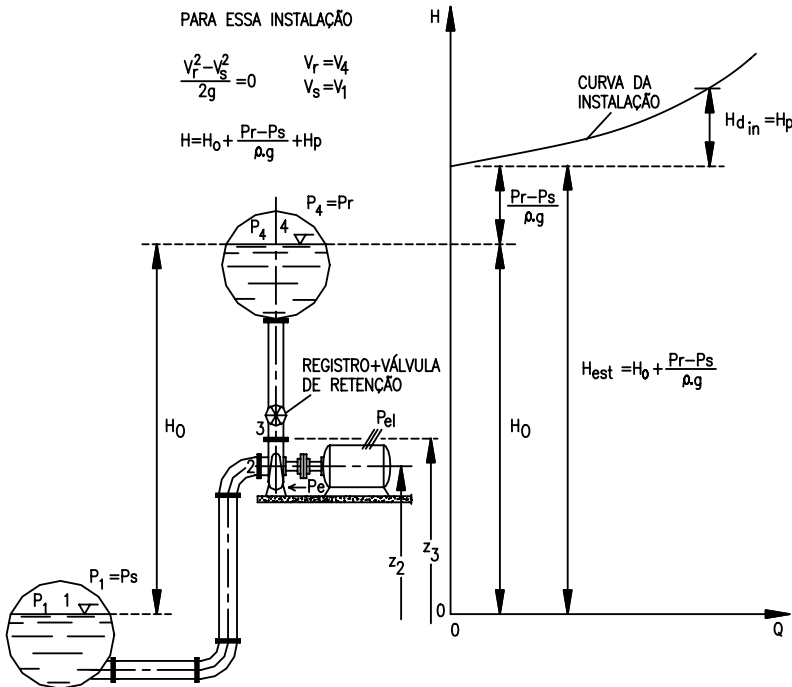


Figura 8.7 – Instalação de Bombeamento

$$H = \frac{p_3}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_3^2 - v_2^2}{2g} + (z_3 - z_2) \quad (8.2)$$

H (m) - altura total de elevação da bomba

$\frac{p_3}{\rho \cdot g}$ (m) - altura referente à pressão na saída da bomba (medida em um manômetro)

$\frac{p_2}{\rho \cdot g}$ (m) - altura referente à pressão na entrada da bomba (medida em um mano-vacuômetro)

$\frac{v_3^2 - v_2^2}{2g}$ (m) - variação de altura referente à energia cinética entre entrada e saída da bomba

$(z_3 - z_2)$ (m) - diferença entre a cota de posição de entrada e saída da bomba.

A definição da altura total de elevação pode ser analisada pelo aspecto da instalação ou do sistema. Desta forma, tem-se a seguinte equação.

$$H = H_0 + \frac{p_4 - p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_4^2 - v_1^2}{2g} + H_p \quad (8.3)$$

H (m) - altura total de elevação da bomba

H_0 (m) - altura entre os níveis do líquido dos reservatórios de recalque e sucção.

$\frac{p_4}{\rho \cdot g}$ (m) - altura referente à pressão manométrica no nível do líquido no reservatório de recalque.

$\frac{p_1}{\rho \cdot g}$ (m) - altura referente à pressão manométrica no nível do líquido no reservatório de sucção.

v_4 (m/s) - velocidade do líquido no nível do reservatório de recalque

v_1 (m/s) - velocidade do líquido no nível do reservatório de sucção

H_p (m) - altura referente às perdas de carga na linha de sucção e recalque, que é uma função da vazão ao quadrado (Q^2).

As equações 8.2 e 8.3 representam, respectivamente, a curva de uma bomba de fluxo para uma rotação constante e a curva da instalação, como mostra a Figura 8.7. O ponto de interseção entre as duas representa o ponto de funcionamento da bomba e da instalação.

8.2.2.4. Rotação Específica

A rotação específica é uma grandeza que define a geometria ou o tipo de rotor da bomba de fluxo mais adequado. Assim, tem-se:

- **Sistema internacional**

$$nq_A = \frac{10^3 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{(H \cdot g)^{3/4}} \quad (8.4)$$

n (rps) - rotação

Q (m³/s) - vazão

H (m) - altura total de elevação

g (m/s²) - aceleração da gravidade

- **Sistema técnico (unidades métricas)**

$$nq_t = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (8.5)$$

n (rpm) - rotação

Q (m³/s) - vazão

H (m) - altura total de elevação

- **Sistema técnico (unidades inglesas)**

$$nq_{t(\text{inglês})} = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (8.6)$$

n (rpm) - rotação

Q (gpm) - vazão

H (pés) - altura total de elevação

As relações entre as rotações específicas estão mostradas a seguir:

$$n_{qA} = 3 \cdot n_{qt} \quad (8.7)$$

$$n_{qt(\text{inglês})} = 51,6 \cdot n_{qt} \quad (8.8)$$

A Figura 8.8 mostra um gráfico com o rendimento em função da rotação específica de várias faixas de vazões de bombas de fluxo. As curvas apresentadas mostram

o comportamento da altura total de elevação (H), potência de eixo (P_e) e rendimento total em função da vazão para as bombas centrífugas, mistas e axiais. As bombas de pequena potência (abaixo de 100gpm) apresentam rendimentos máximos da ordem 68 (%). São bombas centrífugas de passagens de fluxo estreitas, de difícil construção e normalmente têm seu rotor fundido em uma peça só, o que dificulta seu acabamento. Entretanto, bombas centrífugas com rotações específicas um pouco maiores da ordem de 3000 e com vazões entre 3000 gpm e 10000 gpm atingem rendimentos de 90 (%) ou mais. As bombas de fluxo mistos e axiais possuem rendimentos entre 80 (%) a 87 (%).

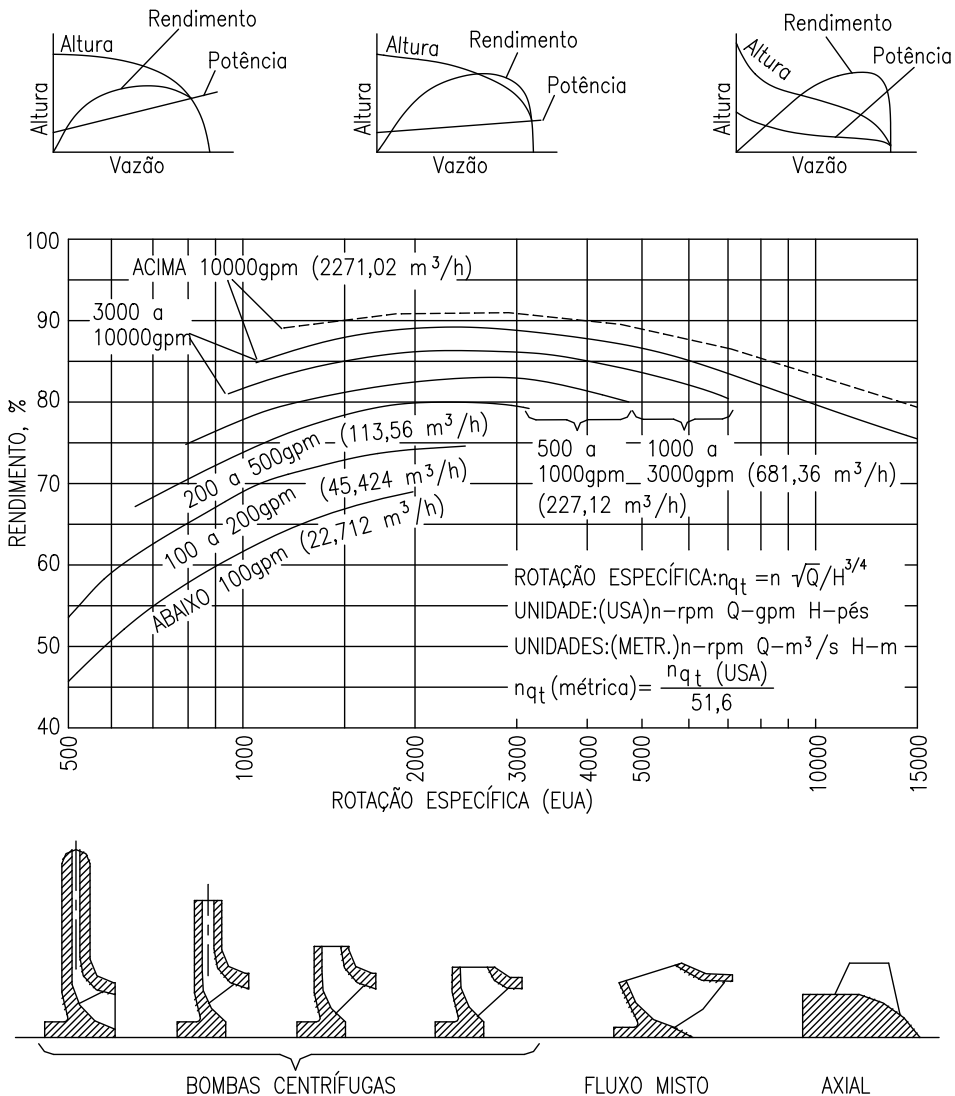


Figura 8.8 – Rotação específica das bombas de fluxo (Karassik (7))

No aspecto de curvas características nota-se que o comportamento da potência de eixo, em função da vazão, na rotação constante, é diferente para as bombas centrífugas mistas e axiais. No caso das centrífugas, a potência aumenta com o aumento da pressão e, para as mistas, a potência é praticamente constante com o aumento da vazão, enquanto que, para as axiais, a potência decresce com o aumento da vazão. Conclui-se que, para a partida de uma bomba de fluxo, para a proteção do motor elétrico, deve-se verificar se a válvula de saída da bomba está:

- bomba centrífuga - válvula fechada;
- bomba mista - válvula aberta ou fechada;
- bomba axial - válvula aberta.

É importante também enfatizar que mesmo que o motor de acionamento tenha proteção ou esteja em condições de se ter uma sobrecarga, o consumo de energia na partida torna-se maior, caso não se obedeça a essas regras de operação.

A comparação do comportamento do rendimento de uma bomba centrífuga e uma bomba axial, versus vazão, caracterizado na Figura 8.8, que a primeira tem um patamar mais achatado que a segunda. Isto quer dizer que a bomba centrífuga pode operar com uma certa variação de vazão com pouco decréscimo do rendimento, enquanto a bomba axial opera praticamente em um ponto no rendimento máximo e fora deste há um decréscimo acentuado de rendimento.

As curvas características de uma bomba centrífuga e de uma instalação são mostradas na Figura 8.9. Nesta figura, o ponto do funcionamento F da instalação coincide com o rendimento máximo da bomba. Este ponto caracteriza-se por ponto nominal ou condições nominais de funcionamento. Caso a instalação não solicitasse da bomba uma alteração da vazão, o projetista deveria selecionar a bomba para operar no ponto de máximo rendimento. Quando existe variação de vazão, este ponto varia e cabe ao projetista, antes da seleção da bomba, analisar as solicitações da instalação e qual será o ponto de vazão que estará mais tempo em operação.

Neste caso, deve-se selecionar a bomba, no seu rendimento máximo, para atender esta vazão. Esta é uma preocupação de um consumo menor de operação.

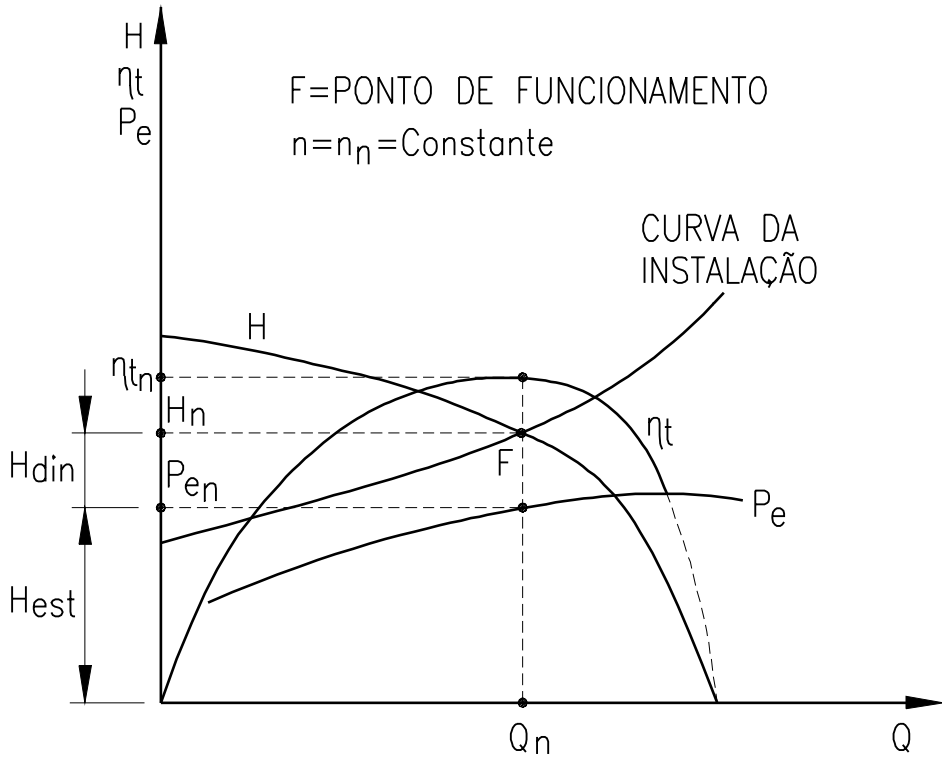


Figura 8.9 – Curvas de uma bomba centrífuga e de uma instalação

As instalações de bombeamento são as mais variadas possíveis. Desta forma, a Figura 8.10 apresenta algumas instalações, bem como as curvas da altura total de elevação da bomba e da instalação versus vazão. Baseado na equação (8.3) da instalação faz-se uma análise de cada caso. A Figura 8.10a ilustra uma instalação de bombeamento de uma fonte luminosa ou de um sistema de irrigação. Na figura 10b, que é mais comum de encontrar, representa uma bomba succionando líquido de um reservatório inferior e recalcando para um reservatório superior. No caso da Figura 8.10c poderia ser uma bomba alimentando uma caldeira, enquanto a Figura 8.10d representa uma bomba succionando líquido de um reservatório e recalcando para outro reservatório bem distante, não tendo desnível a ser vencido. Os valores de H_p e H_p representam, respectivamente, as perdas na linha de sucção e recalque.

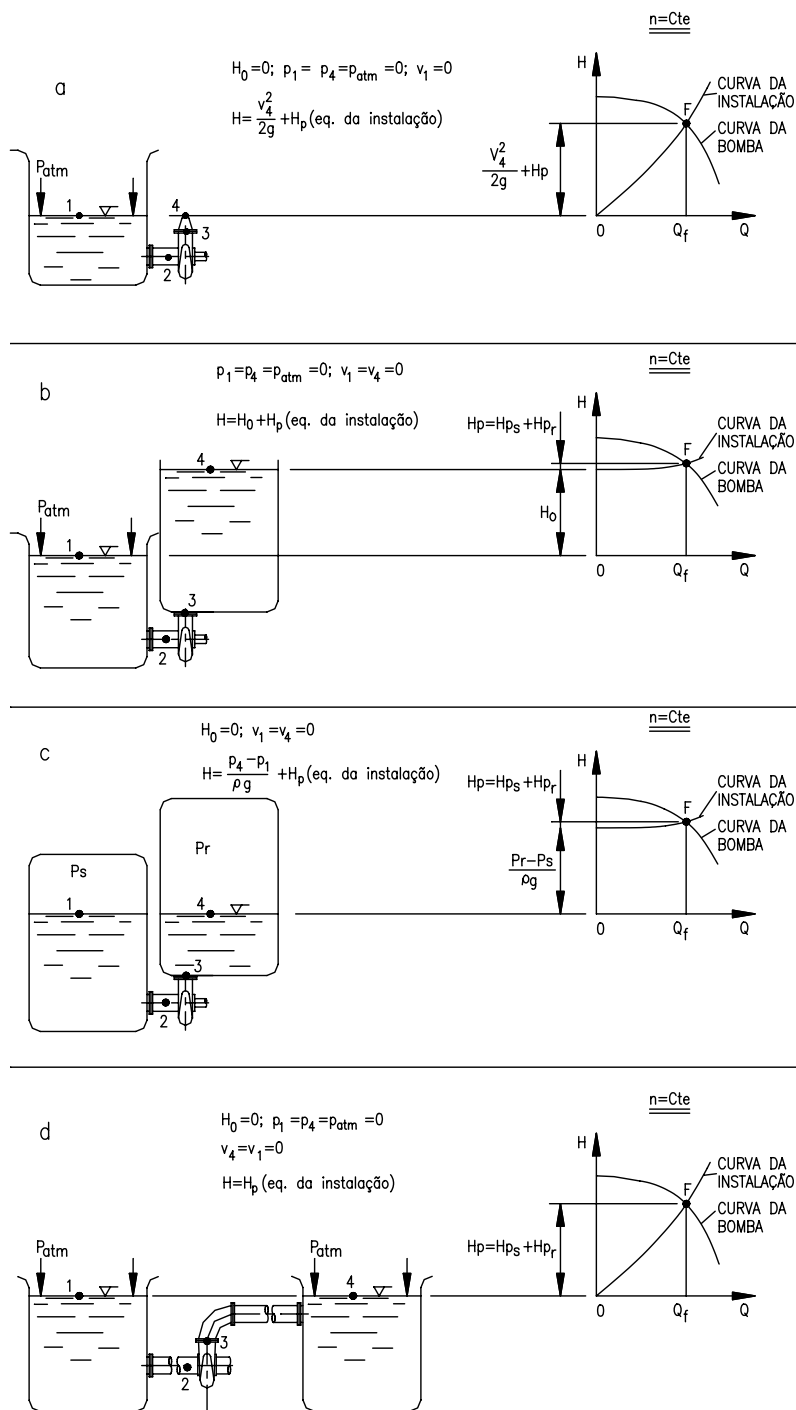


Figura 8.10 – Exemplos de instalação de bombeamento

8.2.3. Ventiladores

8.2.3.1. Definição

Os ventiladores são definidos como geradores de fluxo que trabalham com fluido no estado gasoso, provocando uma diferença de pressão inferior a 0,20 (kgf/cm²).

Portanto, com essa diferença de pressão, a massa específica do fluido praticamente não se altera. Desta forma, os ventiladores são considerados máquinas de fluxo hidráulicas.

8.2.3.2. Classificação

De acordo com a forma do rotor

- Centrífugos ou radiais
- Fluxo misto
- Axiais

Da mesma maneira que as bombas, os ventiladores centrífugos operam pequenas vazões e grandes pressões; os mistos operam médias pressões e médias vazões; os axiais grandes vazões e pequenas pressões.

A Figura 8.11 ilustra os rotores de ventiladores radial, misto e axial.

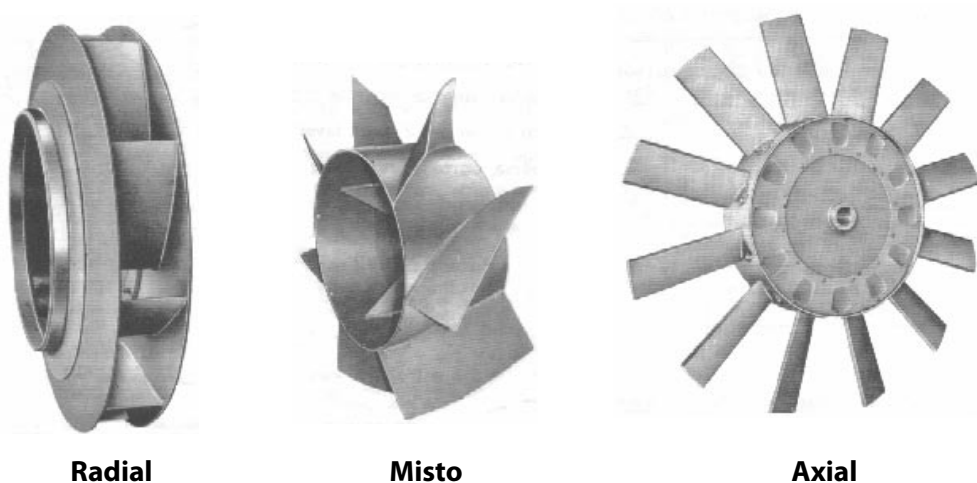


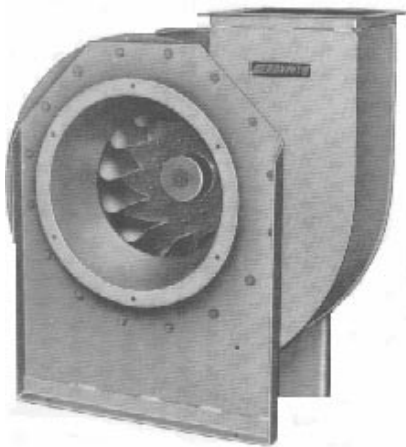
Figura 8.11 – Rotores de ventiladores

Modo de entrada do fluido no rotor

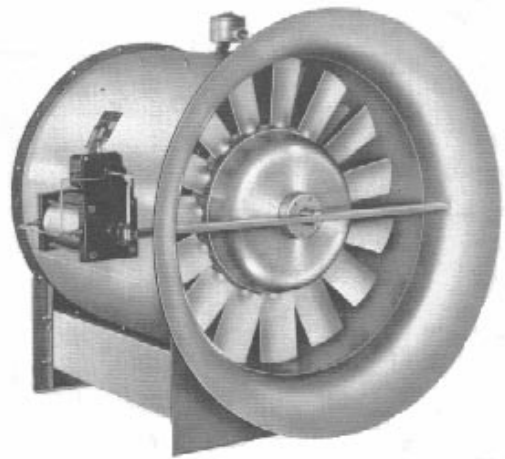
- Simples sucção
- Dupla sucção

No caso dos ventiladores, não existe a classificação de ventiladores de vários estágios como na bomba. Essa classificação está reservada para os compressores centrífugos de fluxo, que não fazem parte do contexto deste capítulo.

A Figura 8.12 mostra um ventilador centrífugo de simples sucção e um ventilador axial, ambos de eixo horizontal.



**Ventilador radial
ou centrífugo**



Ventilador axial

Figura 8.12 – Ventiladores axial e centrífugo de simples sucção

8.2.3.3. Características

(a) Vazão

É o volume de ar ventilado em um segundo. No sistema internacional, tem-se a unidade m^3/s . A vazão nominal é aquela para a qual o ventilador foi especificado e considera-se, neste caso, o ponto de máximo rendimento.

(b) Pressão

- Pressão estática – é a pressão manométrica em um determinado ponto de escoamento.
- Pressão dinâmica – é a pressão devido à velocidade média de escoamento em uma

determinada posição.

- Pressão total – é a soma algébrica da pressão estática mais a dinâmica.

A pressão total pode ser:

$$p_t = p_e + p_d \quad (8.9)$$

p_t (N/m²) - pressão total

p_e (N/m²) - pressão estática

p_d (N/m²) - pressão dinâmica $\left(p_d = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \right)$

Para os ventiladores, as pressões podem estar na unidade em milímetros de coluna d'água (mmcA) ou em metros de coluna d'água (mCA) em vez de N/m².

Diferença de pressão total de ventilador.

É a diferença de pressão total na saída (2) e na entrada (1) do ventilador.

A diferença de pressão total nominal de um ventilador é aquela pela qual o ventilador é especificado e considera-se, neste caso, o ponto de máximo rendimento.

A Figura 8.13 ilustra uma instalação com ventilador, com as posições 1 e 2, representando a entrada e saída do ventilador, enquanto as posições 0 e 3, a entrada e saída da instalação.

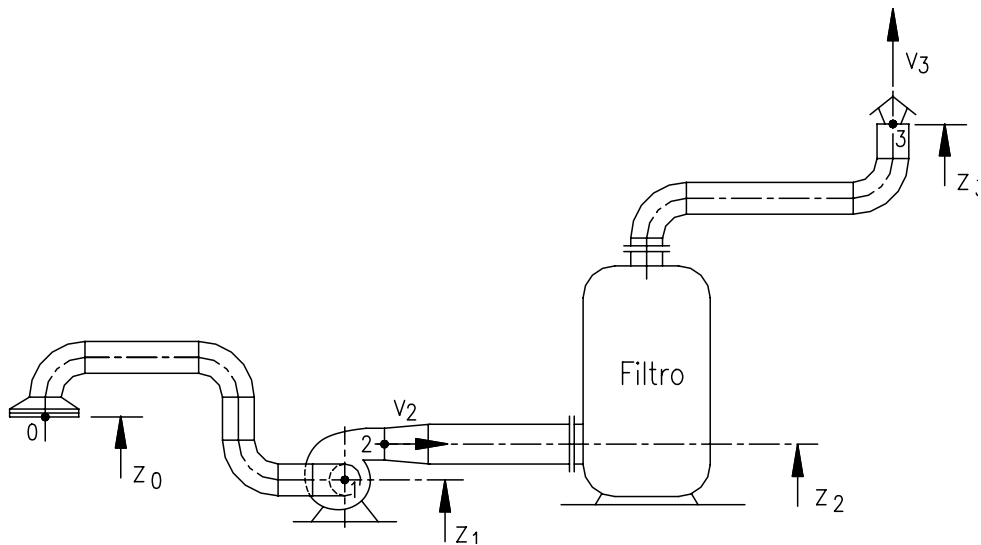


Figura 8.13 – Instalação com ventilador

Da instalação da Figura 8.13, podem-se determinar as equações do ventilador, sob o ponto de vista de ensaio (entre os pontos 1 e 2) e sob o ponto de vista da instalação (entre os pontos 0 e 3). As equações (8.10) e (8.11) ilustram, respectivamente, a equação de ensaio e da instalação em N/m^2 .

$$\Delta p_t = p_{t2} - p_{t1} = \Delta p_e + \Delta p_d \quad (8.10)$$

$$\Delta p_t = \rho \cdot \frac{v_3^2}{2} + \rho \cdot g \cdot H_p \quad (8.11)$$

Δp_t (N/m^2) - diferença de pressão total do ventilador

p_{t1} , p_{t2} (N/m^2) - pressões totais na entrada e saída

Δp_e (N/m^2) - diferença de pressão estática entre saída e entrada do ventilador

Δp_d (N/m^2) - diferença de pressão dinâmica entre saída e entrada do ventilador

ρ (kg/m^3) - massa específica do ar

v_3 (m/s) - velocidade média de escoamento em 3.

g (m/s^2) - aceleração da gravidade

H_p (m) - perda de carga na linha de sucção e pressão da instalação.

Como no caso das bombas de fluxo, as instalações com ventiladores podem também ser variadas e, desta forma, a equação (8.11) modifica-se em função do arranjo.

2.3.4. Rotação Específica

Para os ventiladores, a rotação específica no sistema internacional é:

$$nq_A = \frac{10^3 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{\left(\frac{\Delta p_t}{\rho} \right)} \quad (8.12)$$

n (rps) - rotação

Q (m^3/s) - vazão

Δp_t (N/m^2) - diferença de pressão total

ρ (kg/m^3) - massa específica

As rotações específicas no sistema internacional de rotores dos ventiladores e bombas estão ilustradas na Figura 8.14.

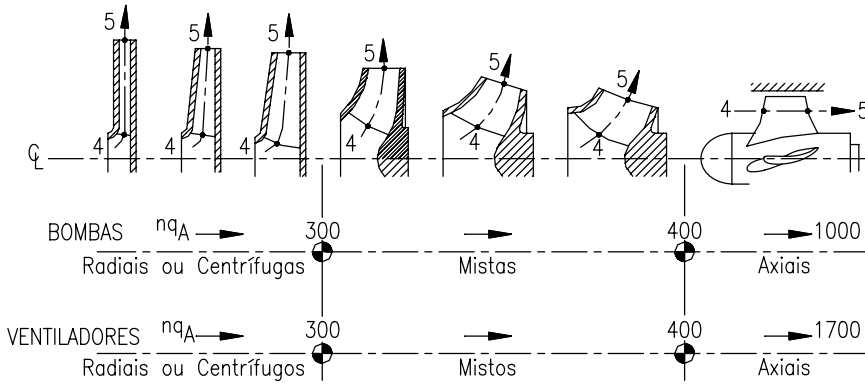


Figura 8.14 – Rotações específicas no sistema internacional de rotores de bombas e ventiladores

2.3.5. Curvas Características

As curvas características dos ventiladores têm o mesmo comportamento das bombas de fluxo. No caso dos ventiladores, a curva da instalação, representada pela equação (8.11), não possui parte estática, pois eles que operam com fluido gasoso. Portanto, a curva da instalação para a vazão zero tem Δp_t zero. As curvas dos ventiladores centrífugos e axiais para a rotação constante e a curva de uma instalação estão mostradas na Figura 8.15.

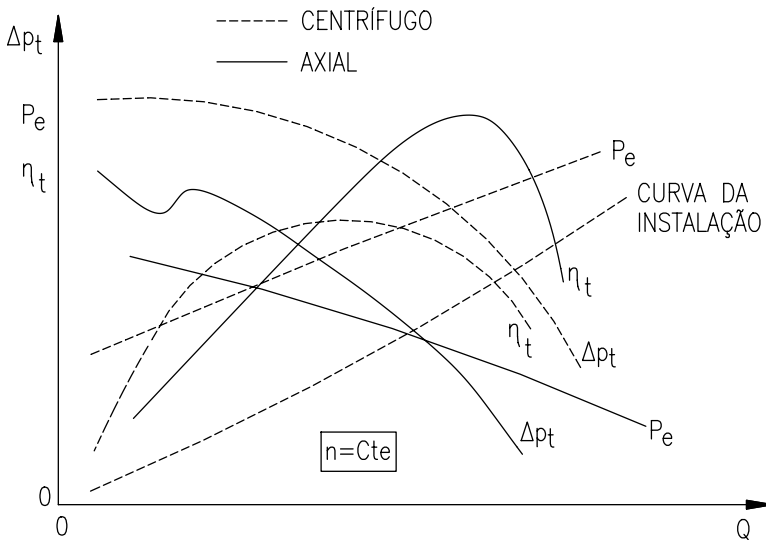


Figura 8.15 – Curvas características dos ventiladores e da instalação para $n = \text{constante}$

Como no caso das bombas de fluxo, os ventiladores, na sua partida, devem ter a válvula na saída fechada para os radiais e aberta para as axiais. Esta operação deve ser seguida em função do menor consumo na partida e para proteger o motor elétrico de acionamento.

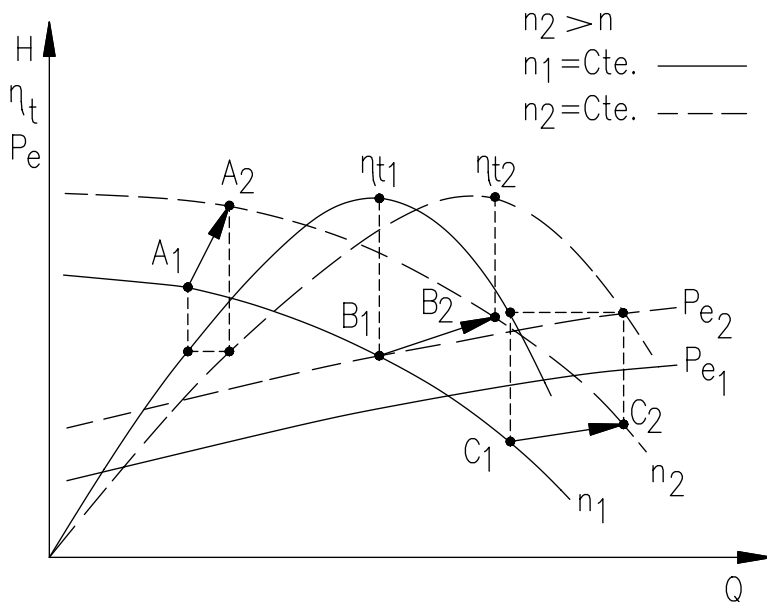
8.3. COMPORTAMENTO DAS BOMBAS DE FLUXO E VENTILADORES

8.3.1. Fatores que Modificam a Curva da Bomba e do Ventilador

8.3.1.1. Curvas da Bomba e do Ventilador com Rotação Variável

As equações (8.13), que valem para pontos homólogos (de mesmo rendimento), representam a variação da vazão (Q), da altura total de elevação (H) e da potência de eixo (P_e) de uma bomba de fluxo, em função da variação da rotação (n), enquanto a Figura 8.13 mostra o gráfico da altura total de elevação, rendimento e potência de eixo da bomba em função da vazão para a variação da rotação.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} ; \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 ; \quad \frac{P_{e_2}}{P_{e_1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (8.13)$$



Pontos A_1, B_1, C_1 são homólogos respectivamente a A_2, B_2, C_2

Figura 8.16 - Influência da rotação nas curvas características de uma bomba centrífuga

Para os ventiladores, as equações (8.13) são substituídas pelas equações (8.14), em que Δp_t representa a diferença de pressão total entre entrada e saída do ventilador. O comportamento de variação de rotação é o mesmo no ventilador se comparado com a bomba.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} ; \frac{\Delta p_{t2}}{\Delta p_{t1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 ; \frac{Pe_2}{Pe_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (8.14)$$

Dentro de certos limites de variação de rotação, as equações (8.13) e (8.14) podem prever o comportamento da bomba e ventilador, considerando que o rendimento não varia de ponto para ponto, como foi mostrado na Figura 8.16. Entretanto, no projeto de bombas e ventiladores, a alteração da rotação acarreta a mudança da velocidade tangencial em qualquer raio entre entrada e saída do rotor dos mesmos. Esta modificação faz-se alterar outras velocidades envolvidas no escoamento e a queda de rendimento existe. Desta forma, para se ter um resultado de uma bomba ou ventilador com variação de rotação, ele deve ser obtido através de ensaios em bancadas de testes em laboratórios especializados. Os diagramas obtidos em laboratório representam o campo de uma determinada bomba ou ventilador com uma faixa de rotação, mostrando as curvas de mesmo rendimento. Esses diagramas são denominados campos básicos de funcionamento. As figuras 8.17 e 8.18 representam, respectivamente, o campo básico de uma bomba centrífuga e o campo básico de um ventilador axial.

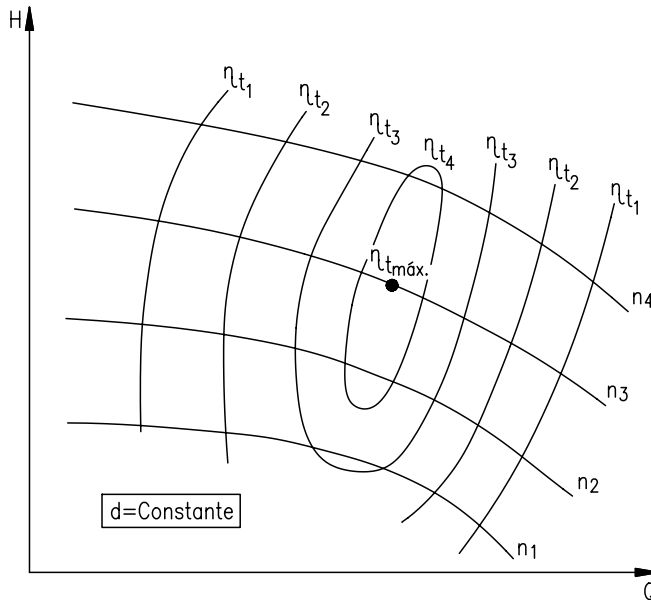


Figura 8.17 – Campo básico de funcionamento de uma bomba centrífuga

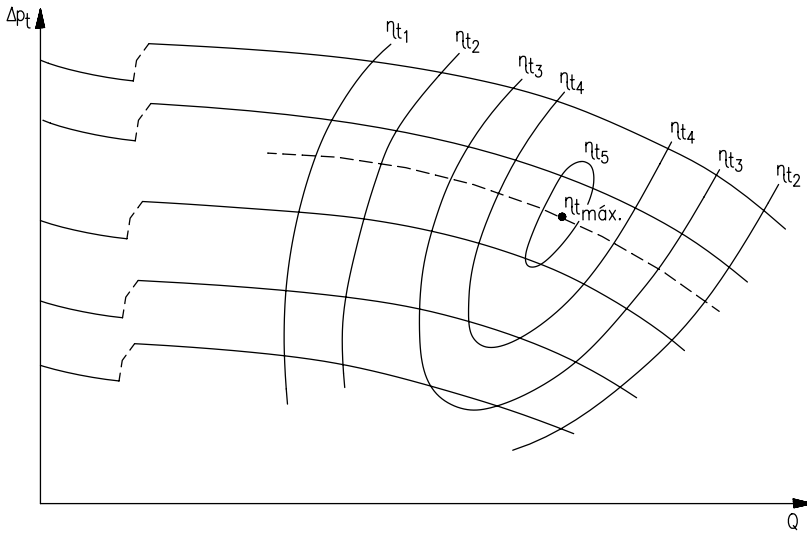


Figura 8.18 – Campo básico de funcionamento de um ventilador axial

Nas figuras 8.17 e 8.18, as curvas $n_1, n_2 \dots n_5$ representam as curvas de mesma rotação, enquanto as curvas de $\eta_{t1}, \eta_{t2} \dots \eta_{t5}$ representam as curvas de mesmo rendimento. O rendimento máximo ocorre no centro da elipse. Este ponto representa o melhor ponto de operação da bomba ou do ventilador.

8.3.1.2. Curvas da Bomba e do Ventilador com Variação do Diâmetro do Rotor

De acordo com Karassik (7), para bombas centrífugas, operando com rotação constante e com variação de diâmetro, têm-se as seguintes relações obtidas experimentalmente.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad ; \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad ; \quad \frac{Pe_2}{Pe_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3 \quad (8.15)$$

Para ventiladores centrífugos, tem-se:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad ; \quad \frac{\Delta p_{t1}}{\Delta p_{t2}} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad ; \quad \frac{Pe_2}{Pe_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3 \quad (8.16)$$

Nas equações (8.15) e (8.16) os diâmetros d_1 e d_2 referem-se aos diâmetros na saída do rotor da bomba ou do ventilador centrífugo.

Os fabricantes de bombas de fluxo ou ventiladores aproveitam a mesma carcaça, de tal forma que possa receber rotores de vários diâmetros, sem afetar sensivelmente a hidráulica do conjunto. Desta forma, os rotores são fornecidos pelo fabrican-

te, em diâmetros padrões, cobrindo uma faixa operacional da bomba ou ventilador. A Figura 8.19 mostra um campo básico de funcionamento, de uma bomba centrífuga de um determinado fabricante, com rotores de diâmetro variável operando dentro de uma mesma carcaça na rotação constante.

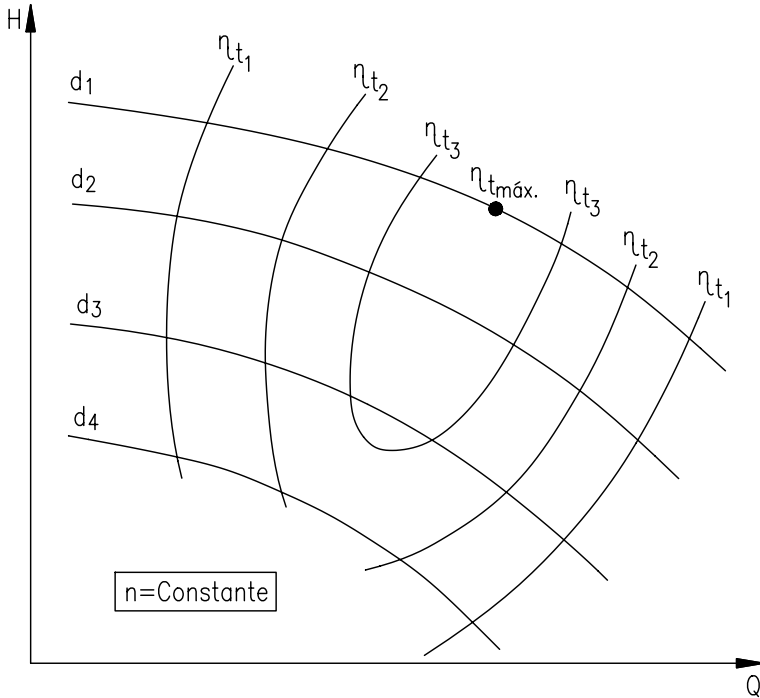


Figura 8.19 – Curva do fabricante para uma série de bombas centrífugas

8.3.2. Fatores que Modificam a Curva da Instalação da Bomba ou Ventilador

Até o momento, as variações da parcela estática da equação (8.3) da instalação permanecia constante. Neste item, considerar-se-á a variação da parcela estática, seja o nível do líquido variando ou as pressões nos reservatórios variando ou até ambas. Outras variações serão mostradas, como por exemplo, a abertura de uma válvula na saída da bomba. Apesar de os exemplos, que serão mostrados, serem de bombas, alguns casos acontecem também na instalação com ventiladores.

8.3.2.1. Variação de níveis de líquido nos reservatórios de sucção e recalque (parcela estática variável)

A Figura 8.20 mostra uma instalação de bombeamento que apresenta variações de níveis nos reservatórios de sucção e de recalque. Neste caso, a parcela estática, representada por H_0 , varia.

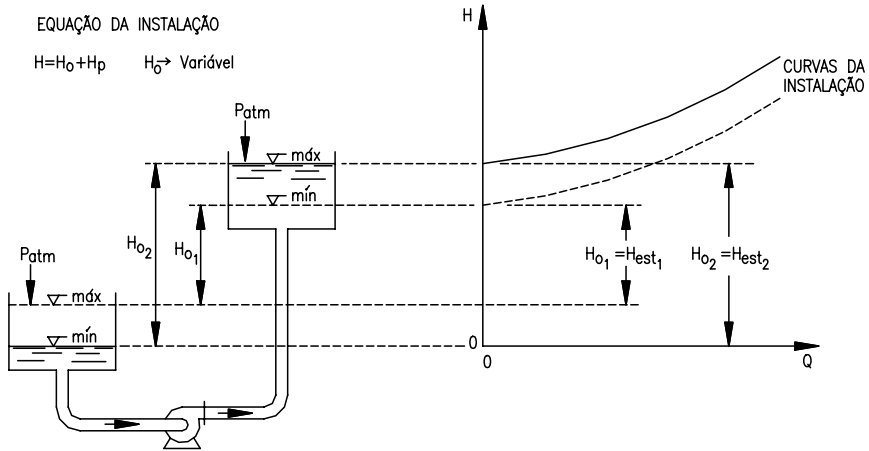


Figura 8.20 – Variações de níveis nos reservatórios de sucção e recalque

8.3.2.2. *Variação de pressão nos reservatórios de sucção e recalque*

A Figura 8.21 mostra uma instalação de bombeamento que apresenta variações de pressão nos reservatórios de sucção e recalque. Um caso prático desse tipo de instalação é uma bomba alimentando uma caldeira.

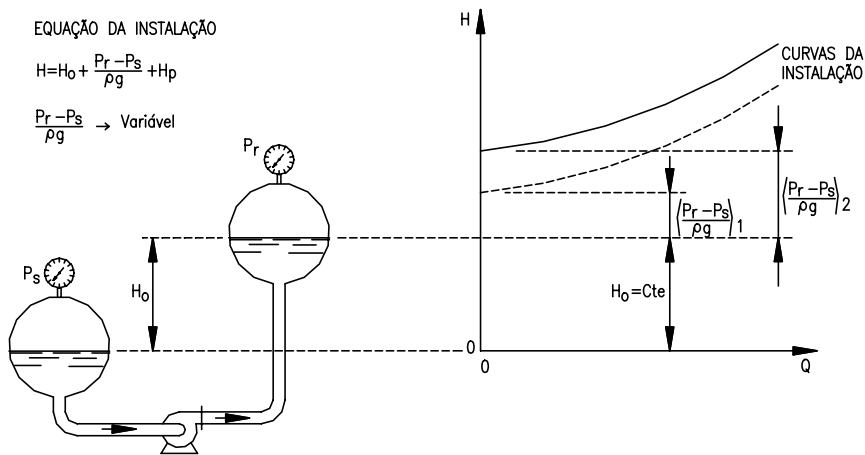


Figura 8.21 – Variação de pressão nos tanques de sucção e recalque

8.3.2.3. *Abertura e fechamento de válvula na rotação constante da bomba*

A Figura 8.22 mostra uma instalação de bombeamento utilizando a abertura e fechamento de uma válvula para variar a vazão. A variação da abertura faz variar a perda de carga na válvula.

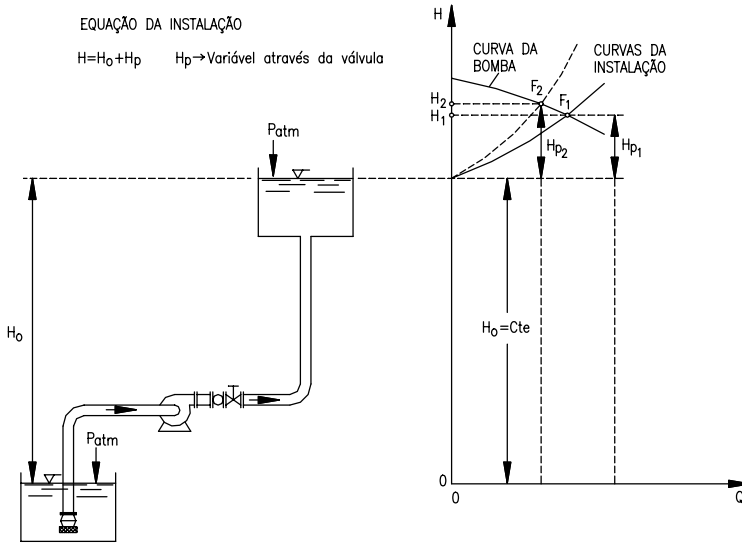


Figura 8.22 - Abertura e fechamento de válvula

8.3.2.4 - Utilização de by-pass para variar vazão na rotação constante da bomba

A Figura 8.23 apresenta uma instalação de bombeamento com by-pass.

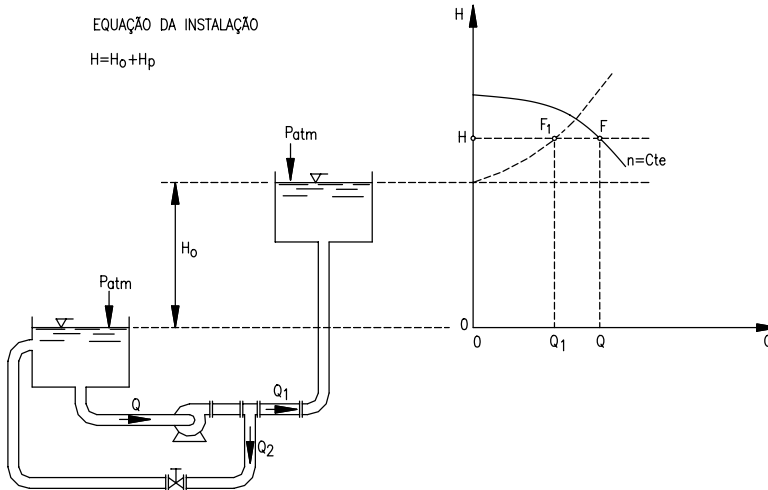


Figura 8.23 - By-pass em instalação de bombeamento

A instalação com by-pass pode ser utilizada para variar a vazão. Entretanto, este tipo de instalação é prejudicial à operação da bomba, pois consome mais energia, como será mostrado no próximo item. A bomba opera com a vazão Q , enquanto a instalação opera com vazão Q_1 , sendo $Q > Q_1$.

8.4. ANÁLISE DA BOMBA OPERANDO COM ROTAÇÃO CONSTANTE E VARIÁVEL

Como foi visto, para atender a solicitação da instalação em se tratando de uma diminuição de vazão, com a bomba operando com rotação constante n , é comum utilizar estrangular a válvula na saída da mesma, alterando o ponto de funcionamento com o aumento da perda de carga. A Figura 8.24a ilustra esse arranjo. Outro método utilizado para diminuir a vazão em uma instalação é a colocação de um by-pass na saída da bomba para o reservatório de sucção. A Figura 8.24b ilustra uma instalação com by-pass, mostrando as curvas características da instalação e da bomba operando com rotação constante n . A equação 8.17 representa a equação da instalação da Figura 8.24.

$$H = H_0 + H_p \quad (8.17)$$

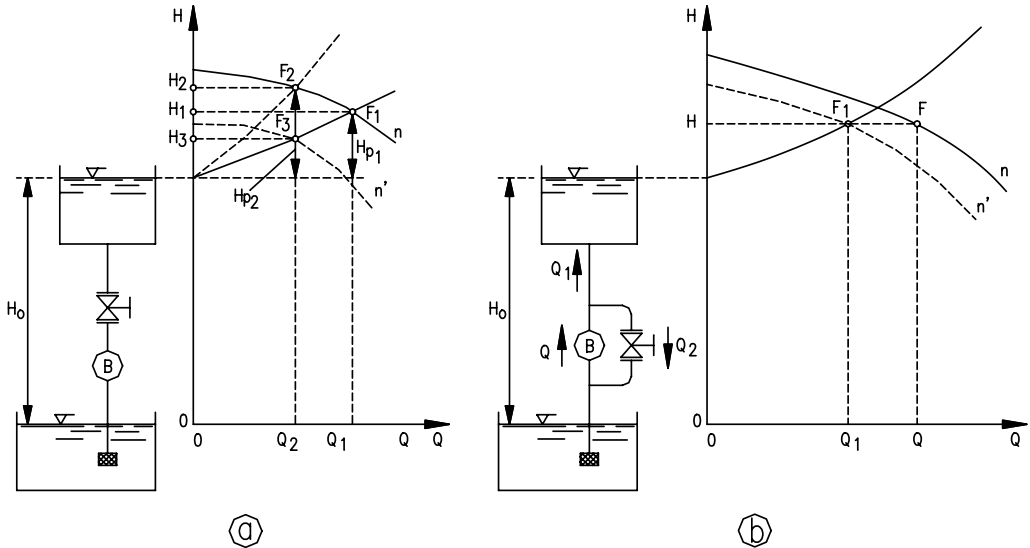


Figura 8.24 – Instalações com válvula e by-pass

Os dois casos analisados na Figura 8.24, com a bomba operando com rotação constante, variando - se a vazão através de estrangulamento da válvula ou por um by-pass, podem ser analisados com rotação variável, enfocando principalmente o aspecto da potência elétrica consumida. Desta forma, a Figura 8.24a mostra a bomba centrífuga operando com rotação constante n no ponto de funcionamento F_1 (Q_1 , H_1). Através do estrangulamento da válvula, a bomba passa a operar no ponto F_2 (Q_2 , H_2). A diminuição da vazão solicitada pela instalação poderia ser realizada pela diminuição da rotação de n para n' , que proporcionaria a bomba funcionar em F_3 (Q_2 , H_3). Conside-

rando o rendimento do motor elétrico η_{el} e da bomba η'_t , no ponto F_3 , a potência elétrica economizada está mostrada na equação 8.18.

$$P_{el} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot (H_2 - H_3)}{\eta_t \cdot \eta_{el}} \quad (8.18)$$

No caso da Figura 8.24b a bomba funciona com rotação constante n e diminui a vazão através de um by-pass. Neste caso, a bomba opera no ponto $F(Q, H)$, consumindo uma potência maior do que a necessidade da instalação, pois a mesma solicita uma vazão Q_1 . Caso utilizasse a diminuição da rotação de n para n' , a bomba funcionaria no ponto $F_1(Q_1, H)$, deixando de consumir a potência elétrica mostrada na equação 8.9.

$$P_{el} = \frac{\rho \cdot g \cdot (Q - Q_1) \cdot H}{\eta_t \cdot \eta_{el}} \quad (8.19)$$

Os arranjos convencionais mostrados anteriormente, com a bomba operando com rotação constante, penalizam energeticamente o sistema. As análises realizadas refletem sobre o aspecto da conservação de energia. Todavia, sobre o ponto de vista da bomba, a mesma, apesar de ter características flexíveis de operação, possui limites aceitáveis de funcionamento, sobre o aspecto de rendimento e também sobre fenômenos hidráulicos que ocorrem quando há variações amplas de vazão. Este assunto deverá ser analisado caso a caso.

A seleção de bombas operando com velocidade variável muitas vezes é preferida pelos projetistas pelo alto custo do acionador, se comparado com um sistema de rotação constante. Entretanto, trata-se de um custo inicial, com necessidade de análises dos custos operacional e de manutenção do equipamento relativos, respectivamente, ao menor consumo de energia e menor desgaste da bomba. Devem ser analisadas também as solicitações do sistema no que se referem às variações de vazão e o tempo de permanência de um determinado ponto de operação, principalmente na diminuição da vazão.

8.5. BALANÇO DE ENERGIA NO CONJUNTO MOTO-BOMBA OU MOTO-VENTILADOR

Seja a Figura 8.25 uma instalação mostrando um conjunto moto-bomba ou moto-ventilador, com potência elétrica de entrada P_{el} e potência hidráulica de saída P_h . Assim devem-se calcular as potências e rendimentos envolvidos.

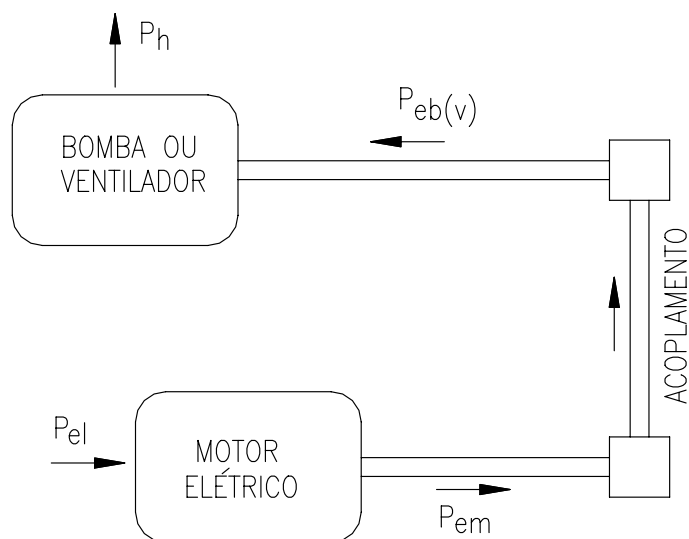


Figura 8.25 – Conjunto moto-bomba ou moto-ventilador

8.5.1. Potências

As potências são:

P_{el} - potência elétrica do motor

P_{em} - potência no eixo do motor

$P_{eb(v)}$ - potência no eixo da bomba ou ventilador

P_h - potência hidráulica da bomba ou ventilador

• Bomba:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (8.20)$$

P_h (kW)

ρ (kg)

g (m/s²)

Q (m³/s)

- **Ventilador:**

$$P_h = \Delta p_t \cdot Q \cdot 10^{-3} \quad (8.21)$$

$$P_h \text{ (kW)}$$

$$\Delta p_t \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$$

8.5.2. Rendimentos

Os rendimentos serão:

- **Rendimento do motor elétrico**

$$\eta_{el} = \frac{P_{em}}{P_{el}} \quad (8.22)$$

- **Rendimento do acoplamento da bomba ou do ventilador**

$$\eta_{ac} = \frac{P_{eb(v)}}{P_{em}} \quad (8.23)$$

- **Rendimento da bomba ou do ventilador**

$$\eta_{b(v)} = \frac{P_h}{P_{eb}} \quad (8.24)$$

- **Rendimento do conjunto moto-bomba ou moto-ventilador**

$$\eta_{mb(v)} = \frac{P_h}{P_{el}} \quad (8.25)$$

No caso do acoplamento, o rendimento é 100 (%) para acoplamento direto. Para outros, o rendimento dependerá do tipo de acoplamento. O ideal, quando possível, é executar o acoplamento direto, pois o grupo moto-bomba ou moto-ventilador terá um rendimento maior. É muito importante também que o rendimento da bomba ou do ventilador e o rendimento do motor sejam máximos possíveis e que o motor não seja sobredimensionado, o que acarretaria aumento de consumo operacional.

8.6. LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE BOMBAS

Com recursos do PROCEL/Eletróbrás foi inaugurado em 22/02/2002 na UNIFEI o Laboratório de Etiquetagem de Bombas para atender o Programa Brasileiro de

Etiquetagem – PBE, coordenado pelo INMETRO e com apoio do PROCEL.

O laboratório de Etiquetagem possui circuitos hidráulicos para os ensaios das bombas e para a calibração da instrumentação necessária para este tipo teste. No momento o LEB pode testar bombas desde poucos litros/segundo de a vazão até 100l/s, com pressões de até 200m e potência até 75cv, com instrumentação moderna e possuindo um sistema de aquisição de dados desenvolvido para este fim.

Em paralelo a construção do LEB foi criado um Grupo de Trabalho de Bombas, denominado GT-BOM com participação de oito fabricantes, representantes do INMETRO, do PROCEL, do CEPEL e da UNIFEI para discutir os procedimentos de ensaios e sua padronização. O lançamento do PBE para bombas centrífugas mono-blocos foi em 05/09/2005, com várias famílias de bombas testadas e aprovadas e com a previsão de lançamento da etiqueta em cada conjunto moto-bomba para agosto de 2006.

Como o Laboratório de Etiquetagem de Bombas está limitado na potência de 50kW, o PROCEL, através de recursos do PNUD investiu em um laboratório móvel para atender testes em conjuntos moto-bombas com potências maiores. O laboratório móvel que é dotado de instrumentação portátil para medidas hidráulicas e elétricas, com incertezas nas medidas menores possíveis, mas compatíveis com esse tipo de ensaio, tem como objetivo avaliar as condições operativas e rendimentos de sistemas de bombeamento baseados em conjuntos moto-bombas, visando identificar potenciais de conservação de energia em indústrias, companhias de saneamento básico, meio rural e prédios que se utilizam tais equipamentos.

8.6.2. Laboratório de Etiquetagem de Bombas

8.6.2.1. Circuitos do LEB

Os circuitos do LEB nos últimos quatro anos sofreram algumas modificações em função da utilização dos recursos estabelecidos pelo PROCEL.

Inicialmente o LEB apresentava um reservatório de sucção não afogado, ou seja, com o nível de água abaixo do nível do eixo da bomba a ser ensaiada. Neste caso o laboratório não dava a opção para os testes de cavitação modernamente normalizados. Possuía suas válvulas de controle da vazão e as de bloqueio operadas manualmente.

Atualmente o LEB possui basicamente o arranjo mostrado na Figura 8.26 e está dividido nos seguintes circuitos:

- Circuito de ensaio da bomba;
- Circuito de ensaio de cavitação;
- Circuito de calibração dos medidores de vazão.

Circuito de ensaio da bomba

O circuito de ensaio da bomba pode utilizar o reservatório subterrâneo de sucção ou o reservatório de atmosfera controlada. A bomba instalada succiona a água de um dos dois reservatórios. Quando utiliza o reservatório subterrâneo, há necessidade de escorvar a bomba, mas quando utiliza-se o reservatório de atmosfera controlada, isto não é necessário, pois normalmente a bomba está afogada.

A água é recalçada para a linha **R**, onde existe, na parte superior uma válvula de sangria, Figura 8.29, que tem a função de retirar o ar para que a tubulação trabalhe sempre toda cheia. A tubulação **R** alimenta as quatro linhas onde se encontram as válvulas de bloqueio, as válvulas de controle da vazão e os medidores de vazão do tipo eletromagnéticos. A escolha da tubulação de 1" a 8" fica em função da vazão da bomba a ser ensaiada.

A água pode retornar para o reservatório subterrâneo ou para o reservatório de atmosfera controlada, conforme a montagem escolhida.

A Figura 8.27 mostra um esquema da bomba a ser ensaiada utilizando na sua sucção o reservatório subterrâneo. Na entrada da bomba (posição 1) e na saída do bomba (posição 2) estão instalados anéis piezométricos para as tomadas de pressão, onde são utilizados transdutores de pressão, compatíveis com cada bomba ensaiada, Figura 8.28.

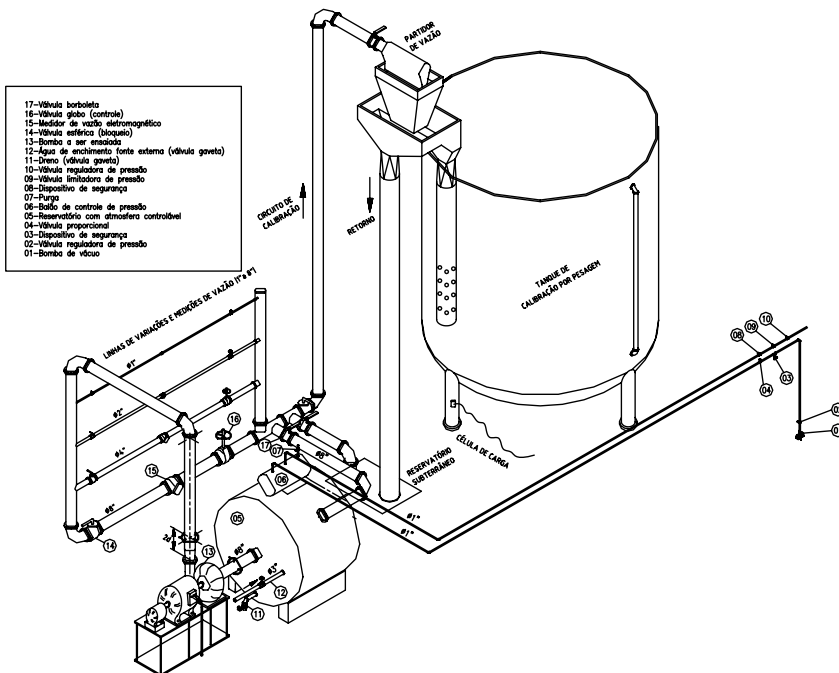


Figura 8.26 – Circuitos do Laboratório de Etiquetagem de Bombas da UNIFEI

Como exemplo foi escolhida a linha 4 ou de 8", onde na Figura 8.27 mostra a válvula de esfera V_{e4} , que durante o ensaio permanece aberta, e a válvula globo V_{g4} , que tem a função de variar a vazão da bomba durante os testes. As válvulas são motorizadas, Figura 8.30.

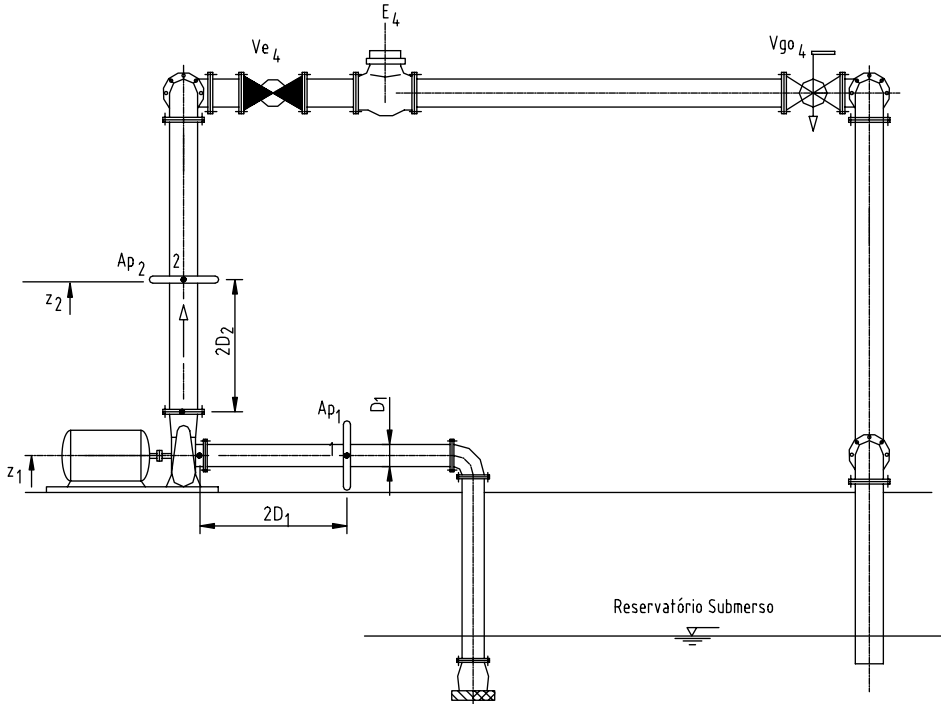


Figura 8.27 – Circuito de ensaios utilizando o reservatório submerso

A medida de vazão é realizada pelo medidor eletromagnético E, Figura 8.30.



Figura 8.28 – Anéis piezométricos e transdutores de pressão na entrada e saída da bomba

O retorno da água é no reservatório submerso e caso utilizasse o reservatório de atmosfera controlada, o retorno seria no próprio, como mostra a Figura 8.26.

A potência elétrica do motor é medida através de um transdutor de Watt instalado no painel de comando, enquanto a temperatura da água é medida pelo PT-100, instalado na tubulação de recalque R, Figura 8.29.



Figura 8.29 – Tubulação de recalque R, medida de temperatura com PT-100 e válvula de sangria

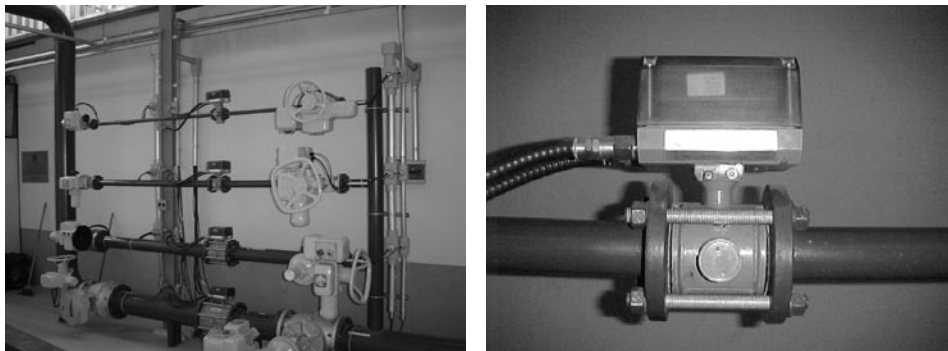


Figura 8.30 – Válvulas de esfera e globo, medidor de vazão eletromagnético

A rotação da bomba é medida manualmente através de um tacômetro digital ótico.

As medidas de pressão na entrada e saída da bomba, de vazão no eletromagnético, da temperatura da água e da potência elétrica são adquiridas através do sistema de aquisição de dados desenvolvido, utilizando o software Dasy-Lab. A Figura 8.31 apresenta o quadro de comando e proteção e o sistema de aquisição de dados.

Durante os testes a tensão permanece constante através do regulador de tensão. A Figura 8.32 mostra o regulador de tensão e transdutor de Watt instalado no quadro de comando.



Figura 8.31 – Quadro de comando e proteção, sistema de aquisição de dados



Figura 8.32 – Regulador de tensão e transdutor de Watt instalado no quadro de comando

Para os testes do conjunto moto-bomba, principalmente o de eficiência, utilizou-se a seqüência de cálculos baseado na norma ISO-9906 (12).

Circuito de ensaio de cavitação

O circuito de ensaio de cavitação é do tipo fechado na qual pela alteração da pressão na entrada, nível ou temperatura, o NPSH é variado sem alterar a altura total de elevação da bomba ou vazão até que ocorra a cavitação.

A pressão na entrada da bomba a ser testada é variada com uma bomba de vácuo (01) e através de um sistema de ar comprimido, onde válvulas especiais reguladoras de pressão (02, 09 e 10) estão instaladas nas respectivas linhas ao balão de controle (06), como mostra a Figura 8.26. Existem outros circuitos auxiliares como o de enchimento e de drenagem do reservatório de sucção.

Resumidamente, no circuito de ensaio de cavitação a bomba a ser ensaiada (13) succiona água do reservatório (05) recalca para a linha escolhida, onde se encontra o medidor de vazão e retorna ao reservatório (05) pela tubulação de 8". A bomba

está instrumentada na sua entrada e saída em termos de pressão e a altura total de elevação total de elevação é determinada.

O teste é realizado com as condições de altura e vazão constantes, controlada pelos dispositivos do circuito, até que se inicia a cavitação, tendo como ponto de determinação do NPSH requerido ou coeficiente de cavitação admissível, quando a altura total de elevação cair 3%, como rege a norma ISO-9906 (12).

A Figura 8.33 mostra uma vista geral do reservatório de sucção, onde na sua parte superior encontra-se o balão de controle e ainda apresenta a bomba de vácuo com o quadro elétrico de comando dos circuitos auxiliares.



Figura 8.33 – Reservatório de sucção, balão de controle e a bomba de vácuo e quadro elétrico

Circuito de calibração dos medidores de vazão

No circuito de calibração dos medidores de vazão a água é succionada do reservatório subterrâneo, recalca para a linha cujo medidor de vazão será calibrado. Nessa operação a válvula de retorno ao reservatório subterrâneo e a válvula de retorno ao reservatório de sucção são fechadas e a água alimenta a tubulação do circuito de calibração, que por sua vez está ligada ao partidor de vazão, como mostra a Figura 8.26. O partidor poderá alimentar o retorno ao reservatório subterrâneo ou o tanque de calibração por pesagem, conforme a posição da alavanca do mesmo.

Quando a água, instantaneamente, alimentar o tanque de calibração, será marcado o início do tempo de enchimento do mesmo e quando houver a posição do partidor para o retorno do reservatório submerso, o tempo final.

O tanque de calibração, que tem um volume de 33000 litros está apoiado em seis células de carga para 10 toneladas cada, que por sua vez medirão o peso do tanque vazio e depois da introdução da água e a diferença dará o peso relativo ao tempo de enchimento. A vazão volumétrica medida no tanque será o peso da água

dividido pelo produto da massa específica, da gravidade e do tempo de enchimento do reservatório.

As figuras 8.34a e 8.34b mostra o partidor de vazão, alimentando o tanque de calibração ou o retorno, além de mostrar na Figura 8.34c uma das células de carga do tanque de calibração.



Figura 8.34 – Partidor de vazão e célula de carga

8.6.3. Grupo de trabalho de bombas

O Grupo de Trabalho de Bombas surgiu baseado na necessidade de avaliar os fabricantes de bombas relativamente à eficiência de seus equipamentos para atender o Programa Brasileiro de Etiquetagem-PBE, que por sua vez é uma ferramenta de conservação de energia.

Assim sendo, após várias reuniões entre os representantes do PROCEL, INMETRO, UNIFEI, CEPEL, ABIMAQ e dos fabricantes de bombas constituiu-se o Grupo de Trabalho de Bombas e o denominou de GT-BOM na primeira reunião oficial em 04/09/2002 na sede da ABIMAQ em São Paulo-SP.

Na primeira reunião, coordenada pelo INMETRO e com o apoio do PROCEL apresentou-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem e salientou-se aos fabricantes que se tratava de um programa voluntário. Estabeleceu-se que inicialmente que

iriam ser testadas bombas centrífugas monobloco entre 0,5cv a 25cv e com motores trifásicos. Estabeleceu-se uma norma brasileira de ensaios para nortear os primeiros trabalhos e escolheu-se três bombas de três fabricantes distintos, dentro da faixa de potência estabelecida, para realização de avaliação de todos os laboratórios, denominada de interlaboratorial.

As três bombas seriam testadas pelo LEB-UNIFEI, depois passariam por testes em todos os laboratórios dos fabricantes e voltariam para o LEB-UNIFEI. Ao final dos testes, em uma reunião seriam comparados e apresentados os resultados. A comparação dos resultados foi bastante discrepante, o que era de se esperar, em função de cada laboratório ter uma metodologia de ensaio e utilizar diferentes instrumentações para determinação dos parâmetros necessários.

Nas reuniões subseqüentes ficou estabelecido que o representante do LEB-UNIFEI faria uma metodologia única de ensaios baseada na norma da ABNT MB-1032 (11) e visitaria todos o laboratórios dos fabricantes realizando críticas construtivas e sugestões com o intuito de padronização dos mesmos. Isto ocorreu e deu-se um prazo, estabelecido em comum acordo em uma reunião, de todos os fabricantes adequarem seus laboratórios.

Enquanto se processava a adequação dos laboratórios, o GT-BOM em paralelo se reunia e continuava com as discussões do procedimento da etiqueta, seu formato e informações a serem apresentadas. Além disso, discutiu-se o regulamento específico para uso da etiqueta nacional de conservação de energia para bombas centrífugas, denominado de ENCE. De uma forma geral, os grandes tópicos do regulamento trás as informações gerais, administração da ENCE, solicitação de autorização para uso da ENCE, extensão e autorização para uso da ENCE, alteração do laboratório de ensaios do fabricante, pedido de alteração para uso da ENCE, suspensão da autorização, cancelamento da autorização, regime financeiro, sanções contratuais, recursos e vários anexos importantes.

Com esforço e empenho, tanto em relação ao tempo e ao investimento, os fabricantes adequaram seus laboratórios e todos ficaram em igualdade de condições para iniciar o processo de etiquetagem. Várias famílias de bombas foram testadas e aprovadas.

As etiquetas foram discutidas e aprovadas em termos da informação no âmbito do GT-BOM.

O lançamento oficial do Programa Brasileiro de Etiquetagem para bombas centrífugas mono-bloco foi em 05/09/2005 na sede da ABIMAQ em São Paulo, com várias famílias de bombas testadas e aprovadas e com o lançamento da etiqueta em cada conjunto moto-bomba em agosto de 2006.

Os fabricantes que participam do programa são: KSB (Várzea Paulista-SP), Mark-Grundfos (São Bernardo do Campo-SP), THEBE Bombas Hidráulicas (Vargem Grande do Sul-SP), IMBIL (Itapira-SP), DANCOR (Rio de Janeiro-RJ), SCHNEIDER (Joinville-SC), SOMAR (Joinville-SC), FAMAC (Schroeder-SC).

O GT-BOM continuará os trabalhos nas discussões para lançamentos de novas famílias de bombas, como as mancalizadas e com a discussão do lançamento do selo PROCEL para as bombas.

8.6.4. Laboratório móvel de hidráulica

Não obstante o grande parque instalado de moto-bombas é com grande frequência que se encontram sistemas mal dimensionados, mal instalados, mal operados e com uma manutenção ineficiente acarretando em baixos rendimentos, perda de vida útil, aumento de custos de operação e manutenção e, principalmente, provocando um consumo de energia muito além do que se observaria em condições adequadas.

Neste sentido e para complementar o Laboratório de Etiquetagem de Bombas da UNIFEI, a Eletrobrás/PROCEL através de recursos do Programa das Nações Unidas-PNUD foi construído um laboratório móvel com equipamentos portáteis de avaliação e ensaios em conjuntos moto-bombas in-situ. Este sistema permitirá avaliar e identificar potenciais de economia de energia na indústria, nas companhias de saneamento básico, no meio rural e em prédios no que se refere às instalações de bombeamento, acionadas por motores elétricos, fornecendo subsídios para análises mais acuradas de viabilidade de substituição ou de modernização das tecnologias empregadas nestes sistemas, visando conservar energia.

A experiência mostra que para um teste em campo para avaliação de um conjunto moto-bomba há necessidade de trabalho de uma equipe e os equipamentos e instrumentação são na sua maioria eletrônicos, além do sistema de aquisição de dados ser bastante sensível, a adaptação do veículo é de suma importância.

O veículo para o transporte dos equipamentos e da instrumentação é um furgão contendo uma mini-oficina, um pequeno gerador, armários adaptados para alojar ferramentas, materiais de consumo; equipamentos de medidas como transdutores de pressão, manômetros de Bourdon; medidores de vazão ultra-sônicos, tubos de Pitot e molinetes para canais; sensores de temperatura e rotação; registradores de grandezas elétricas, computadores e sistema de aquisição de dados; câmera fotográfica, filmadora e GPS portátil.

A adaptação realizada no veículo tem um banco para três passageiros, atrás da cabine do motorista, com todos os requisitos de segurança exigidos à legalização do veículo junto ao DETRAN; caixa de distribuição do ar condicionado, incluindo tubos, válvulas e acessórios; divisória atrás do banco instalado; janela de vidro na porta lateral; revestimento térmico lavável em MDF; piso de compensado naval de 15mm, revestido com lamina de PVC de 2mm; bancada com tampo de madeira revestida com material resistente, área de 1,2 x 0,6m e 0,7m de altura; luminária com duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 15W e dimensões reduzidas; remoção da divisória original atrás da cabine.

A equipe que estará no laboratório móvel deverá ser formada por engenheiros e técnicos com capacidade de avaliar as condições da instalação de bombeamento, as condições operativas e as condições de manutenção, e através de medidas hidráulicas e elétricas deverão ser determinados os rendimentos dos grupos moto-bombas.

A Figura 8.35 mostra uma vista geral do Laboratório Móvel e com o detalhe do toldo na sua lateral. A Figura 8.36a apresenta a parte interior do laboratório, mostrando as caixas afixadas para acondicionamento dos instrumentos de medidas, sendo ao fundo o ar condicionado e na parte traseira superior do veículo holofotes de iluminação. A Figura 8.36b mostra a adaptação na cabine dos assentos para os passageiros, que além do motorista pode alojar mais quatro pessoas. A mini-oficina com seu ferramental e material acondicionado em gavetas está mostrada na Figura 8.36c e a mesa e cadeira para utilização de notebook e o sistema de aquisição de dados está na Figura 8.36d.



Figura 8.35 – Vista geral do Laboratório Móvel

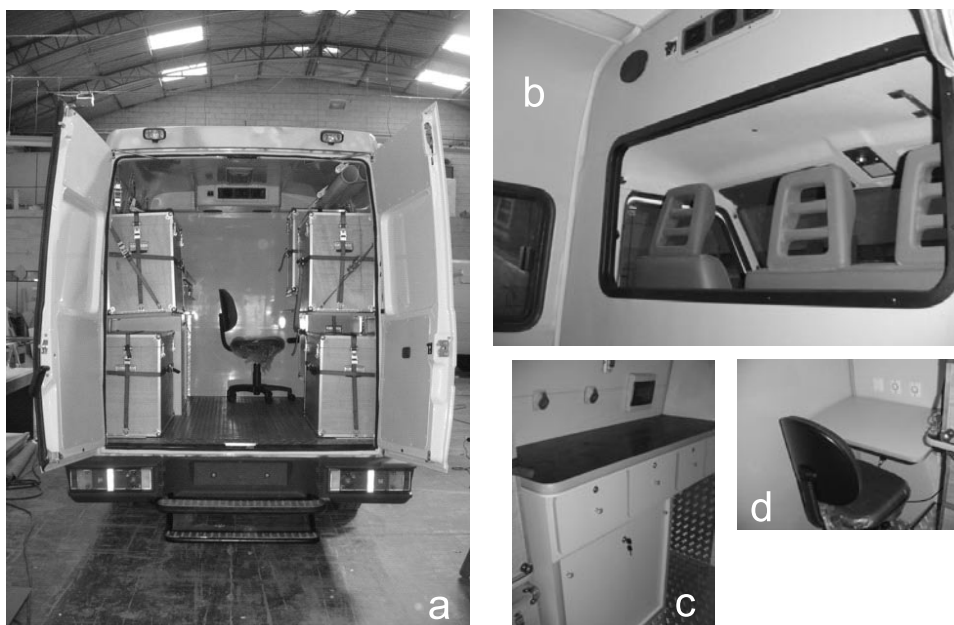


Figura 8.36 – Vistas e detalhes do interior do Laboratório Móvel

8.7. CONSIDERAÇÕES E COMENTÁRIOS

Como foi visto nos itens anteriores, as bombas de fluxo e os ventiladores operam em uma larga faixa de vazões e alturas, apresentando uma flexibilidade no seu funcionamento, seja variando-se a vazão através de uma válvula ou através de um by-pass, ambos na rotação constante, ou ainda obtendo-se essa variação com a mudança de rotação. Todavia, essa flexibilidade tem que ser encarada dentro de certos limites. O ideal seria que as máquinas funcionassem no ponto de máximo rendimento, o que proporcionaria, além de um menor consumo, um melhor desempenho e um menor desgaste na mesma. Isto se torna inviável na maioria das aplicações, pois as instalações solicitam das bombas e ventiladores a operação fora do ponto de máximo rendimento, tanto para a direita como para a esquerda desse ponto. A preocupação dos usuários ultimamente é selecionar os conjuntos moto-bombas ou moto-ventiladores com uma eficiência energética melhor possível, utilizando essas máquinas que operariam com rotação variável, principalmente na diminuição da vazão. Esta é uma alternativa que consome menos energia se comparada àquelas da bomba ou ventilador funcionando com rotação constante e variando a vazão através de válvula ou by-pass.

A seleção adequada das bombas de fluxo ou ventiladores, escolhendo os de melhor rendimento, é o primeiro passo visando a minimizar o consumo de energia.

Não basta somente a boa seleção do equipamento para contribuir com a diminuição do consumo de energia, mas é necessário o conjunto girante ser devidamente instalado e operado e ainda sofrer uma manutenção conveniente.

Um dos pontos que mais contribui para o aumento de consumo de energia é a seleção da máquina sobredimensionada. Muitas vezes, o técnico ou usuário destina um tempo razoável para selecionar uma diferença pequena de rendimento entre duas bombas, enquanto que, ao mesmo tempo, economias em potencial de até 15 (%) da energia são ignoradas através de uma atitude muito conservadora na seleção das condições requeridas de serviço. Isto quer dizer que sobre a margem de segurança imposta pelos técnicos, de uma forma conservadora e muito usual, prevendo os desgastes futuros de folgas internas, com o tempo, reduzir-se-á a capacidade efetiva da bomba. A decisão do valor da margem de segurança é complexa e depende de cada caso, pois o desgaste varia com o tipo de bomba, com o líquido bombeado, tempo de operação e outras variáveis. Entretanto, muitos técnicos excedem na escolha da margem de segurança, proporcionando um consumo maior de energia. Deve-se escolher uma margem menor de segurança e fazer uma manutenção adequada e na hora certa das partes internas da bomba, como um item de diminuição de consumo de energia.

Doolin (4) chama a atenção sobre a frequência de muitas instalações que são projetadas para operarem no futuro com uma vazão maior, mas que, inicialmente, trabalham com vazões reduzidas, operando longe dos pontos de melhor rendimento. Mesmo que este período seja de apenas dois ou três anos, poderia ser mais econômico instalar uma bomba de menor capacidade e substituí-la depois por uma de capacidade total.

Outro ponto que Karassik (7) e Doolin (3) chamam a atenção em termos de consumo excessivo de energia, é o fato de usuários selecionarem apenas uma bomba ou ventilador operando com rotação constante em uma instalação que solicita grandes variações de vazão. A máquina em determinados momentos operará com vazões reduzidas, conseguidas com o estrangulamento de uma válvula.

A solução seria escolher duas ou três bombas ou ventiladores de menor capacidade, operando em paralelo, para atender as variações da instalação. As três bombas ou três ventiladores operariam para suprir a maior capacidade do sistema e, quando fosse solicitada uma vazão menor, apenas uma máquina operaria consumindo bem menos que no primeiro caso. Uma alternativa para esse caso seria escolher uma bomba de rotação variável, como já visto anteriormente.

Outro ponto importante na seleção dessas máquinas é analisar o tipo de rotor. Os rotores fechados proporcionam melhores rendimentos se comparados com

os abertos, que possuem muitas perdas por fugas. Além disso, desgastam menos, sendo suas quedas de rendimentos menores que os de rotores abertos. Doolin (3), através de um trabalho experimental de desgaste acelerado entre rotores aberto e fechado de bombas centrífugas, analisou o aumento da folga de ambos. No trabalho, o rendimento do rotor aberto caiu 28 (%), enquanto o fechado, 14 (%).

Casos dos mais variados podem surgir na seleção de bombas de fluxo e ventiladores. Além da análise técnica na operação da máquina, deverá ser feita uma análise de custos relacionados com o consumo operacional, não esquecendo que os custos iniciais, muitas vezes, podem ser altos para que o operacional, ao longo de um tempo, torne-se baixo.

As instalações com bombas de fluxo ou com ventiladores utilizadas no meio industrial e em outros sistemas são das mais variadas possíveis. Para cada caso, deverá ser selecionada a melhor máquina para atender as solicitações da instalação, escolhendo o tipo do acionador mais viável e com bom rendimento, seja com rotação constante ou variável, com o intuito sempre de uma boa operação e boa eficiência energética. As análises, com relação aos limites de funcionamento da bomba ou ventilador, deverão ser amplamente discutidas, principalmente na variação de vazão. É importante lembrar que a máquina, operando com rotação constante e com válvula de estrangulamento, poderá ser utilizada para vários casos, em que a vazão do sistema se mantenha constante ou com pequenas variações. Para este caso, a escolha da margem de segurança razoável e os critérios de dimensionamento da válvula de controle são importantes e podem trazer uma economia mais significativa de energia.

Além da análise técnica na operação da máquina, deverá ser feita uma análise de custos relacionados com o tipo de acionador, consumo operacional, não esquecendo que os custos iniciais, muitas vezes, podem ser altos, para que o operacional, ao longo de um tempo, torne-se baixo.

Uma grande ferramenta de conservação de energia é o fabricante ter bons laboratórios e participar de grupos de trabalho que discutam com representantes do INMETRO, PROCEL e das Universidades a melhoria de seus equipamentos, com intuito de apresentar as informações ao consumidor de seus produtos da forma transparente, gerando produtos competitivos no país e no exterior.

8.8. BIBLIOGRAFIA

- (1) ABNT, NBR-10131, Bombas Hidráulicas de Fluxo (terminologia), 1987.
- (2) CARVALHO, D.F., **Instalações Elevatórias**. Bombas. Fumarc, Belo Horizonte, 1977.
- (3) DOOLIN, J.H., **Select Pumps to Cut Energy Cost. In the Chemical Engineering Guide of Pumps**, Ed. Kenneth Mc Naughton, N. Y., USA, 1984, p. 24-26.
- (4) ECK, B., Fans, Pergamon Press, 1973.
- (5) HENRY, P., **Turbomachines Hydrauliques**, Press Potytechniques et Univeritaires Romandes, Lausanne, 1992.
- (6) JOHNSON, J.D., **Variable - Speed Drives Can Cut Pumping Costs**, In the Chemical Engineering Guide of Pumps, Ed. Kenneth Mc Naughton, N. Y., USA, 1984, p. 57-58.
- (7) KARASSIK, I.J., **Centrifugal Pumps and System Hydraulics**. In the Chemical Engineering Guide of Pumps, Ed. Kenneth Mc Naughton, N. Y., USA, 1984, p. 60-82.
- (8) MACINTYRE, A. J., **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Editora Guanabara Dois, 1980.
- (9) MACINTYRE, A. J., **Ventilação Industrial e Controle de Poluição**. Editora Guanabara Dois, 1988.
- (10) MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas Industriais**. Editora Técnica Ltda, 1989.
- (11) Norma ABNT, MB-1032, Bombas Hidráulicas de Fluxo-Ensaio de Desempenho e Cavitação, nov. de 1989.
- (12) Norma ISO 9906, Rotodynamic Pumps-Hydraulic Performance Acceptance Tests-Grades 1 and 2, dec. of 1999.
- (13) VIANA, A. N. C., **Seleção, Instalação, Operação e Manutenção de Bombas Centrífugas**. Curso FUPAI, Itajubá-MG, 2003.

Capítulo 9

REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO

9.1. INTRODUÇÃO

9.1.1. Refrigeração industrial comparada ao ar condicionado para conforto

A refrigeração industrial, a exemplo do ar condicionado, tem como objetivo o controle da temperatura de alguma substância ou meio. Os componentes básicos de ambos os processos não diferem: compressores, trocadores de calor, ventiladores, bombas, tubos, dutos e controles.

Os processos acima referidos apresentam uma série de similaridades, embora se distingam em diversos aspectos, tais como componentes, procedimentos de projeto e mercadológicos. Tais diferenças justificam um tratamento diferenciado da refrigeração industrial. Não há dúvidas quanto ao predomínio do ar condicionado sobre a refrigeração industrial no que diz respeito ao número de unidades instaladas, volume de vendas e número de engenheiros empregados. Entretanto, apesar da inferioridade comercial observada, a refrigeração industrial envolve uma indústria atuante e tem reservado um papel fundamental na sociedade moderna.

A refrigeração industrial não pode ser considerada como um subproduto do ar condicionado. Ela apresenta características próprias que envolvem tanto uma mão de obra mais especializada quanto um custo maior de projeto em relação ao ar condicionado. Além disso, muitos problemas típicos de operação a baixas temperaturas, normais em instalações de refrigeração industrial, não se observam a temperaturas características do ar condicionado para conforto. Concluindo, sistemas de ar condicionado são geralmente montados em fábrica, sendo dotados de pontos de conexão hidráulica e elétrica, além das saídas para sistemas de circulação de ar. Em refrigeração industrial, por outro lado, a prática usual é a montagem no local de operação, em virtude da diversidade de instalações.

9.1.2. Refrigeração Industrial

A refrigeração industrial poderia ser caracterizada pela faixa de temperatura de operação. No limite inferior, a temperatura pode atingir a ordem de -60°C a -70°C , enquanto no limite superior podem ser observadas temperaturas de 15°C . Aplicações em que se verifiquem temperaturas menores que o limite inferior pertencem à indústria da criogenia, a qual se especializa na produção e utilização de gás natural liquefeito, oxigênio e nitrogênio líquidos. Outra forma de caracterizar a refrigeração industrial seria através das aplicações. Assim, a refrigeração industrial poderia ser descrita como sendo o processo utilizado nas indústrias químicas, de alimentos e de processos, as quais envolvem dois terços das aplicações. Outra aplicação importante está relacionada à indústria manufatureira e laboratórios, onde deve haver um controle ambiental a baixa temperatura. Algumas aplicações de bombas de calor poderiam ser associadas à refrigeração industrial, muito embora a rejeição de calor se faça a temperaturas relativamente elevadas em relação à temperatura ambiente.

9.2. CONCEITOS IMPORTANTES

9.2.1. Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar algumas definições termodinâmicas importantes para a refrigeração, bem como analisar algumas das propriedades das substâncias mais usadas em sistemas frigoríficos. Mostrará ainda, as relações entre as propriedades termodinâmicas de uma substância pura, como é o caso de alguns fluidos frigoríficos. Esta apresentação, contudo, não se deterá em análises termodinâmicas rigorosas, ao contrário, fará apenas uma apresentação superficial de tais definições e das propriedades termodinâmicas e suas inter-relações suficientes para o propósito deste estudo.

9.2.2. Definições

- Propriedades termodinâmicas - São características macroscópicas de um sistema, como: volume, massa, temperatura, pressão, etc.
- Estado Termodinâmico - Pode ser entendido como sendo a condição em que se encontra a substância.
- Processo - É uma mudança de estado, que pode ser definido como qualquer mudança nas propriedades da substância.
- Ciclo - É um processo, ou mais especificamente, uma série de processos onde o estado inicial e final do sistema (substância) são idênticos.

- **Substância Pura** - É qualquer substância que tenha composição química invariável e homogênea. Ela pode existir em mais de uma fase (sólida, líquida e gasosa), mas a sua composição química é a mesma em qualquer das fases.
- **Temperatura de saturação** - O termo designa a temperatura na qual se dá a vaporização de uma substância pura a uma dada pressão. Essa pressão é chamada "pressão de saturação" para a temperatura dada. Assim, para a água (está sendo utilizada a água como exemplo para facilitar o entendimento da definição dada acima) a 100°C, a pressão de saturação é de 1,01325 bar, e para a água a 1,01325 bar de pressão, a temperatura de saturação é de 100°C. Para uma substância pura há uma relação definida entre a pressão de saturação e a temperatura de saturação correspondente.
- **Líquido Saturado** - Se uma substância encontra-se como líquido à temperatura e pressão de saturação diz-se que ela está no estado de líquido saturado.
- **Líquido Sub-resfriado** - Se a temperatura do líquido é menor que a temperatura de saturação para a pressão existente, o líquido é chamado de líquido sub-resfriado ou líquido comprimido. Isto significa que a sua temperatura é mais baixa que a temperatura de saturação para a pressão dada, ou que a sua pressão é maior que a pressão de saturação para a temperatura dada.
- **Título (x)** - Quando uma substância se encontra parte líquida e parte vapor, na temperatura de saturação (isto ocorre, em particular, nos sistemas de refrigeração, no condensador e no evaporador), a relação entre a massa de vapor pela massa total, isto é, a massa de líquido mais a massa de vapor são chamadas de título. Matematicamente, tem-se:

$$x = \frac{m_v}{m_L + m_v} = \frac{m_v}{m_t} \quad (9.1)$$

- **Vapor Saturado** - Se uma substância se encontra completamente como vapor na temperatura de saturação ela é chamada de "vapor saturado" e, neste caso, o título é igual a 1 ou 100%, pois a massa total (m_t) é igual à massa de vapor (m_v). Frequentemente usa-se o termo "vapor saturado seco".
- **Vapor Superaquecido** - Quando o vapor está a uma temperatura maior que a temperatura de saturação é chamada de "vapor superaquecido". A pressão e a temperatura do vapor superaquecido são propriedades independentes, e neste caso, a temperatura pode ser aumentada para uma pressão constante. Em verdade, as substâncias chamadas de gases são vapores altamente superaquecidos.

A Figura 9.1 retrata a terminologia anteriormente definida para os diversos estados termodinâmicos em que se pode encontrar uma substância pura.

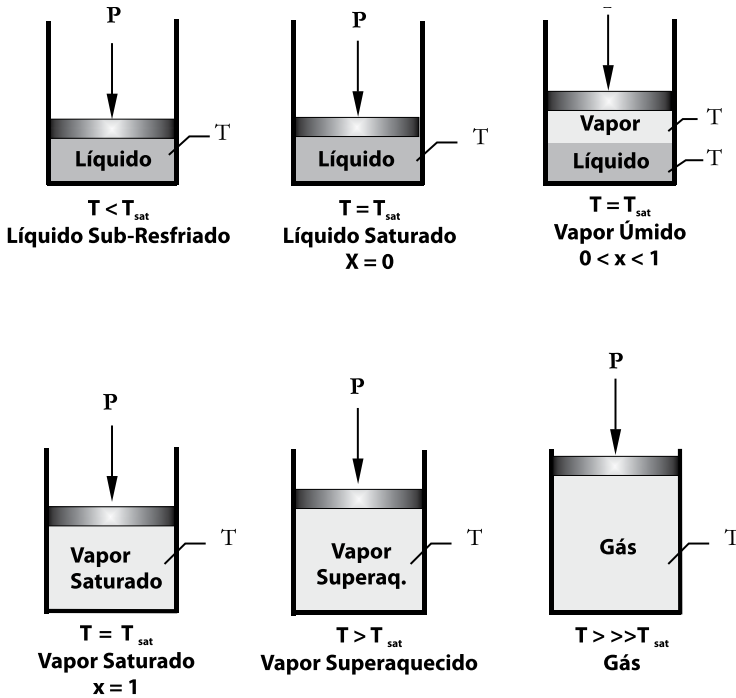


Figura 9.1 - Representação da terminologia usada para uma substância pura à pressão, P e temperatura, T, onde T_{sat} é a temperatura de saturação na pressão de saturação P

9.2.3. Propriedades termodinâmicas de uma substância

Uma propriedade de uma substância é qualquer característica observável dessa substância. Um número suficiente de propriedades termodinâmicas independentes constitui uma definição completa do estado da substância.

As propriedades termodinâmicas mais comuns são: temperatura (T), pressão (P), volume específico (v) e massa específica (η). Além destas propriedades termodinâmicas mais familiares, e que são mensuráveis diretamente, existem outras propriedades termodinâmicas fundamentais para a análise de transferência de calor, trabalho e energia, não mensuráveis diretamente, que são: energia interna (u), entalpia (h) e entropia (s).

- Energia Interna (u) - é a energia possuída pela matéria devido ao movimento e/ou forças intermoleculares. Esta forma de energia pode ser decomposta em duas partes:
 - a - Energia cinética interna, a qual é devida à velocidade das moléculas.
 - b - Energia potencial interna, a qual é devida às forças de atração que existem entre as moléculas.

As mudanças na velocidade das moléculas (energia cinética) são identificadas macroscopicamente pela alteração da temperatura da substância (sistema), enquanto que as variações na posição (energia potencial) são identificadas pela mudança de fase da substância (sólido, líquido ou vapor).

- Entalpia (h) - na análise térmica de alguns processos específicos, freqüentemente são encontradas certas combinações de propriedades termodinâmicas. Uma dessas combinações ocorre quando se tem um processo a pressão constante, resultando $u + P.v$. Assim considera-se conveniente definir uma nova propriedade termodinâmica chamada "entalpia", representada pela letra h e dada matematicamente por:

$$h = u + P \cdot v \quad (9.2)$$

- Entropia (s) - Esta propriedade termodinâmica representa, segundo alguns autores, uma medida da desordem molecular da substância ou, segundo outros, a medida da probabilidade de ocorrência de um dado estado da substância.

Cada propriedade de uma substância, em um dado estado, tem somente um valor finito. Essa propriedade sempre tem o mesmo valor para um estado dado, independentemente de como foi atingido tal estado.

9.2.4. Equações de estado

Equação de estado de uma substância pura é uma relação matemática que correlaciona pressão temperatura e volume específico para um sistema em equilíbrio termodinâmico. De uma maneira geral, pode-se expressar de forma genérica essa relação na forma da equação 9.3.

$$função(P, v, T) = 0 \quad (9.3)$$

Existem inúmeras equações de estado, muitas delas desenvolvidas para relacionar as propriedades termodinâmicas para uma única substância, outras mais genéricas, por vezes bastante complexas, com objetivo de relacionar as propriedades termodinâmicas de várias substâncias.

Uma das equações de estado mais conhecida, e mais simples, é aquela que relaciona pressão, volume específico e temperatura absoluta do gás ideal. Sendo dada por:

$$P \cdot v = R \cdot T \quad (9.4)$$

onde P é a pressão absoluta (manométrica + barométrica), v o volume específico, R a constante particular do gás e T a temperatura absoluta.

Embora a equação 9.4 seja válida para gás ideal ela representa satisfatoriamente gases reais quando estes estão a pressões relativamente baixas.

Outros exemplos de equações de estado, algumas mais simples, outras mais complexas, poderiam ser apresentados. Entretanto, dado à complexidade das equações de estado para correlacionar as propriedades termodinâmicas dos refrigerantes, seria interessante que se tivesse um meio mais rápido para obter tais relações. As tabelas de propriedades termodinâmicas, obtidas através das equações de estado, são as ferramentas que substituem as equações.

9.2.5. Tabelas de propriedades termodinâmicas dos fluidos frigoríficos

Uma maneira rápida de se determinar as propriedades termodinâmicas de uma substância é através de tabelas de propriedades termodinâmicas. Elas estão disponíveis para todos os refrigerantes existentes e são obtidas através das equações de estado do tipo mostrado anteriormente. As tabelas de propriedades termodinâmicas estão divididas em três categorias, uma que relaciona as propriedades do líquido comprimido (ou líquido sub-resfriado), outra que relaciona as propriedades de saturação (líquido saturado e vapor saturado) e as de vapor superaquecido. Em todas as tabelas as propriedades são apresentadas em função da temperatura ou pressão ou em função de ambas. Para a região de líquido+vapor, conhecido o título as propriedades devem ser determinadas através das equações:

$$u = u_L + x(u_v - u_L) \quad (9.5)$$

$$h = h_L + x(h_v - h_L) \quad (9.6)$$

$$v = v_L + x(v_v - v_L) \quad (9.7)$$

$$s = s_L + x(s_v - s_L) \quad (9.8)$$

Nessas tabelas, para condições de saturação, basta conhecer apenas uma propriedade para obter as demais, que pode ser temperatura ou pressão, propriedades diretamente mensuráveis. Para as condições de vapor superaquecido é necessário conhecer duas propriedades para se obter as demais. Nas tabelas de propriedades saturadas, valores para entalpia (h) e entropia (s) em uma determinada condição, como, por exemplo, temperatura de $0,0^\circ\text{C}$ e líquido saturado ($x=0$), são adotados, arbitrariamente, como valores de referência, e os demais valores de entalpia e entropia são calculados em relação a esses valores de referência.

Diferentes autores podem construir tabelas dos mesmos refrigerantes com referências diferentes. Assim, o valor numérico da entalpia (h) e entropia (s), em diferentes tabelas, podem apresentar valores completamente diferentes para o mes-

mo estado termodinâmico sem, contudo, modificar os resultados de nossas análises térmicas, bastando para tanto que se utilizem dados de entalpia e entropia de uma mesma tabela, ou de tabelas que tenham a mesma referência. Para dados retirados de duas ou mais tabelas com referências diferentes, estes devem ser devidamente corrigidos para uma única referência.

9.2.6. Diagramas para fluidos refrigerantes

As propriedades termodinâmicas de uma substância são, freqüentemente, apresentadas, além das tabelas, em diagramas que podem ter por ordenada e abscissa, temperatura e entropia, entalpia e entropia (Mollier), pressão absoluta e volume específico, pressão absoluta e entalpia, etc.

Os diagramas tendo como ordenada pressão absoluta (P) e como abscissa a entalpia específica (h) são mais freqüentes para os fluidos frigoríficos, visto que estas coordenadas são mais adequadas a representação do ciclo termodinâmico de refrigeração por compressão de vapor. A Figura 9.2 mostra as curvas essenciais do diagrama pressão-entalpia para o refrigerante R22. Diagramas completos, para a leitura dos dados a serem utilizados nas análises térmicas de sistemas frigoríficos são dados em anexo.

Estes diagramas são úteis, tanto como meio de apresentar a relação entre as propriedades termodinâmicas, como porque possibilitam a visualização dos processos que ocorrem em cada uma das partes do sistema. Assim, no estudo de um ciclo de refrigeração será usado o diagrama de Mollier para mostrar o que ocorre em cada componente do sistema de refrigeração (compressor, condensador, válvula e evaporador). Será representado, também, sobre o diagrama de Mollier o ciclo completo de refrigeração por compressão de vapor.

No diagrama de Mollier podem-se destacar três regiões características, que são:

- a) A região à esquerda da linha de líquido saturado ($x=0$) chamada de região de líquido sub-resfriado.
- b) A região compreendida entre as linhas de líquido saturado ($x=0$), e vapor saturado ($x=1$), chamada de região de vapor úmido ou região de líquido + vapor.
- c) A região à direita da linha de vapor saturado ($x=1$), chamada de região de vapor superaquecido.

Para determinar as propriedades termodinâmicas de um estado, nas condições saturadas (sobre as linhas de vapor saturado e líquido saturado), basta conhecer uma propriedade e o estado estará definido. Para as regiões de líquido sub-resfriado e vapor superaquecido é necessário conhecer duas propriedades para definir um estado termodinâmico.

9.3. REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

9.3.1. Introdução

Quando um líquido é introduzido num vaso inicialmente em vácuo e cujas paredes são mantidas a temperatura constante, ele se evapora imediatamente. No processo, o calor latente de vaporização, ou seja, o calor necessário para a mudança do estado líquido para vapor, é fornecido pelas paredes do vaso. O efeito de resfriamento resultante é o ponto de partida do ciclo de refrigeração, que será examinado neste capítulo.

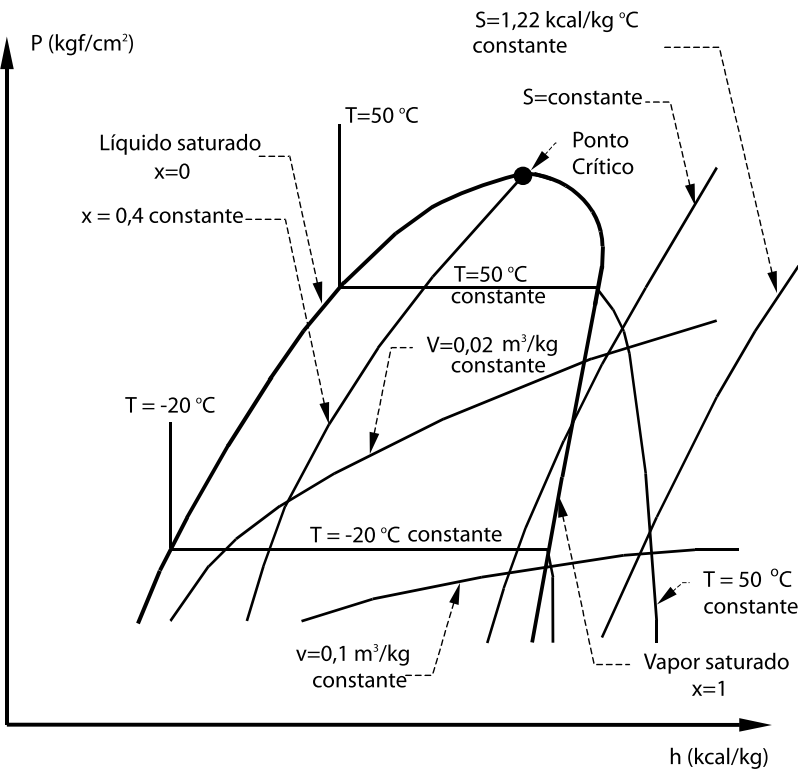


Figura 9.2 - Esquema do diagrama P-h para o refrigerante R-22

À medida que o líquido se evapora, a pressão dentro do vaso aumenta até atingir, eventualmente, a pressão de vapor de saturação para a temperatura considerada.

Depois disto nenhuma quantidade de líquido evaporará e, naturalmente, o efeito de resfriamento cessará. Qualquer quantidade adicional de líquido introduzido permanecerá no estado líquido no fundo do vaso. Se for removida parte do vapor

do recipiente conectando-o ao lado de sucção de uma bomba, a pressão tenderá a cair, isto provocará uma evaporação adicional do líquido. Neste aspecto, o processo de resfriamento pode ser considerado contínuo. Necessita-se: um líquido adequado, chamado refrigerante, um recipiente, onde a vaporização e o resfriamento sejam realizados, chamado de evaporador e uma bomba para remoção do vapor, chamado, por razões que serão evidentes mais tarde, de compressor.

O sistema desenvolvido até agora não é prático porque envolve um consumo contínuo de refrigerante. Para evitar isto é necessário converter o processo num ciclo. Para fazer o vapor retornar ao estado líquido, deve-se resfriá-lo com qualquer meio disponível para isto. Este é usualmente a água ou o ar a uma temperatura, substancialmente, mais elevada do que a temperatura do meio que está sendo resfriado no evaporador. A pressão de vapor correspondente à temperatura de condensação deve, portanto, ser bem mais elevada do que a pressão no evaporador. O aumento desejado de pressão é provocado pela "bomba", isto é, pelo compressor.

A liquefação do refrigerante é realizada num condensador que é, essencialmente, um recipiente resfriado externamente pelo ar ou água. O gás refrigerante quente a alta pressão é conduzido do compressor para o condensador, aí se liquefazendo. Como o refrigerante se encontra com líquido a alta pressão na saída do condensador é fácil completar o ciclo pela inclusão de uma válvula ou outro dispositivo regulador, que controlará a injeção de líquido no evaporador e ao mesmo tempo reduzirá sua pressão. Este é um componente é chamado de válvula de expansão.

9.3.2. Ciclo teórico simples de compressão de vapor

Um ciclo térmico real qualquer deveria ter para comparação o ciclo de CARNOT, por ser este o ciclo de maior rendimento térmico possível. Entretanto, dado as peculiaridades do ciclo de refrigeração por compressão de vapor, define-se um outro, ciclo chamado de **ciclo teórico**, no qual os processos são mais próximos aos do ciclo real, facilitando a sua comparação. Existem vários ciclos termodinâmicos ideais diferentes do ciclo de Carnot, como, por exemplo, o ciclo ideal de Rankine, dos sistemas de potência a vapor, o ciclo padrão ar Otto, para os motores a combustão interna, o ciclo padrão ar Brayton, das turbinas a gás, etc. Este ciclo teórico ideal é aquele que terá melhor rendimento operando nas mesmas condições do ciclo real.

O ciclo teórico simples de refrigeração por compressão de vapor é mostrado na Figura 9.3, construído sobre um diagrama de Mollier no plano P-h. A Figura 9.4 é o esquema básico com os componentes principais de um sistema frigorífico suficientes, teoricamente, para realizar-se o ciclo teórico mostrado na Figura 9.3. Os equipamentos esquematizados na Figura 9.4 representam, genericamente, qualquer dispositivo capaz de realizar o processo específico indicado.

Os processos termodinâmicos que constituem o ciclo teórico em seus respectivos equipamentos são:

- a) Processo [1]→[2], que ocorre no compressor. É adiabático reversível e, portanto, isentrópico, como mostra a Figura 9.3. O refrigerante entra no compressor à pressão do evaporador, P_0 , e com título, $x=1$. O refrigerante é então comprimido até atingir a pressão de condensação, e neste estado está superaquecido com temperatura T_2 , que é maior que a temperatura de condensação T_c .
- b) Processo [2]→[3], que ocorre no condensador. É um processo de rejeição de calor do refrigerante para o meio de resfriamento a pressão constante. Neste processo o fluido frigorífico é resfriado da temperatura T_2 até a temperatura de condensação T_c e a seguir condensado até se tornar líquido saturado na temperatura T_3 igual à temperatura T_c .
- c) Processo [3]→[4], que ocorre no dispositivo de expansão. É uma expansão irreversível a entalpia constante, processo isoentálpico, desde a pressão P_c e líquido saturado ($x=0$), até a pressão de vaporização, P_0 . Observe que o processo é irreversível e, portanto, a entropia, s_4 , do refrigerante na saída será maior que a entropia, s_3 , do refrigerante na entrada do dispositivo de expansão.

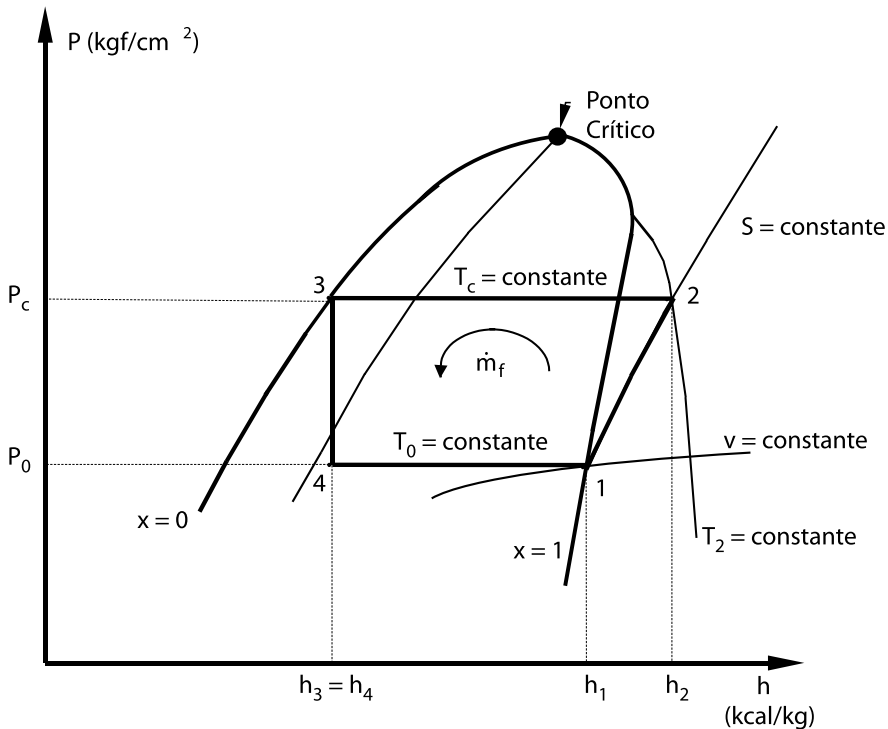


Figura 9.3 - Ciclo teórico simples de refrigeração por compressão de vapor

d) Processo [4]→[1], que ocorre no evaporador. É um processo de transferência de calor a pressão constante P_o , conseqüentemente a temperatura constante, T_o , desde vapor úmido no estado 4 até atingir o estado de vapor saturado seco ($x=1$). Observe que o calor transferido ao refrigerante no evaporador não modifica a temperatura do refrigerante, mas somente seu título.

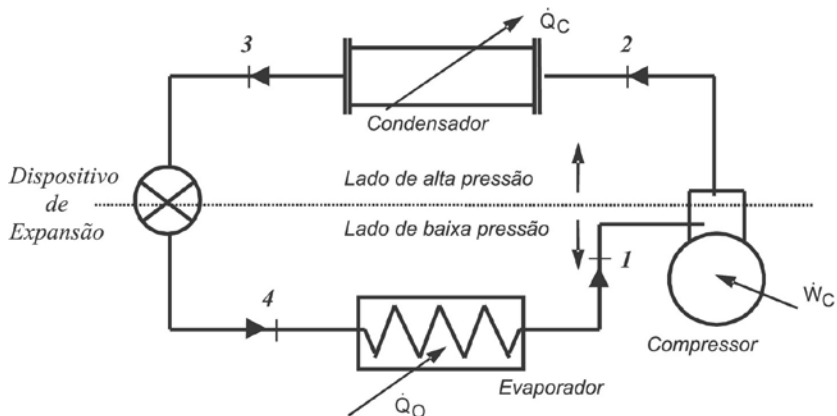


Figura 9.4 - Esquema do sistema de refrigeração com os equipamentos básicos

9.3.3. Ciclo real simples de compressão de vapor

As principais diferenças entre o ciclo real e o ciclo teórico simples são: a perda de carga e a queda de pressão nas linhas de descarga, de líquido e de sucção, assim como no condensador e no evaporador. Estas perdas de carga ΔP_d e ΔP_s estão mostradas na Figura 9.5.

Como valores referenciais, a perda de carga total não deve exceder o equivalente às quedas de temperatura de saturação, para as respectivas pressões, de acordo com o indicado abaixo:

- Linha de Sucção: 2,2 °C para fluidos halogenados e 1,1 °C para a amônia.
- Linhas de líquido: 1,1 °C.
- Linhas de descarga: 1,1 °C.

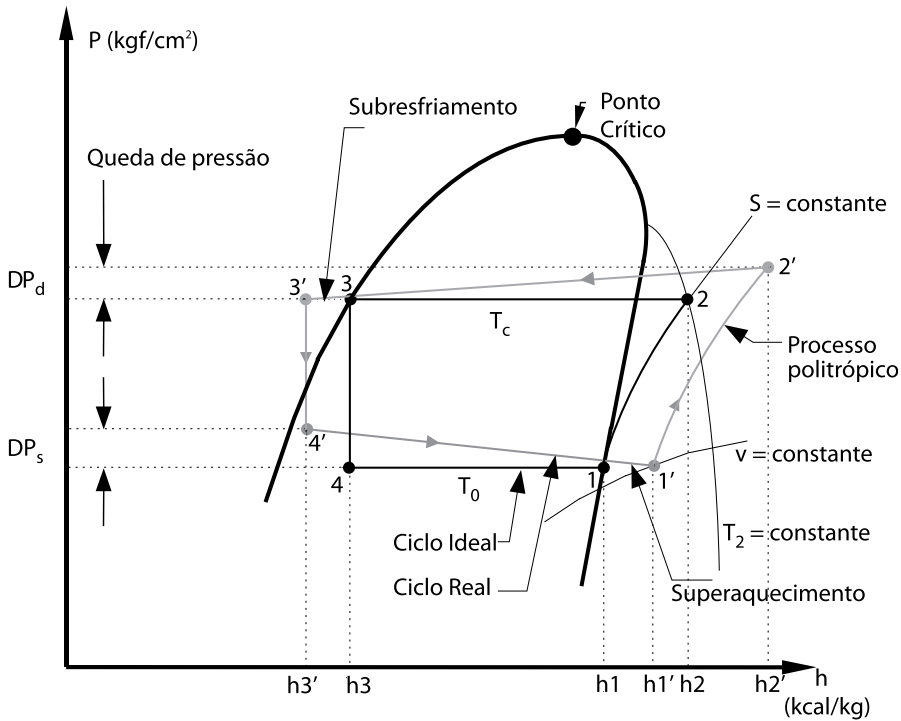


Figura 9.5 - Diferenças entre o ciclo real e o teórico simples

Outras diferenças são o sub-resfriamento do refrigerante na saída do condensador (nem todos os sistemas são projetados com sub-resfriamento), o superaquecimento na sucção, que tem a finalidade de evitar a entrada de líquido no compressor e o processo de compressão, que no ciclo real é um processo de compressão politrópico ($s_1 \neq s_2$), no lugar do processo isentrópico do ciclo teórico. Devido ao superaquecimento e ao processo politrópico a temperatura de descarga do compressor, T_2 , pode ser muito elevada, tornando-se um problema em relação aos óleos lubrificantes usados nos compressores frigoríficos, exigindo, por vezes, o resfriamento forçado do cabeçote dos compressores (principalmente com o refrigerante R-717 e R-22 em baixas temperaturas de vaporização). Muitos outros problemas de ordem técnica, dependendo do sistema e de sua aplicação, podem introduzir diferenças significativas além das citadas até aqui. Problemas técnicos e de operação serão abordados posteriormente.

9.3.4. Balanço de energia para o ciclo de refrigeração

O balanço de energia do ciclo de refrigeração é feito considerando-se o sistema operando em regime permanente nas condições de projeto, ou seja, à temperatura de condensação, T_c , e temperatura de vaporização, T_0 . Os sistemas real e

teórico têm comportamento idêntico, tendo o ciclo real apenas um desempenho pior. A análise do ciclo teórico nos permitirá, de forma mais simples, verificar quais parâmetros têm influência no rendimento do ciclo.

9.3.4.1. Capacidade frigorífica do ciclo, \dot{Q}_o

A capacidade frigorífica, \dot{Q}_o , é a quantidade de calor por unidade de tempo retirada do meio que se quer resfriar (produto), através do evaporador do sistema frigorífico. Este processo está indicado na Figura 9.6. Para o sistema operando em regime permanente, desprezando-se a variação de energia cinética e potencial, tem-se, pela Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\dot{Q}_o = \dot{m}_f (h_1 - h_4) \quad (9.9)$$

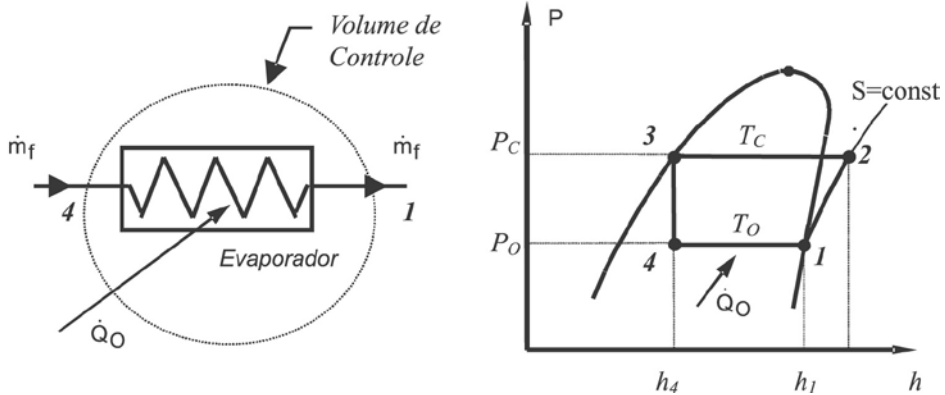


Figura 9.6 - Volume de controle aplicado ao evaporador e indicação do processo 4-1 no diagrama P-h

Normalmente, a capacidade frigorífica do sistema de refrigeração é conhecida, e se forem estabelecidos o ciclo e o fluido frigorífico a serem usados, pode-se então determinar o fluxo de massa, pois as entalpias h_1 e h_4 são conhecidas e, conseqüentemente, o compressor estará determinado.

A quantidade de calor por unidade de massa de refrigerante retirada no evaporador é chamada de “**Efeito Frigorífico**”, EF, e é um dos parâmetros usados para a escolha do fluido frigorífico.

$$EF = h_1 - h_4 \quad (9.10)$$

9.3.4.2. Potência teórica do compressor, \dot{W}_c

Potência teórica do compressor é a quantidade de energia na unidade de tempo que deve ser fornecida ao fluxo de refrigerante pelo compressor, para a realização do processo [1] -->[2] do ciclo teórico, como indicado na Figura 9.7. No sistema de refrigeração real o compressor perde calor para o meio ambiente, entretanto, este calor é pequeno quando comparado à energia necessária para realizar o processo de compressão. Aplicando-se a Primeira Lei da Termodinâmica, em regime permanente, e desprezando-se a variação de energia cinética e potencial, resulta na equação 9.11.

$$\dot{W}_c = \dot{m}_f (h_2 - h_1) \tag{9.11}$$

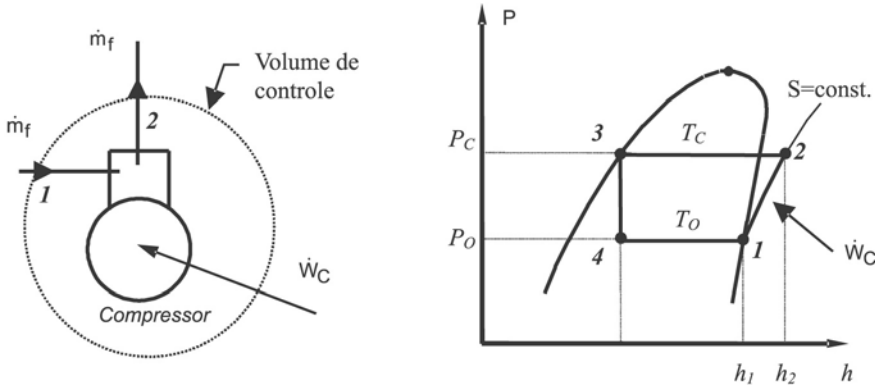


Figura 9.7 - Volume de controle aplicado ao compressor e indicação do processo 1-2 no diagrama P-h

9.3.4.3. Fluxo de calor rejeitado no condensador, \dot{Q}_c

De maneira análoga à realizada para o evaporador, conforme mostra a Figura 9.8, a quantidade de calor por unidade de tempo a ser rejeitada no condensador, para um meio qualquer de resfriamento, quando o sistema de refrigeração estiver operando em regime permanente na temperatura de condensação T_c e de vaporização T_o , resulta pela Primeira Lei da Termodinâmica em:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_f (h_2 - h_3) \tag{9.12}$$

Assim, o condensador a ser especificado para o sistema de refrigeração deve ser capaz de rejeitar a taxa de calor calculada pela equação 9.12, a qual, sem dúvida, depende da carga térmica do sistema, como mostra a análise térmica do evaporador.

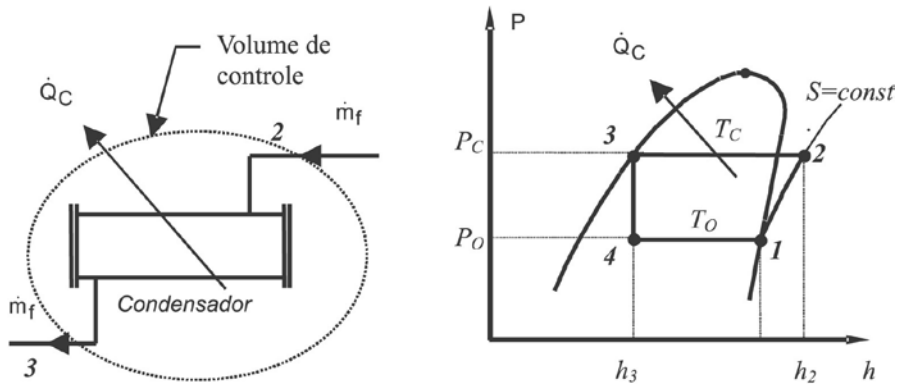


Figura 9.8 - Volume de controle aplicado ao condensador e indicação do processo 2-3 no diagrama P-h

9.3.4.4. Dispositivo de expansão

No dispositivo de expansão, que pode ser de vários tipos, o processo teórico é adiabático, como mostra a Figura 9.9, e, neste caso, aplicando-se a Primeira Lei da Termodinâmica, desprezando-se a variação de energia cinética e potencial, tem-se:

$$h_4 = h_3 \quad (9.13)$$

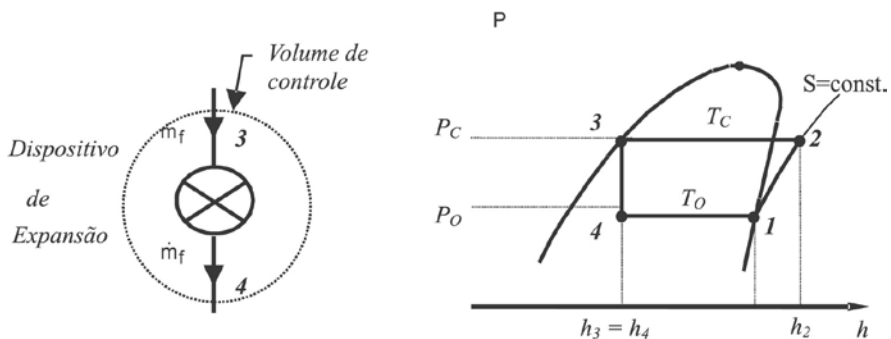


Figura 9.9 - Volume de controle aplicado ao dispositivo de expansão e indicação do processo 3-4 no diagrama P-h

9.3.4.5. Coeficiente de performance do ciclo, COP

O coeficiente de performance, COP, é um parâmetro importante na análise das instalações frigoríficas. Embora o COP do ciclo real seja sempre menor que o do ciclo teórico, para as mesmas condições de operação, pode-se, com o ciclo teórico, verificar quais parâmetros influenciam no rendimento do sistema, assim como o grau de influência de cada um destes parâmetros. O COP é dado pela equação abaixo:

$$\text{COP} = \frac{\text{Energia Útil}}{\text{Energia Consumida}} = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{W}_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (9.14)$$

Pode-se inferir da equação 9.14 que para ciclo teórico o COP é função somente das propriedades do refrigerante, conseqüentemente, das temperaturas de condensação e vaporização. Para o ciclo real, entretanto, o desempenho dependerá muito das propriedades na sucção do compressor, do próprio compressor e dos demais equipamentos do sistema.

Outra forma de indicar a eficiência de uma máquina frigorífica é a Razão de Eficiência Energética (EER), cujo nome se deriva do inglês "Energy Efficiency Rate". O EER é expresso em Btu/h/Watts, representando a relação entre a capacidade frigorífica e a quantidade de trabalho utilizado para produzi-la, sendo dada pela expressão abaixo:

$$\text{EER} = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{W}_c} \left[\frac{\text{Btu / h}}{\text{Watts}} \right] \quad (9.15)$$

Uma forma bastante usual de indicar a eficiência de um equipamento frigorífico é relacionar o seu consumo, em kW/TR, com a capacidade frigorífica, em TR, o que resulta em:

$$\text{kW / TR} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{Q}_o} \left[\frac{\text{Watts}}{\text{TR}} \right] \quad (9.16)$$

$$\text{kW / TR} = \frac{12}{\text{EER}} \left[\frac{\text{Watts}}{\text{TR}} \right] \quad (9.17)$$

9.3.5. Parâmetros que Influenciam o COP do Ciclo de Refrigeração

Vários parâmetros influenciam no rendimento do ciclo de refrigeração. A seguir será analisada a influências de cada parâmetro separadamente.

9.3.5.1. Influência da temperatura de vaporização no COP do ciclo teórico.

Para ilustrar o efeito que a temperatura de vaporização tem sobre o rendimento do ciclo será considerado um conjunto de ciclos onde somente a temperatura de vaporização, T_v , é alterada, sendo que os demais parâmetros permanecem constantes. Estes ciclos são mostrados na Figura 9.10. Nesta análise utilizou-se o refrigerante R-22, típico de sistemas de ar condicionado, porém resultados semelhantes seriam obtidos para outros fluidos frigoríficos.

De forma genérica para cada 1,0°C de aumento na temperatura de evaporação reduz-se o consumo de energia do sistema frigorífico de 2,0 a 4,0 % (ETSU, 2000).

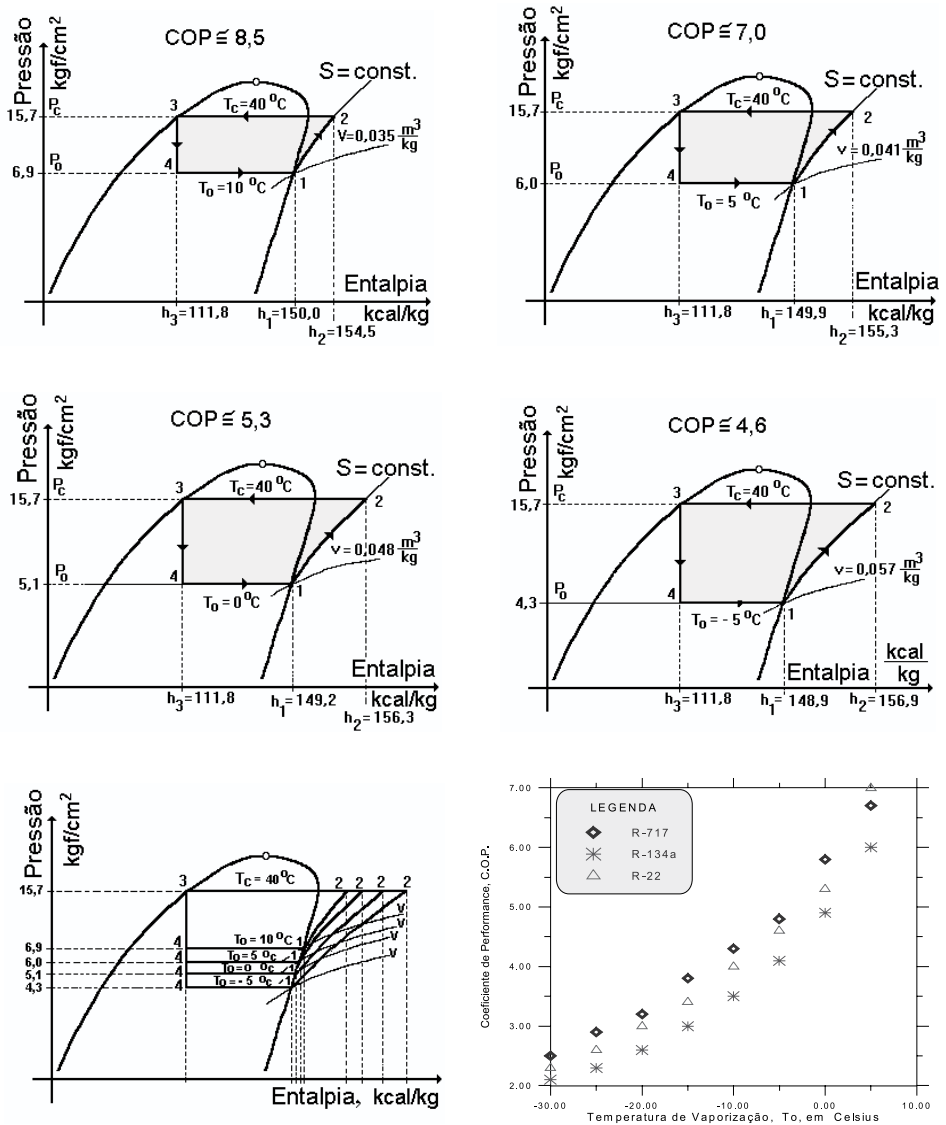


Figura 9.10 - Influência da Temperatura de vaporização, T_0 , no COP do ciclo

9.3.5.2. Influência da temperatura de condensação no COP do ciclo teórico

Como no caso da temperatura de vaporização, a influência da temperatura de condensação é mostrada em um conjunto de ciclos onde apenas se altera a temperatura de condensação, T_c . Esta análise está mostrada na Figura 9.11. Observe que, para a mesma variação de temperatura de 15°C , na condensação, em relação à temperatura de vaporização, T_0 , a variação no rendimento do ciclo é menor para a temperatura de condensação.

De forma genérica para cada 1,0°C de redução na temperatura de condensação reduz-se o consumo de energia do sistema frigorífico de 1,5 a 3,0% (ETSU, 2000).

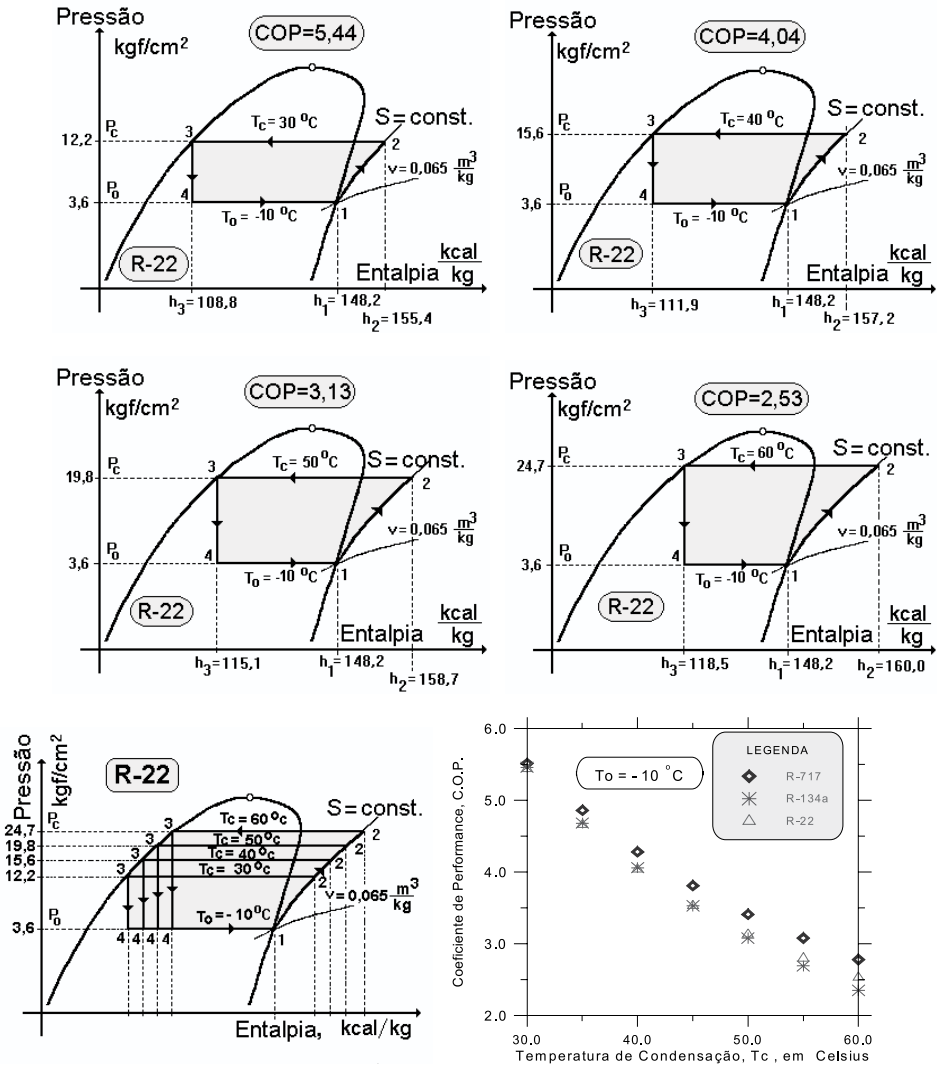


Figura 9.11 - Influência da temperatura de condensação, TC, no COP do ciclo de refrigeração

9.3.5.3. Influência do sub-resfriamento do líquido no COP do ciclo teórico

De forma idêntica aos dois casos anteriores, a Figura 9.12 mostra a influência do sub-resfriamento do líquido, antes de entrar no dispositivo de expansão, no desempenho do ciclo. Embora haja um aumento no COP do ciclo, o que é ótimo para o sistema, na prática projeta-se o sistema com sub-resfriamento para garantir somente

a entrada de líquido no dispositivo de expansão, mantendo desta forma a capacidade frigorífica do sistema, e não com o objetivo de se obter ganho de desempenho.

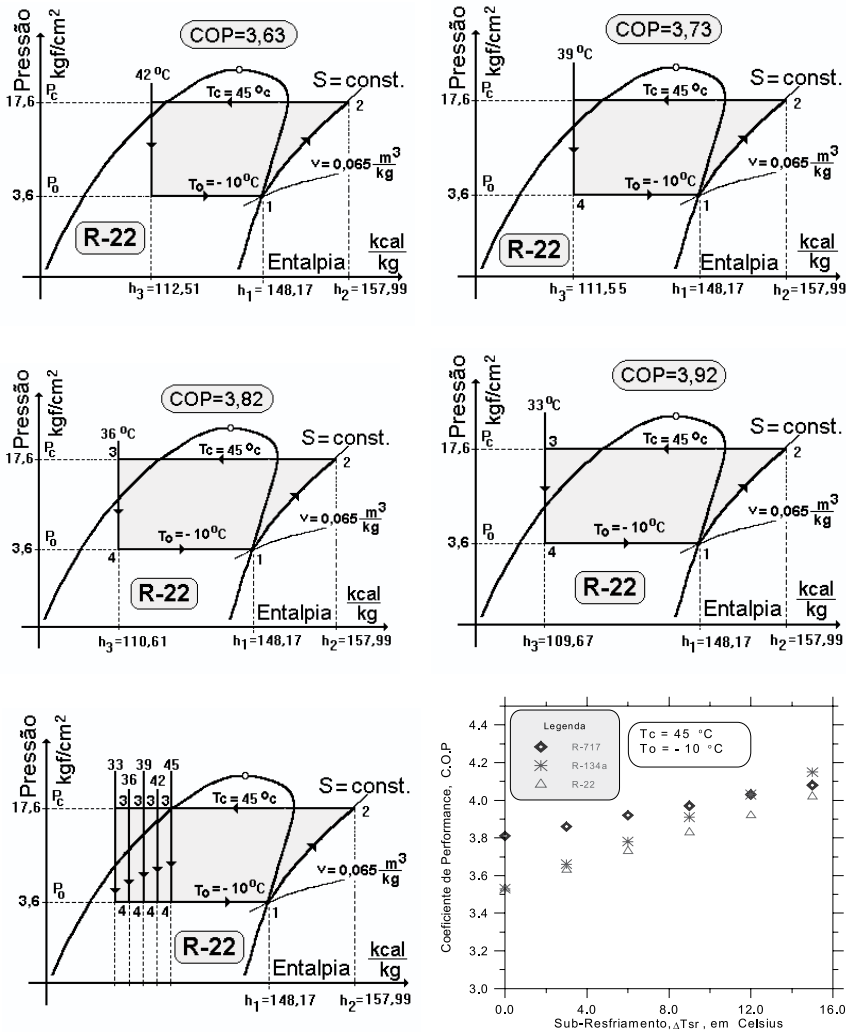


Figura 9.12 - Influência do sub-resfriamento, ΔT_{sr} , no COP do ciclo de refrigeração

9.3.5.4. Influência do superaquecimento útil no COP do ciclo teórico

Quando o superaquecimento do refrigerante ocorre retirando calor do meio que se quer resfriar, chama-se a este superaquecimento de “superaquecimento útil”. Na Figura 9.13 é mostrada a influência desse superaquecimento no desempenho do ciclo de refrigeração. Como pode ser observado no último “slide” desta figura, a variação do

COP com o superaquecimento depende do refrigerante. Nos casos mostrados, para o R-717 o COP sempre diminui, para R134a o COP sempre aumenta e para o R22, o caso mais complexo, há um aumento inicial e depois uma diminuição. Para outras condições do ciclo, isto é, T_o e T_c , poderá ocorrer comportamento diferente do mostrado aqui. Mesmo para os casos em que o superaquecimento melhora o COP, ele diminui a capacidade frigorífica do sistema de refrigeração. Assim, só se justifica o superaquecimento do fluido, por motivos de segurança, para evitar a entrada de líquido no compressor.

Este aspecto da influência do superaquecimento na capacidade frigorífica do sistema deve ser analisado considerando-se ainda eficiência volumétrica dos compressores alternativos, o que foge do escopo deste livro.

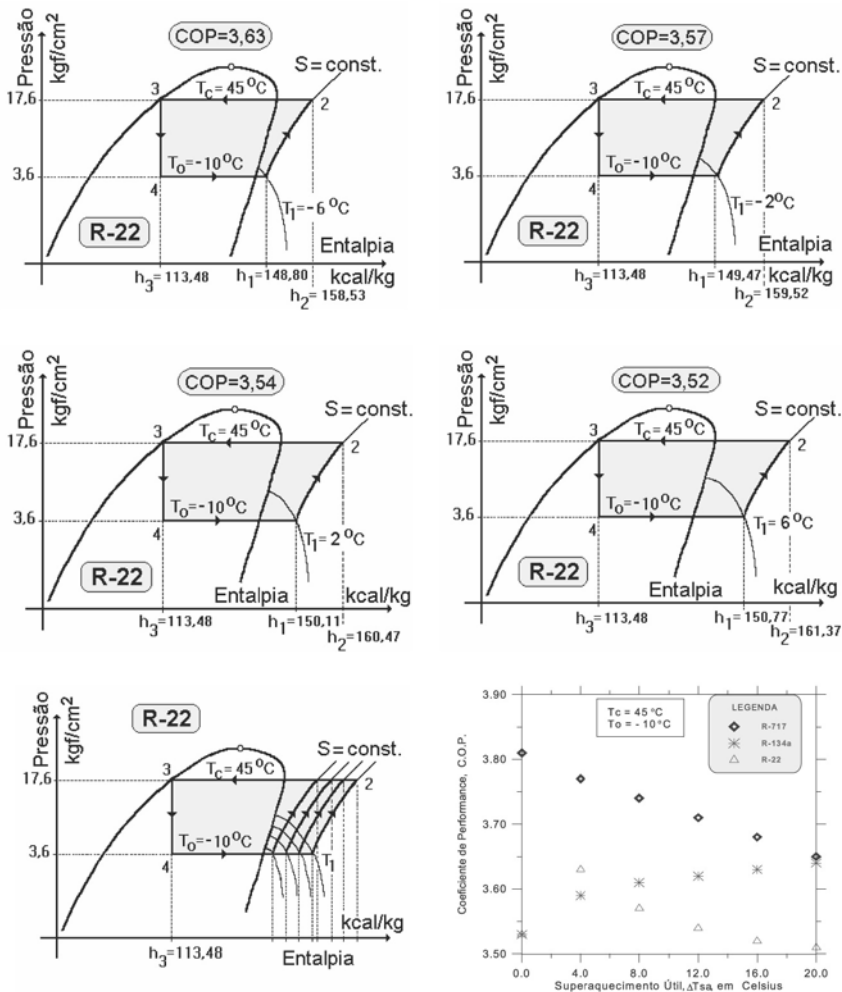


Figura 9.13 - Influência do superaquecimento, ΔT_{sa} , no COP do ciclo de refrigeração

9.4. REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR

9.4.1. Introdução

Nos ciclos de compressão de vapor a remoção do vapor de fluido refrigerante do evaporador é realizada feita conectando-se o evaporador ao lado da sucção de um compressor. Um resultado semelhante pode ser obtido conectando-se o evaporador a um outro vaso, denominado de “absorvedor”, que contenha uma substância capaz de absorver o vapor. Assim, se o refrigerante fosse água, um material higroscópico, como o brometo de lítio, poderia ser usado no absorvedor. À substância utilizada para absorção do vapor de fluido refrigerante dá-se o nome de “substância portadora”.

Para se obterem ciclos fechados, tanto para o refrigerante como para o portador, o estágio seguinte do processo deve ser a liberação do refrigerante absorvido numa pressão que permita a sua subsequente condensação, num condensador refrigerado a água ou ar. Esta separação é realizada no “gerador”, onde calor é fornecido à mistura portador- refrigerante, e o refrigerante é liberado como vapor.

O absorvedor e o gerador juntos substituem o compressor no ciclo de compressão de vapor. Com relação ao refrigerante, o resto do ciclo de absorção é semelhante ao ciclo de compressão, isto é, o vapor se liquefaz no condensador e é trazido para o evaporador através de expansão. O portador, ao sair do gerador, naturalmente, retorna ao absorvedor para outro ciclo. Num sistema de refrigeração por absorção, requer-se água para resfriamento tanto do condensador como do absorvedor.

A principal vantagem do ciclo de absorção em relação a outros sistemas de refrigeração é o fato deste poder operar com energia de baixa qualidade termodinâmica em forma de calor (vapor de exaustão, água quente a pressão elevada). Teoricamente, é necessária apenas uma bomba para transportar a mistura portador-refrigerante do absorvedor, a baixa pressão, para o gerador, a alta pressão. Na prática, duas bombas adicionais são muitas vezes usadas, uma para recircular a solução sobre serpentinas de resfriamento no absorvedor e outra para recircular o refrigerante sobre a serpentina de água gelada no evaporador.

9.4.2. Ciclo de absorção

A Figura 9.14 mostra um sistema de absorção elementar, no qual o compressor do sistema de compressão de vapor (linhas tracejadas) foi substituído por um absorvedor, uma bomba e um gerador de vapor, enquanto o restante do ciclo é o mesmo, em comparação com o sistema de compressão de vapor simples.

Atualmente, os dois ciclos de refrigeração por absorção mais utilizados são aqueles baseados nos pares (misturas binárias) água e brometo de lítio ($H_2O-LiBr$)

e amônia e água ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$). No ciclo com brometo de lítio a água é o refrigerante e o brometo de lítio o absorvente, já no ciclo amônia e água, uma solução de água e amônia age como refrigerante, enquanto a água age como absorvente. A maioria das unidades de grande capacidade utiliza o ciclo com brometo de lítio. O par amônia-água é utilizado em máquinas de pequena capacidade, com queima direta, ou em unidades de grande capacidade, projetas para atender processos industriais específicos, onde se requer frio de baixa temperatura.

Em termos do ciclo mostrado na Figura 9.14, a solução de amônia no gerador de vapor é aquecida até se criar vapor de amônia. O vapor de amônia liberado do gerador prossegue ao longo da parte indicada rumo ao condensador e assim passa através da parte convencional do ciclo. Após deixar o evaporador, a amônia entra no absorvedor. A solução diluída, originada no gerador, absorve a amônia no absorvedor, resultando uma solução concentrada, que é bombeada para o gerador. Neste ciclo, o trabalho da bomba para a circulação do fluido é muito pequeno para um dado efeito de refrigeração, desde que a bomba esteja bombeando um líquido que tenha um pequeno volume específico.

O maior inconveniente das máquinas de absorção é o seu consumo de energia (calor e bombas), muito mais elevado que o das máquinas de compressão mecânica. As máquinas de absorção mais evoluídas consomem uma quantidade de energia superior a sua produção frigorífica.

Por outro lado, estas máquinas têm a vantagem de utilizar a energia térmica em lugar de energia elétrica, que é mais cara e mais nobre. Além disto, elas se adaptam bem as variações de carga (até cerca de 10% da carga máxima) apresentando um rendimento crescente com a redução da mesma.

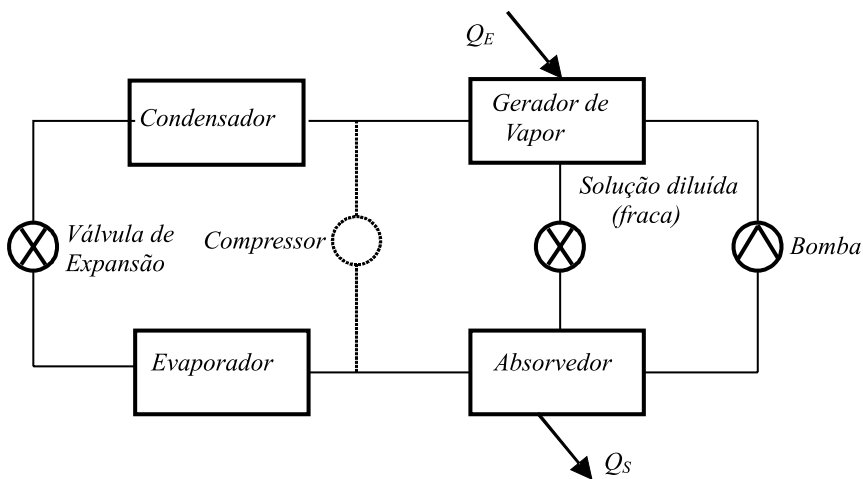


Figura 9.14 - Ciclo elementar de refrigeração por absorção

Elas permitem por esta razão, uma melhor utilização das instalações de produção de calor, ociosas. É o caso, por exemplo, das instalações de aquecimento destinadas ao conforto humano durante o inverno, as quais podem fornecer energia térmica a preço acessível durante o verão.

As máquinas de absorção permitem também a recuperação do calor que seria perdido num processo, por exemplo, em turbinas a vapor, turbinas a gás, etc. Atualmente, em instalações de grande porte, está sendo utilizada a combinação de máquinas de compressão mecânica, com compressores centrífugos, acionadas por turbinas a vapor, com máquinas de absorção, alimentadas pelo vapor parcialmente expandido nas turbinas, aumentando-se o rendimento do conjunto.

Além das vantagens apontadas, as instalações de absorção se caracterizam pela sua simplicidade e por não apresentarem partes internas móveis, o que lhes garante um funcionamento silencioso e sem vibração.

Por todas essas razões as máquinas de absorção atualmente estão cada vez mais difundidas, sendo construídas desde pequenas unidades empregadas em refrigeradores domésticos, até grandes unidades de ar condicionado com capacidades de 1000 TR (3516 kW térmicos). Maiores detalhes sobre ciclos de absorção podem ser vistos em Costa (1982).

9.5. BOMBAS DE CALOR

A bomba de calor, ou bomba térmica, utiliza o mesmo equipamento de um sistema frigorífico, tendo, porém, por objetivo fornecer calor ao reservatório de alta temperatura. Assim, embora o equipamento seja o mesmo, os objetivos são diferentes, com o ciclo frigorífico visando a retirada de calor a baixa temperatura e a bomba a cessão de calor a alta temperatura. Em outras palavras, a bomba térmica é uma máquina que extrai energia de uma fonte a baixa temperatura e faz essa energia disponível a uma temperatura mais alta (ver Figura 9.15).

Um exemplo de operação de uma bomba de calor seria retirar calor a baixa temperatura do ar externo, da terra ou da água de um poço e cedê-lo a alta temperatura para um edifício. Em algumas aplicações industriais, o resfriamento é necessário em partes da instalação e o aquecimento em outras, podendo ambas serem satisfeitas por um sistema de bomba de calor.

A relação entre a energia térmica utilizável, Q_u , e o total de energia consumida para operar a bomba térmica, W , define a eficiência da bomba de calor. Esta relação é conhecida por diversos nomes como: coeficiente de performance (COP), coeficiente de aquecimento, eficiência térmica recíproca, relação de performance. É conveniente, neste momento, empregar um subscrito para diferenciar o coeficiente de performance das bombas de calor do coeficiente de performance dos sistemas de

refrigeração dado pela equação 9.14. Por exemplo, pode-se ter COP_h para as bombas de calor, e COP_c para os sistemas de refrigeração. Seja a equação abaixo:

$$COP_h = \frac{\text{Energia Útil}}{\text{Energia Consumida}} \quad (9.18)$$

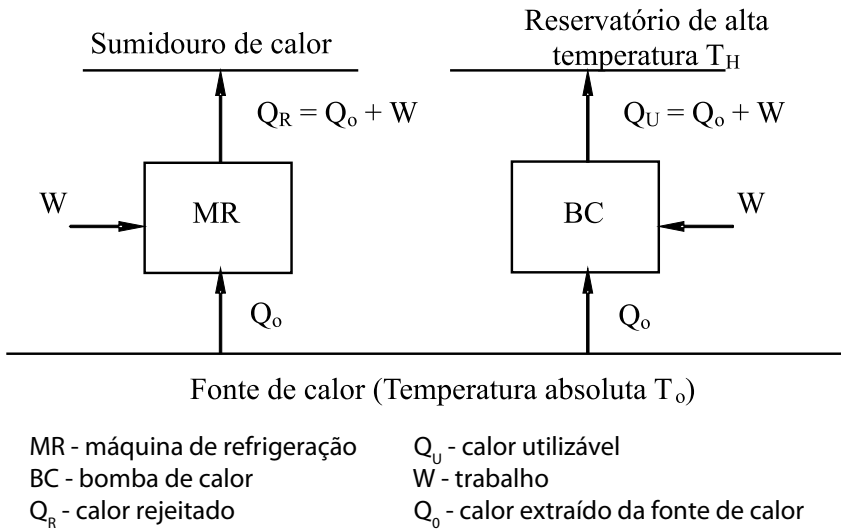


Figura 9.15 - Esquema da máquina de refrigeração e da bomba de calor

As bombas térmicas são realmente eficientes em termos energéticos, mas, a sua utilização não é ampla. A razão principal disto, é que o custo de investimento é alto, comparado com alternativas já estabelecidas (caldeiras, aquecedores, etc.). Para cada aplicação em particular, a bomba térmica deverá ser avaliada comparando-a com os outros sistemas para determinar se ela oferece vantagem econômica. Essa avaliação deverá considerar as diferentes eficiências dos diferentes sistemas alternativos utilizando diferentes combustíveis, e, considerando ainda os custos totais, incluindo o custo do capital e de manutenção e operação.

Normalmente, os sistemas alternativos são mais bem conhecidos e mais baratos. A economia de energia realizada pela bomba de calor deverá ser balanceada contra o seu maior custo de investimento e o seu custo de manutenção. As análises convencionais podem mostrar que algumas aplicações são realmente econômicas, mas em muitos casos podem-se ter incertezas que requerem uma análise mais apurada.

Dada à rápida mudança dos fatores econômicos, relacionados com o fornecimento e custo da energia, o campo de aplicação viável das bombas térmicas está sendo reconsiderado, e ao mesmo tempo, a cada aumento de custo dos combustíveis, o campo de aplicação torna-se maior.

Por meio da bomba térmica e do emprego de somente uma fração de energia de alto grau pode-se dispor de toda a energia necessária, inclusive reciclando-a. O fornecimento 10 kW de calor para obtenção de água quente a 60°C, pode ser obtido consumindo o equivalente a 13,5 kW com 1,3 kg de óleo combustível. Porém também pode ser obtido o mesmo resultado queimando 0,5 kg de óleo num motor de combustão interna e tomando o calor restante necessário de baixo grau, por exemplo, do ar a 20°C, obtendo-se água a 60°C.

A primeira aplicação direta de uma bomba foi feita entre 1920 e 1930, na Inglaterra, por Haldane, um cientista que fez o primeiro levantamento do coeficiente de performance em função da temperatura de condensação dos equipamentos de refrigeração instalados entre 1891 e 1926. Seus estudos o conduziram à construção da primeira bomba térmica experimental, utilizada para calefação e produção de água quente para sua residência na Escócia. Esta bomba empregava como fonte de calor o ar atmosférico e a água da rede. Provavelmente a primeira instalação de bomba térmica em grande escala pode ser considerada como feita pela Southern California Edson Company, nos seus escritórios de Los Angeles, entre 1930/31, onde o equipamento de refrigeração era utilizado também com fins de aquecimento.

As bombas de calor podem ser classificadas segundo o fluido da fonte de calor, que é mencionado inicialmente, seguido pelo fluido receptor do calor. Assim, por exemplo: uma bomba térmica que se utiliza do ar ambiente para aquecer água seria uma bomba térmica ar/água. As mais comuns são: ar/ar, ar/água, água/ar, água/água, solo/ar, solo/água. Estas fontes serão analisadas a seguir.

Ar ambiente

O ar ambiente tem baixa densidade e baixa capacidade calorífica em comparação com líquidos e sólidos. Está sujeito a amplas e rápidas variações de temperatura e umidade. No entanto, contra todas estas desvantagens, é a fonte de calor mais comumente empregada para bombas de calor, principalmente as utilizadas para calefação. A sua disponibilidade irrestrita faz com que seja a seleção óbvia para bombas de calor de aplicação geral.

A energia requerida para movimentar o ar através dos trocadores de calor convencionais é, geralmente, menor que 1/20 da energia calorífica que pode ser extraída da mesma corrente de ar.

Normalmente, um fluxo de ar de aproximadamente 0,1 m³/s é utilizado para se obter 1 kW de calor, e a capacidade calorífica do ar permite obter este calor com um diferencial de temperatura entre 4 e 8°C, dependendo da temperatura e umidade do ar ambiente. Uma bomba térmica normal, de simples estágio, pode operar com ar ambiente até temperaturas entre 0 e 3°C. Considerando-se a média anual ponderada da temperatura ambiente para São Paulo em 18°C, ter-se-ia uma temperatura de

evaporação entre 8 e 10°C. Para aquecer água a 50°C, a temperatura de condensação correspondente seria de aproximadamente 55°C, e o valor do COP de compressores herméticos comerciais seria de aproximadamente 4,2. Assim, para se conseguir 1 kW para aquecimento da água seria necessário consumir somente 0,28 kW no compressor.

A eficiência e a confiabilidade das bombas térmicas a ar são reduzidas pela formação de gelo na serpentina. No Brasil este problema fica reduzido a poucas e limitadas regiões.

Água

A água é uma excelente fonte de calor, desde que esteja disponível em quantidade suficiente. Rios, lagos, córregos e a água do subsolo podem ser empregados como fontes de calor, inclusive a água do mar deve ser considerada para instalações de grande porte.

Em todos os casos, a energia para bombear água para as fontes deverá ser devidamente analisada. Deverão ser tomados cuidados especiais para assegurar que as análises químicas confirmem a possibilidade de utilização dos materiais selecionados para os trocadores, de forma a evitar possíveis problemas de corrosão.

Atendidos estes requisitos, a alta capacidade térmica e as boas características da água, no que se refere à transmissão de calor, fazem dela uma fonte de calor atrativa.

São necessários normalmente fluxos de somente 0,12 litros/s com uma diferença de temperatura de 2°C para se obter 1 kW de calor, e assim os trocadores de calor são compactos e baratos.

Solo

Mesmo que o nível de calor geotérmico do solo seja baixo, a terra do solo pode ser empregada como fonte efetiva para fornecimento de calor. O movimento de águas subterrâneas e a radiação solar incidente na superfície do solo são as fontes de aquecimento da camada superior do solo, e este calor pode ser extraído por meio de uma bomba térmica. Podem ser extraídos em média 25 Watts por metro quadrado, dependendo da composição do solo. Tubulações de plástico ou metal deverão ser enterradas a profundidade, variando entre 0,5 e 2,0 metros, circulando-se por elas água e, ocasionalmente, o refrigerante diretamente.

A principal vantagem do solo como fonte de calor é a sua temperatura praticamente estável, a não possibilidade de congelamento e a eliminação de ventiladores barulhentos. As desvantagens são as necessidades de grandes áreas, o custo elevado e os problemas decorrentes de se manter tubulações enterradas, além da dificuldade de detectar possíveis vazamentos depois de uma operação prolongada.

Comparando-se os custos totais e a eficiência entre um sistema a ar e outro de solo, há pequenas diferenças entre eles. Mas o sistema a ar pode ser testado antes da venda ou instalação, enquanto o sistema de solo poderá ser testado somente quando estiver completamente instalado e em operação, o que reduz os meios de avaliar a eficiência do sistema.

Recuperação de Calor Desperdiçado

Em todo processo onde é necessário resfriamento, o calor rejeitado em condensadores pode ser utilizado no aquecimento. Se o calor é rejeitado a temperaturas suficientemente altas, ele poderá ser utilizado diretamente. Porém, se a temperatura não é suficientemente alta, este calor poderá ser utilizado como fonte para uma bomba térmica.

Por exemplo: o calor rejeitado nos resfriadores de leite pode ser empregado para fornecer água quente para a limpeza dos laticínios. O calor rejeitado pelos sistemas de ar condicionado pode ser empregado para aquecer água nos hotéis, hospitais, chuveiros em indústrias, etc.

Há duas razões pelas quais o proprietário de uma residência pode considerar a utilização de bombas de calor para aquecimento de ambientes. A primeira é a necessidade de resfriamento no verão, e, neste caso, com equipamento de ciclo reverso poderá fornecer ambos os efeitos, resfriamento no verão e aquecimento barato no inverno. A segunda razão para se considerar a bomba térmica é a necessidade de se reduzir os custos e a energia utilizada para aquecimento ambiental. No Brasil, quase todos os fabricantes de condicionadores de janela produzem versões frio-calor para atender este tipo de mercado.

A eficiência térmica das bombas de calor é relativamente baixa, por serem os equipamentos projetados com o objetivo principal de resfriamento, sendo a função de aquecimento um resultado secundário.

Estudos mais recentes têm demonstrado que a utilização de bombas térmicas para aquecer água pode ser econômica em contraposição à utilização de aquecimento elétrico para resistências. Uma residência típica consome entre 3000 e 5000 kWh ano para esses fins. No Brasil, o problema pode ser analisado da seguinte forma: a maioria dos aquecedores residenciais e comerciais de água é do tipo elétrico, com potência da ordem de 1,5 até 6,0 kW, e capacidades de 50 a 250 litros.

Segundo estudos realizados, quase 5% da energia elétrica é utilizada pelo consumidor doméstico e desta, 80% é utilizada para aquecimento de água. Se for considerada a utilização de uma bomba térmica, com COP de 3,5, para redução de consumo de energia elétrica, ter-se-á uma economia de 3,5%.

9.6. AR CONDICIONADO

9.6.1. Definição

O condicionamento de ar é um processo que visa o controle simultâneo, num ambiente delimitado, da pureza, umidade, temperatura, e movimentação do ar. Ao contrário do que ocorre com a ventilação, estes sistemas não dependem das condições climáticas exteriores. É indispensável em:

- Ambientes de trabalho, visando aumentar o conforto do operário e conseqüentemente a produtividade.
- Ambientes onde se exigem segurança, onde se operam inflamáveis ou produtos tóxicos.
- Processos de manufatura que exigem umidade, temperatura e pureza do ar controladas, como fabricação de produtos farmacêuticos e alimentícios, salas de desenho de precisão, impressão em cores, etc.
- Ambientes onde se processam materiais higroscópicos.
- Etapas de produção que exigem controle das reações químicas (cristalização, corrosão de metais, ação de microorganismos).
- Locais onde é necessário eliminar a eletricidade estática para prevenir incêndios ou explosões.
- Operações de usinagem com tolerância mínima.
- Laboratórios de controle e teste de materiais.

9.6.2. Instalações Típicas

Os diferentes tipos de instalações de ar condicionado adotados na prática podem ser classificados segundo o fluido, ou fluidos, que se empregam para a remoção de calor. Assim, tem-se:

- 1- Instalações apenas ar.
- 2- Instalações ar-água.
- 3- Instalações apenas água.
- 4- Instalações de expansão direta.

A seguir tem-se uma breve descrição de alguns desses sistemas.

9.6.2.1. Instalações apenas ar

Estas instalações se caracterizam por baixo custo inicial, manutenção centralizada e, portanto, econômica, apresentando a possibilidade de funcionar com ar exterior durante as estações intermediárias.

A regulagem da temperatura ambiente (resfriamento) pode ser efetuada por meio de um termostato ambiente, ou também, no ar de recirculação. O termostato pode atuar sobre o fluido que chega à serpentina de resfriamento, sobre um "by-pass" da serpentina de resfriamento, ou sobre uma serpentina de aquecimento. Em qualquer caso a vazão de ar permanece constante.

Instalação com regulagem da serpentina de resfriamento

A Figura 9.16 mostra um esquema deste tipo de instalação. Ao diminuir a temperatura do ar de recirculação, ou a temperatura ambiente, o termostato T, de duas posições, provoca o fechamento da válvula solenóide S. O compressor continua funcionando até que pára por ação do pressostato de baixa. Quando a temperatura aumenta, o termostato T abre a válvula solenóide S e põe o compressor em funcionamento. Como variante desse sistema, o termostato pode fechar a válvula solenóide e parar o compressor.

A umidade relativa ambiente tende a aumentar durante os períodos em que o compressor está parado, já que o ar externo (renovação) é introduzido no ambiente sem que seja desumidificado.

Instalação com regulação do by-pass da serpentina de resfriamento

Neste tipo de instalação (Figura 9.17) ao diminuir a temperatura do ar de recirculação (ou ambiente), o termostato T faz diminuir a vazão de ar que atravessa a serpentina e aumenta a vazão pelo "by-pass", controlando um servomotor M que posiciona os registros (dampers) do "by-pass". O compressor pára, geralmente, acionado pelo pressostato de baixa pressão.

Um interruptor auxiliar de fim de curso I, acionado pelo servomotor M, fecha a válvula solenóide S, situada na alimentação da serpentina de expansão direta, quando o damper da serpentina se aproxima da posição completamente fechada.

Este tipo de regulagem descrita apresenta substancial vantagem à anteriormente citada, já que a temperatura ambiente é muito mais constante e, o controle da umidade relativa é melhor, posto que, ao diminuir a carga sobre a serpentina de refrigeração diminuem a temperatura de evaporação do refrigerante e, portanto, a umidade do ar de saída da serpentina.

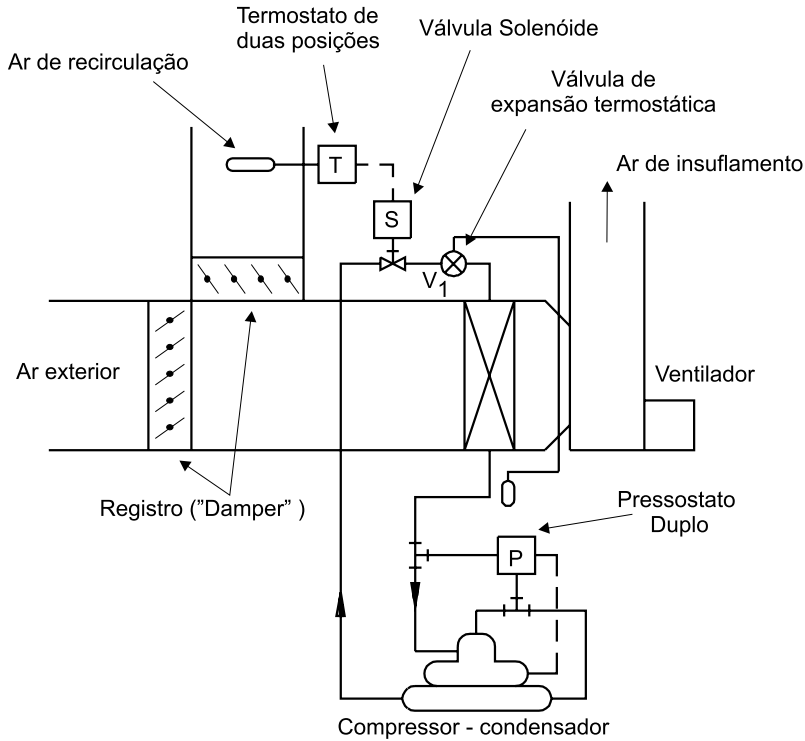


Figura 9.16 - Instalação com expansão direta e regulação tudo-nada

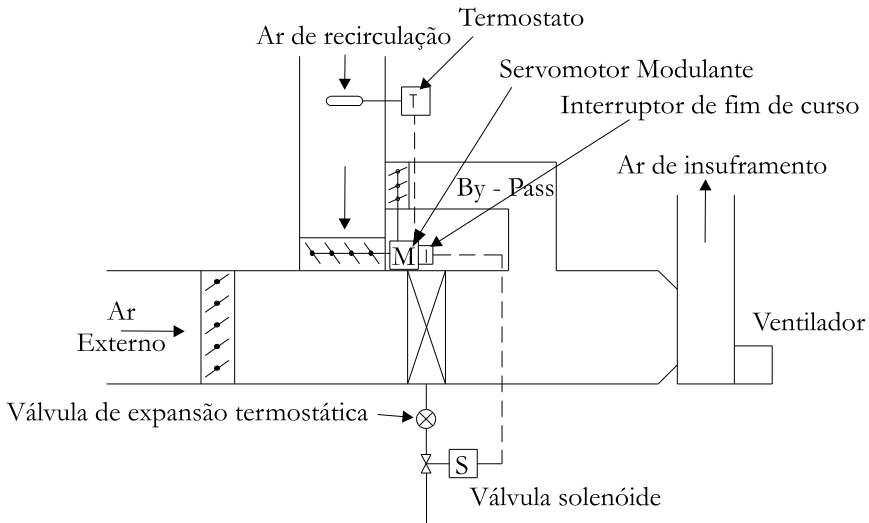


Figura 9.17 - Instalação de expansão direta com "by-pass" do ar de recirculação

Instalação com regulagem da serpentina de aquecimento (ou reaquecimento)

Nesta instalação (Figura 9.18) ao aumentar a temperatura do ar de recirculação o termostato T abre a válvula solenóide S e o compressor entra em funcionamento.

Ao diminuir a temperatura do ar de recirculação o termostato T fecha a válvula solenóide S e abre, progressivamente, a válvula V, colocada na serpentina de aquecimento. Ao aumentar a umidade relativa do ar de recirculação o humidistato H abre a válvula solenóide S e o grupo frigorífico entra em funcionamento resfriando e desumidificando o ar. O termostato T regula o reaquecimento de maneira que a temperatura no ambiente seja a requerida.

A instalação descrita permite manter no ambiente a temperatura de projeto e uma umidade relativa igual ou inferior a de projeto.

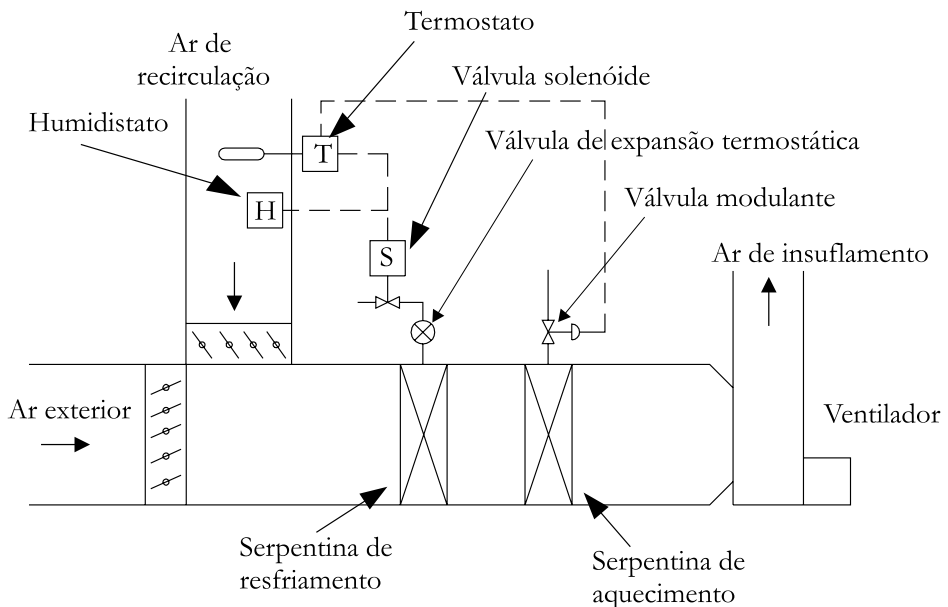


Figura 9.18 - Instalação com expansão direta com reaquecimento

Instalação com vazão constante e temperatura variável

Este tipo de instalação representa uma ampliação da descrita no item anterior, no sentido que todo ar é resfriado centralmente, até uma temperatura que seja capaz de satisfazer as exigências da zona cuja carga térmica seja máxima. Para cada zona, a regulagem da temperatura se realiza independentemente, aquecendo o ar até alcançar a temperatura requerida para satisfazer a carga térmica dessa zona.

Instalação com temperatura constante e vazão variável

Neste tipo de instalação, ao diminuir a temperatura da zona, o termostato ambiente reduz a vazão do ar introduzido na mesma atuando sobre um servomotor acoplado a um damper de regulagem.

Um regulador de pressão estática comanda outro damper motorizado, situada na sucção do ventilador, de forma a manter uma diferença de pressão constante entre a descarga do ventilador e o ambiente de referência. Este controle impede que, ao fechar a comporta de alguma das zonas, a vazão do ar que chega às demais aumente sensivelmente, devido ao incremento da pressão estática. Uma outra solução para o controle da pressão estática na descarga do ventilador é a adoção de inversores de frequência para variação da rotação do compressor.

Instalação com variação de temperatura e vazão

Para este tipo de instalação, ao diminuir a temperatura dos espaços condicionados, os termostatos fecham progressivamente os dampers motorizados correspondentes, reduzindo a vazão de ar introduzido até um valor mínimo preestabelecido.

Um posterior decréscimo da temperatura ambiente faz com que o termostato abra gradualmente a válvula instalada na tubulação de alimentação da serpentina de aquecimento. Este sistema pode ser visto na Figura 9.19.

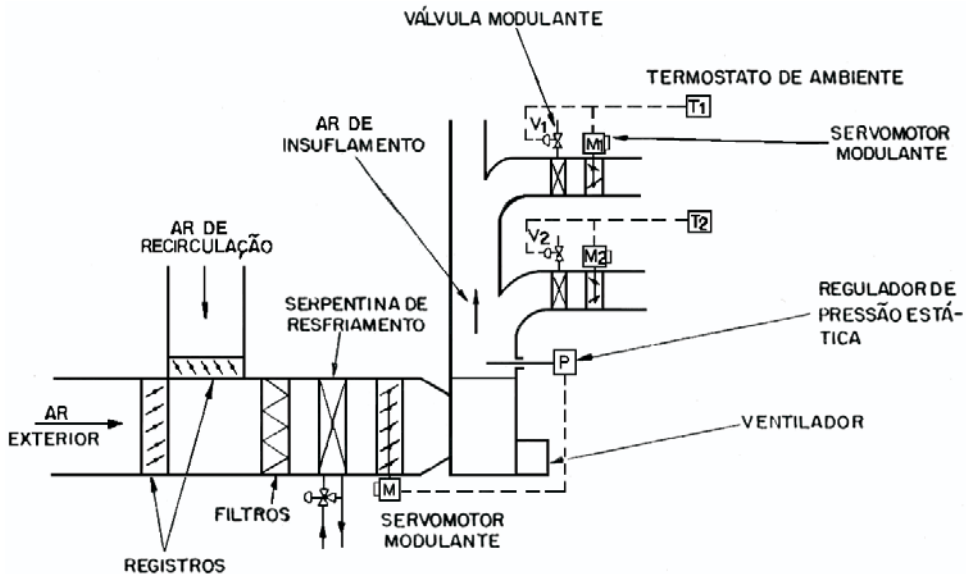


Figura 9.19 - Instalação com variação de vazão e temperatura

Instalação com variação de vazão e de recirculação local

Uma unidade central fornece ar frio e desumidificado (ar primário) a certo número de zonas, onde, em função da necessidade de cada zona, mistura-se uma quantidade de ar primário com uma quantidade ou vazão de ar de recirculação. Cada zona está provida de um ventilador e de um sistema de dampers controlado por um termostato ambiente. Ainda, se necessário, pode-se ter uma serpentina de aquecimento em cada um desses sistemas locais.

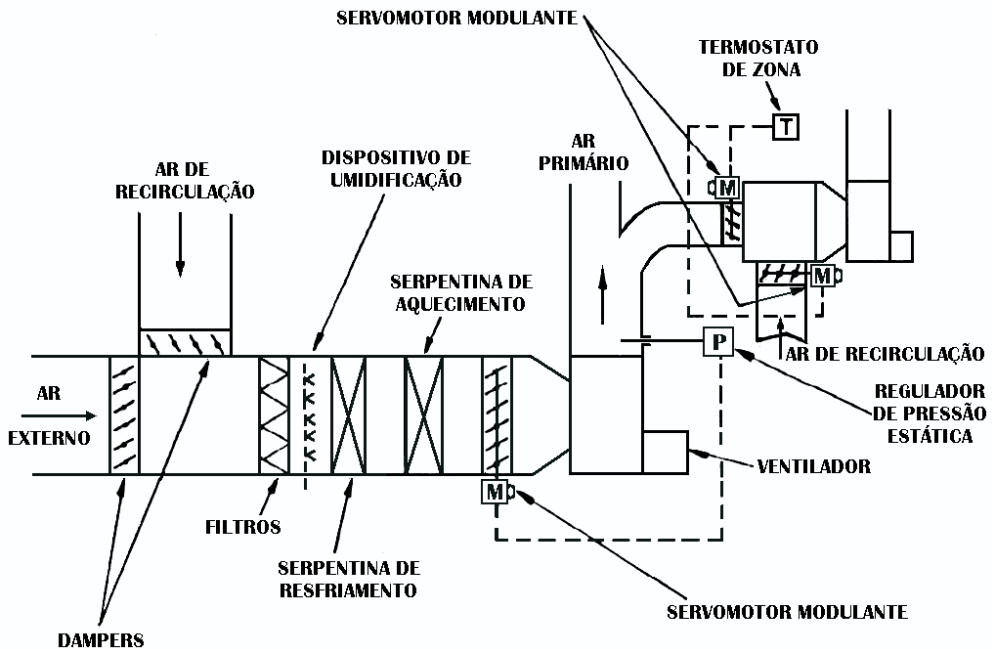


Figura 9.20 - Instalação com vazão variável e recirculação local

Instalação duplo duto

Nesta instalação, todo o ar é tratado centralmente sendo, depois, distribuído aos diferentes locais por dois dutos, geralmente paralelos, um dos quais transporta ar frio e o outro ar quente.

Para cada ambiente, ou zona, a acondicionar um dispositivo terminal comandado por um termostato ambiente, mistura o ar frio com o ar quente em proporções tais que possam contrabalançar a carga térmica.

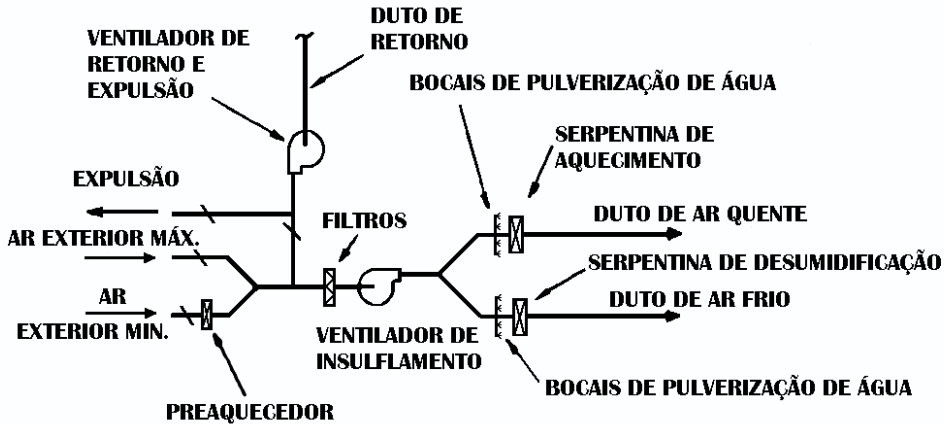


Figura 9.21 - Instalação duplo duto

9.6.2.2. Instalações ar-água

Neste tipo de instalação, as condições dos ambientes condicionados são reguladas mediante condicionadores do tipo “fan-coil” ou por condicionadores de indução. Os fan-coils são condicionadores de ar constituídos essencialmente de um ventilador centrífugo, que pode ser de velocidade variável, filtros, uma serpentina e uma bandeja de condensado. Os condicionadores de indução, por sua vez, são dotados de um bocal, para a indução de ar do ambiente condicionado, o qual, juntamente com o ar primário, atravessa as serpentinas.

As serpentinas dos condicionadores, de acordo com o tipo e funcionamento da instalação, podem ser alimentadas com água quente ou com água fria.

Quanto ao ar exterior de ventilação, que deve ser introduzido no ambiente, existem várias soluções, das quais se destacam:

- 1 - Os condicionadores tratam unicamente ar de circulação, sendo o ar exterior de ventilação tratado centralmente e distribuído nos locais por meio de um sistema de dutos de ar primário.
- 2 - Os condicionadores são projetados com uma tomada de ar exterior e tratam uma mistura de ar exterior e de ar de recirculação.

Instalações ar-água a dois tubos

Neste tipo de instalação o ar primário, tratado em uma unidade central, é enviado a alta pressão e alta velocidade até as unidades instaladas nos diferentes ambientes. Ao sair à alta velocidade pelos tubos, o ar primário cria uma zona de depres-

são que induz certa vazão de ar ambiente (secundário) que atravessa as serpentinas dos respectivos condicionadores de indução. Estas serpentinas locais estão alimentadas por água refrigerada ou quente, dependendo da estação, contudo, quando água fria está circulando, somente água fria está disponível. O mesmo ocorre quando água quente, ou vapor está circulando.

Este tipo de instalação apresenta a vantagem, que caracteriza todas as instalações com ar primário, de separar o controle da temperatura ambiente, mediante a variação da vazão de água quente ou fria, do controle do ar de ventilação e da umidade relativa, a qual regulada centralmente no climatizador de ar primário. O ar exterior, tratado somente no condicionador central, evita que exista transferência de ar de um local para outro.

Instalações ar-água a três tubos

Neste tipo de instalação cada serpentina local é alimentada por dois tubos. Um de água fria e outro de água quente. Estes tubos estão conectados à serpentina mediante uma válvula especial não misturadora de três vias, que modula, em seqüência, a vazão de água fria e quente, em função das necessidades impostas pelo termostato ambiente. Um tubo de retorno único conduz a água que sai da serpentina até a central térmica (caldeira) ou até a central frigorífica, de acordo com a temperatura do fluxo.

A válvula não misturadora evita que a água fria e a água quente possam chegar simultaneamente à mesma serpentina de resfriamento.

Quando o termostato ambiente não acusa nem frio nem calor a válvula se situa em posição neutra e não existe nenhum fluido passando através da mesma. Como conseqüência, devem ser adotadas medidas para não prejudicar as bombas de circulação, como, por exemplo, o controle de sua rotação.

Instalações ar-água a quatro tubos

A diferença principal entre as instalações a três e a quatro tubos é que no caso destas últimas a água fria e a água quente não se misturam na saída das serpentinas, ou seja, no tubo de retorno. Elas retornam em tubos separados, sendo enviadas uma para a central frigorífica e outra para a central térmica (caldeira). Desta maneira evita-se a perda de energia térmica que se produz nas instalações a três tubos, para algumas condições de operação, devido à mistura da água quente com a água fria.

A 9.22 é um esquema do sistema de regulação do condicionador, com somente uma serpentina, empregada tanto para resfriamento quanto para aquecimento. Quando diminui a temperatura do ambiente, a válvula não misturadora, V1, reduz a vazão de água fria entregue ao condicionador, enquanto a válvula desviadora, V2, de duas posições, envia a água da saída do condicionador de ao retorno frio. Se ocor-

rer uma diminuição adicional da temperatura ambiente a válvula V1 fecha ou, caso a diminuição de temperatura persista, a válvula V1 começa a dar passagem à água quente, comutando simultaneamente a válvula V2.

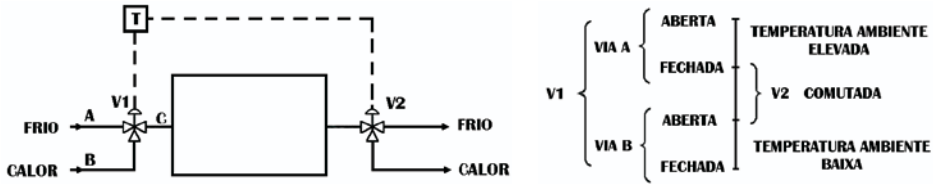


Figura 9.22 – instalação ar-água a quatro tubos

9.6.2.3. Instalações apenas água

Instalação com “fan-coils” a dois tubos

Este tipo de instalação representa certamente a versão mais econômica e mais difundida das instalações com condicionadores do tipo “fan-coil”. Os equipamentos são alimentados por água fria durante a época de verão e por água quente durante o inverno. A comutação verão/inverno é efetuada a encargo da instalação e pode ser realizada manual ou automaticamente, desde a central frigorífica.

É importante ressaltar que, neste tipo de instalação, o condicionador é, geralmente, dotado de uma tomada de ar exterior, normalmente com regulagem manual, que permite misturar o ar de recirculação com o de ar exterior de renovação, de forma a satisfazer as exigências do ambiente.

De acordo com o exposto, este tipo de instalação pode ser satisfatório apenas quando todos os locais servidos necessitem somente frio ou calor, sendo inadequado quando alguns ambientes possuam uma carga térmica positiva e outros uma carga térmica negativa. Nestes casos, para utilizar uma instalação com “fan-coils” a dois tubos, será necessário realizar uma divisão em zonas de alimentação, de maneira que os condicionadores de algumas zonas possam ser alimentados com água quente e os de outras zonas com água fria.

Este tipo de instalação está caracterizado por certa deficiência no controle da umidade relativa ambiente, da vazão de ar exterior, e da temperatura ambiente nas estações intermediárias, durante as quais se apresentam cargas sensíveis positivas em alguns ambientes e negativas em outros.

Instalações com “Fan-Coils” a três tubos

Este tipo de instalação supera as limitações próprias da instalação com “fan-coils” a dois tubos, podendo, ao mesmo tempo, aquecer alguns locais e resfriar outros. Com a adoção do sistema de três tubos estas limitações são superadas totalmente, já que cada “fan-coil” pode tomar, segundo as necessidades detectadas pelo termostato ambiente, água fria ou água quente. A válvula não misturadora de três vias evita que possa passar simultaneamente os dois fluidos por um mesmo condicionador.

Neste tipo de instalação a desumidificação se dá nos “fan-coils”, sendo a água distribuída a uma temperatura de 5 a 7°C e melhora-se, notavelmente, o controle da temperatura ambiente em relação a uma instalação a dois tubos.

Instalações de “Fan-Coils” a quatro tubos

A instalação é, no que se refere as suas características funcionais, idêntica a de três tubos com a exceção de que o circuito com quatro tubos permite evitar as perdas pela mistura entre água quente e água fria no retorno comum. Este tipo de instalação, com relação à anterior, apresenta um menor custo de operação, porém, um custo inicial maior.

Instalações de expansão direta

O sistema de climatização mais elementar é, sem dúvida alguma, o condicionador de ar de janela. Estes aparelhos são dotados de compressor, condensador resfriado a ar, dispositivo de expansão, serpentina de resfriamento e desumidificação, do tipo expansão direta, filtros e ventiladores para circulação do ar condicionado e para resfriamento do condensador. Normalmente o aquecimento é feito por meio de uma bateria de resistências elétricas, muito embora possam existir aparelhos de janela que operam como bomba de calor, através da inversão do ciclo frigorífico. São normalmente encontrados com capacidades variando entre 7500 a 30000 Btu/h.

Estes equipamentos são compactos e não requerem instalação especial, são de fácil manutenção, não ocupam espaço interno (útil) e são relativamente baratos. No entanto possuem as seguintes desvantagens: pequena capacidade, maior nível de ruído, não são flexíveis, são menos eficientes, promovem a distribuição de ar a partir de ponto único e provocam alterações na fachada da edificação.

Os Splits (ou Mini-Splits) são equipamentos que, pela capacidade e características, aparecem logo após os condicionadores de janela. Estes aparelhos são constituídos em duas unidades divididas (evaporadora e condensadora), que devem ser interligadas por tubulações de cobre, através das quais circulará o fluido refrigerante. São aparelhos bastante versáteis, sendo produzidos com capacidades que variam de 7.500 a 60.000 Btu/h.

Estes equipamentos são compactos e de fácil manutenção, tem grande versatilidade, não interferem nas fachadas, podem promover a distribuição do ar através de dutos ou não e também podem operar como bomba de calor (ciclo reverso). No entanto ainda possuem capacidade limitada, sua instalação requer procedimentos de vácuo e carga em campo, não operam com renovação de ar (exceto alguns equipamentos mais modernos) e possuem custo inicial superior aos condicionadores de ar de janela.

Quando se trata de maiores capacidades, há que se falar nos Self Contained (condicionadores autônomos), os quais são condicionadores de ar compactos ou divididos que encerram em seus gabinetes todos os componentes necessários para efetuar o tratamento do ar, tais como: filtração, resfriamento e desumidificação, umidificação, aquecimento e movimentação do ar. Nestes equipamentos também se pode conectar uma rede de dutos de distribuição de ar a baixa velocidade. Podem ser encontrados com capacidades variando entre 5 e 30 TR. São equipamentos simples, de fácil instalação, com baixo custo específico (R\$/TR), a sua fabricação seriada leva a aprimoramentos técnicos constantes e resultam em grande versatilidade para projetos (zoneamentos, variações de demanda), etc. Como desvantagens destes equipamentos pode-se citar o fato de não serem produzidos para operar como bomba de calor, capacidade limitada, e o fato dos equipamentos divididos requerem procedimentos habituais de vácuo e carga de gás em campo.

9.7. FLUIDOS REFRIGERANTES

9.7.1. Características desejáveis de um fluido refrigerante

As unidades de refrigeração são utilizadas numa faixa de temperaturas consideravelmente ampla, abrangendo processos que vão do condicionamento de ar ao de refrigeração de baixíssima temperatura. O fluido refrigerante adequado para uma unidade de refrigeração é selecionado entre muitos fluidos, de acordo com diversos fatores, entre os quais se pode citar a temperatura e a pressão de vaporização, a temperatura e a pressão de condensação, etc.

As características desejáveis de um fluido refrigerante são listadas abaixo:

- Pressão de vaporização não muito baixa
- É desejável que o fluido refrigerante apresente uma pressão de vaporização não muito baixa, para uma dada temperatura de vaporização, o que evita a operação com vácuo elevado no evaporador e, também, uma baixa da eficiência volumétrica do compressor, devido à grande relação de pressão.
- Pressão de condensação não muito elevada

- Para uma dada temperatura de condensação, que é função da temperatura da água ou do ar de resfriamento, quanto menor for a pressão de condensação do fluido refrigerante, menor será a relação de pressão e, portanto, melhor o desempenho do compressor. Além disso, se a pressão, no lado de alta do ciclo de refrigeração é relativamente baixa, contribui-se para a segurança operacional da instalação.
- Calor latente de vaporização elevado
- Se o fluido refrigerante tiver um grande calor latente de vaporização, será necessário menor vazão do refrigerante para uma dada capacidade de refrigeração.
- Volume específico (especialmente da fase vapor) reduzido
- Se o fluido refrigerante apresenta um grande valor do calor latente de vaporização e um pequeno volume específico, na fase vapor, a vazão volumétrica do compressor será pequena e o tamanho da unidade de refrigeração torna-se a menor, para uma dada capacidade de refrigeração.
- Entretanto, em algumas unidades de resfriamento de água, dotadas de compressor centrífugo, é preferível que o fluido refrigerante apresente valores elevados do volume específico, pois o aumento da vazão volumétrica de refrigerante no compressor, contribui para elevar a eficiência do compressor.
- Coeficiente de performance elevado
- O fluido refrigerante utilizado deve gerar um coeficiente de performance elevado porque o custo de operação está essencialmente relacionado a este coeficiente.
- Condutibilidade térmica elevada
- Um valor elevado da condutibilidade térmica do refrigerante é importante na melhoria das propriedades de transferência de calor.
- Baixa viscosidade na fase líquida e gasosa
- Devido ao pequeno atrito fluido/tubulação dos refrigerantes pouco viscosos, as perdas de carga serão menores.
- Baixa constante dielétrica, grande resistência elétrica e característica de não-corrosão dos materiais isolantes elétricos.
- Estas características são especialmente importantes para aqueles fluidos refrigerantes utilizados em ciclos de refrigeração com compressores herméticos.
- Devem ser estáveis e inertes, ou seja, não devem reagir e corroer os materiais metálicos de uma instalação de refrigeração.
- Não deve ser poluente

O exemplo mais recente é o dos CFCs (compostos químicos derivados de hidrocar-

bonetos simples, nos quais os átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de elementos halógenos) que destroem a camada de ozônio da terra.

- Não devem ser tóxicos ou excessivamente estimulantes.
- Não devem ser inflamáveis ou explosivos.
- Devem ser de detecção fácil quando houver vazamentos.
- Devem ser de preços moderados e facilmente disponíveis.

9.7.2. Umidade nos fluidos refrigerantes

Quando a umidade se infiltra para o interior de um sistema de refrigeração, ela pode reagir com o fluido refrigerante e causar vários problemas na operação da unidade de refrigeração.

Estes problemas diferem conforme o tipo do fluido refrigerante, a quantidade de umidade infiltrada, a presença ou não de ar e sujeira, etc. Os problemas podem ser divididos em duas categorias:

- a - “Congelamento” da válvula de expansão e outros dispositivos pela umidade infiltrada no sistema de refrigeração.
- b - Corrosão do sistema de refrigeração e deterioração do óleo lubrificante, causada pela reação química da umidade infiltrada.

A amônia forma facilmente uma solução com a água e, desta forma, a umidade circula através do sistema como uma solução água-amônia. Portanto, no caso da amônia, são raros os problemas decorrentes do congelamento da água na instalação. Os hidrocarbonetos halogenados (CFCs), por outro lado, praticamente não formam uma solução com a água.

9.7.3. Influência sobre materiais

Diversos materiais, particularmente metais, são usados numa instalação de refrigeração. É, portanto, importante que o fluido refrigerante seja estável e inerte em relação a esses materiais, de modo a não causar corrosão ou expansão.

Dispõe-se de uma grande variedade de hidrocarbonetos halogenados. Por isso, esses compostos constituem uma boa opção para a utilização em unidades de refrigeração. Esses fluidos refrigerantes são quimicamente estáveis, assim dificilmente corroem os materiais usados. Entretanto, ao se escolherem os hidrocarbonetos halogenados, deve-se tomar algumas precauções.

O fluido refrigerante R-22, comparativamente ao R-12, apresenta maior tendência de expandir a borracha e também deteriora o óleo lubrificante. A interação entre fluidos refrigerantes, óleo e borracha sintética é bastante complexa. Assim, por exemplo, se a borracha sintética apresenta uma grande resistência à ação dos hidrocarbonetos halogenados, ela se expande bastante na presença de óleo lubrificante.

Os hidrocarbonetos halogenados não atacam o aço, o cobre, o latão, etc. Porém corroem ligas de alumínio que contêm elevados teores de magnésio, e ligas de alumínio e cobre na presença de água ou álcool. Assim, a corrosão de metais por esses compostos depende bastante da presença de impurezas, como a da água. Em geral, os hidrocarbonetos halogenados são inertes; entretanto, na presença de uma mistura de água e ar, bem como de cobre, eles causam a hidrólise.

A amônia é muito corrosiva em relação ao cobre e ao latão, que é uma liga de cobre. Portanto, se a amônia for utilizada como fluido refrigerante, não se deve usar estes metais. Pode-se, entretanto, usar o bronze como metal para os mancais se sua superfície estiver sempre coberta com película de óleo, pois a amônia não é muito corrosiva em relação ao bronze.

9.7.4. Os fluidos refrigerantes e o óleo lubrificante

Os hidrocarbonetos halogenados, conhecidos como freon, misturam-se bem com o óleo lubrificante, e a mistura resultante circula através do sistema de refrigeração. Entretanto, quando a quantidade de óleo lubrificante na mistura se torna extremamente elevada, o ciclo de refrigeração será prejudicado. O óleo lubrificante dificulta a transferência de calor no evaporador e no condensador, levando a uma redução da pressão de vaporização e elevação da pressão de condensação. A diluição do óleo pelo refrigerante reduz o seu efeito lubrificante, uma vez que sua viscosidade pode diminuir excessivamente. Finalmente, a própria qualidade do óleo lubrificante é deteriorada pelo aumento de depósitos e de acidez, decorrentes de sua decomposição.

Devido a essas características dos compostos halogenados, os problemas apresentados são inevitáveis. Portanto, no sentido de minimizá-los, deve-se conhecer perfeitamente as propriedades desses fluidos refrigerantes ao se fazer a escolha para uma dada instalação de refrigeração. A Tabela 9.1 fornece uma indicação dos tipos de óleos mais utilizados para cada fluido refrigerante.

Tabela 9.1 – Compatibilidade entre fluido refrigerante e óleo lubrificante

Refrigerantes		Óleos	
Halogenados	HCFC	R-22	Alquilbenzeno ou Mineral
	HCF	R-134a	Ester
		R-404a	Ester
		R-407c	Ester
		R-410a	Ester
		R-507	Ester
Naturais	Amônia	R-717	Polialfaolefina ou Mineral
	CO ₂	R-744	Polialfaolefina
	Propano	R-290	Polialfaolefina
	Butano	R-600	Polialfaolefina

Geralmente, no início de operação de uma instalação de refrigeração, há a formação de espuma no óleo lubrificante. Esta formação de espuma é causada pelo fluido refrigerante misturado ao óleo lubrificante. Quando uma máquina de refrigeração é colocada em operação, a pressão no cárter do compressor diminui bruscamente e o fluido refrigerante misturado ao óleo lubrificante se evapora rapidamente. Em consequência, formam-se espuma na superfície do óleo e gotas dele são aspiradas pelo compressor, as quais podem chegara ao interior dos cilindros.

Quanto menor for a temperatura do óleo lubrificante, mais o fluido refrigerante se misturará com o óleo. Para evitar este problema, às vezes, é colocado um aquecedor elétrico (aquecedor do cárter) no reservatório de óleo do compressor, para aquecer o óleo lubrificante durante a parada da unidade de refrigeração. A temperatura do óleo é ajustada por um termostato.

9.7.5. Propriedades elétricas dos fluidos refrigerantes

A ampla utilização das unidades de condicionamento de ar, de unidades de resfriamento de água, etc., deve-se muito à adoção dos compressores herméticos.

Por sua vez, o desenvolvimento dos compressores herméticos deve-se às excelentes propriedades elétricas dos novos fluidos refrigerantes, que não atacam o isolante do enrolamento do motor, o qual, para este tipo de compressor, está em contato direto com o fluido refrigerante.

9.7.6. Inflamabilidade e toxicidade dos fluidos refrigerantes

Geralmente, o vazamento de fluido refrigerante de um sistema de refrigeração é relativamente pequeno. Excetuando-se os acidentes, os vazamentos de fluido são muito raros. Entretanto, é muito importante conhecer a característica de toxicidade e de inflamabilidade dos fluidos refrigerantes, porque precisamos encher ou drenar uma instalação de refrigeração numa inspeção ou numa operação de manutenção. É também importante conhecer as medidas que devem ser tomadas em caso de emergência num acidente.

A amônia apresenta um forte odor característico e uma grande toxicidade. Portanto, deve-se manuseá-la com muito cuidado. Em caso de acidente, a sala de máquinas deve ser bem ventilada e as pessoas devem utilizar máscaras contra gases. No entanto, em qualquer caso, as normas de segurança vigentes devem ser consultadas e obedecidas.

9.7.7. Óleo lubrificante da unidade de refrigeração

O óleo lubrificante de uma máquina de refrigeração dotada de compressor alternativo é utilizado somente para lubrificar as superfícies deslizantes do compressor. Parte do óleo lubrificante circula, misturado ao fluido refrigerante, através do circuito frigorífico (condensador, evaporador, etc.), devido ao fenômeno mencionado anteriormente.

Por esta razão, o óleo utilizado numa unidade de refrigeração deve apresentar aquelas propriedades adequadas para a lubrificação, bem como características que não originem problemas quando penetrar no sistema de refrigeração.

Por outro lado, o óleo de uma unidade de refrigeração deve apresentar resistência a altas temperaturas, pois no processo de compressão do vapor de refrigerante, são atingidas altas temperaturas.

Como se mencionou acima, e conforme as condições de temperatura no sistema de refrigeração, os tipos de fluidos refrigerantes e os tipos de compressores, as características desejáveis de um óleo lubrificante de uma unidade de refrigeração são as seguintes:

- a) Baixo ponto de congelamento.
- b) Alto ponto de inflamação (boa estabilidade térmica).
- c) Viscosidade adequada.
- d) Imiscibilidade com o fluido refrigerante.

- e) Pequena capacidade de formar emulsão.
- f) Boa propriedade antioxidante.
- g) Baixo conteúdo de graxa (para evitar solidificação a baixa temperatura).
- h) Alta pureza (não deve conter matérias estranhas, como água, ácidos etc.).
- i) Boa característica de isolamento elétrica, quando utilizado em compressores herméticos.
- j) Alta resistência dielétrica da película de óleo.

9.7.8. O fim da utilização dos CFCs

Os CFCs foram sintetizados em 1890 e industrializados em 1928, quando se iniciou seu emprego como fluido refrigerante. Na década de 50, passaram a ser utilizados em larga escala como propelentes aerossóis, agentes expansores de espuma, além do aumento de sua utilização na produção de refrigerantes.

Os CFCs reúnem, numa combinação única, várias propriedades desejáveis: não são inflamáveis, explosivos ou corrosivos, são extremamente estáveis e muito pouco tóxicos. No entanto, em 1974, foram detectados, pela primeira vez, os problemas dos CFCs, tendo sido demonstrado que compostos clorados poderiam migrar para a estratosfera e destruir moléculas de ozônio. Por serem altamente estáveis, ao se liberarem na superfície terrestre conseguem atingir a estratosfera antes de serem destruídos. Os CFCs foram então condenados como os maiores responsáveis pelo aparecimento do buraco na camada de ozônio sobre a Antártica.

A camada de ozônio tem uma função importantíssima na preservação da vida. Ela é responsável pela filtragem dos raios ultravioletas que, em quantidades elevadas, são prejudiciais ao meio ambiente. Ao ser humano podem causar doenças da pele (queimadura e câncer), envelhecimento precoce, etc.

A UNEP, agência para o meio ambiente da Organização das Nações Unidas, iniciou uma série de reuniões para discutir os prejuízos do CFC na camada de ozônio. Em 1983, vários países se reuniram na Convenção de Viena, declarando princípios que visam aprofundar o tema em busca de protocolo ou tratado mundial sobre controle e emissão dos CFCs.

A decisão de reduzir o uso dos CFCs veio em 1987, com a assinatura do Protocolo de Montreal por quarenta e seis países, que assumiram o compromisso de reduzir o consumo em três fases: congelamento a partir de 1989, redução de 20% a partir de 1993 e redução de 50% a partir de 1998.

O Brasil acompanhou as reuniões do Protocolo e, em 1989, foi aprovada pelo Congresso Nacional a adesão do país às regras. Em julho de 1990, assinou com 62 países a Revisão do Protocolo de Montreal, a qual aprovou medidas mais restritivas: redução de 50% na produção e consumo dos CFCs a partir de 1993, redução de 85% a partir de 1997 e a eliminação total no ano 2000. Posteriormente, a Resolução CONAMA 267 de Set/2000, passou a ditar, no Brasil, os prazos para substituição dos CFCs, estabelecendo datas e limites para importações destas substâncias. Tendo sido prevista a proibição total da produção/importação do R12 até janeiro de 2007. A tabela abaixo mostra, de forma resumida, as datas previstas para a proibição da utilização dos CFCs e HCFSs.

Tabela 9.2 - Resumo dos eventos relacionados com a proibição dos CFCs

"Phase Out"	Refrigerante	Ação
1996	R11, R12 e R500	Extingue a produção.
		Equipamentos não mais fabricados
2010	HCFC22	Pára a fabricação de equipamentos
2020	HCFC22	Pára a fabricação do refrigerante
2020	HCFC123	Pára a fabricação de equipamentos
2030	HCFC123	Pára a fabricação do refrigerante

O Alternative Fluorocarbon Environmental Acceptability Study (AFEAS), programa que está sendo desenvolvido mundialmente, com a participação de muitos cientistas e suporte financeiro de milhões de dólares, estuda a substituição dos CFCs por HCFC (hidrogênio, cloro, flúor e carbono) e HCF (hidrogênio, flúor e carbono), com o propósito de chegar até a metade do próximo século ao uso integral de HCF, substância não nociva à camada de ozônio.

A eliminação rápida dos CFCs trará um substancial aumento nos custos de produção devido à necessidade de substituir tecnologias e ao abandono de investimentos feitos em tecnologia para a produção do CFC. O HCFC e o HCF têm custo estimado em duas a cinco vezes maiores que o do CFC.

A Tabela 9.3 apresenta alguns gases alternativos para substituição dos CFCs, bem como suas aplicações e temperaturas típicas de operação.

9.7.9. Retrofit

Quando começou a ser usado no início da década de 70 nos Estados Unidos, o termo retrofit se referia a alterações em equipamentos, ou no sistema de refrigeração ou ar condicionado, para melhorar seu desempenho ou forma de operação, proporcionando economia de energia. Há alguns anos, no entanto, a palavra passou a ser usada com frequência para definir a substituição de gases refrigerantes nos sistemas. Atualmente, é mais comum ouvir falar de retrofit com esse segundo significado, ou seja, relacionado à substituição dos gases CFCs por outros alternativos e inofensivos à camada de ozônio.

O retrofit pode acarretar num aumento no consumo de energia. Uma maneira de diminuir esse efeito indesejável seria a aplicação de novos projetos de motores elétricos e o aprimoramento dos materiais usados no acabamento de buchas e cilindros, para que as perdas por atrito sejam reduzidas.

Para o retrofit do gás refrigerante alguns cuidados devem ser tomados: escolher e colocar um óleo e um filtro secador compatível com o gás usado, usar ferramentas adequadas, limpar corretamente o compressor, usar a bomba de vácuo da maneira certa, entre outros procedimentos. Equipamentos que utilizam CFC como refrigerante (R-12 ou R-502, por exemplo) usam como lubrificante o óleo mineral. Já os HCFCs (R-22) não se misturam totalmente com este tipo de óleo, prejudicando o desempenho da máquina. Nestes casos é indicado como óleo lubrificante o alquilbenzeno, que apresenta uma miscibilidade melhor com o HCFC. No caso do R-134a, o lubrificante ideal é o poliol éster, indicado principalmente para compressores herméticos, como mostrado na Tabela 9.3.

Tabela 9.3 - Indicativo da utilização dos fluídos refrigerantes

ASHRAE	Fabricante	Tipo	Lubr	Temperatura de Evaporação			Aplicação
				Alta	Média	Baixa	
Substitutos do R12							
R-134a	Suva®134a	HFC	POE	X	X		Refrigeração Comercial Chillers Automotivo: novos & retrofit
	Genetron®134a						
	Forane®134a						
R-401a	Suva®MP39	HCFC	MO AB	X	X		Equipos. de desloc. positivo Supermercados: temp. média
	Genetron®MP39						
R-409a	Suva®409a	HCFC	MO AB	X	X		Equipos. de desloc. positivo Supermercados: temp. média
	Genetron®409a						
	Forane®409a						
Substitutos do R500							
R-401b	Suva®MP66	HCFC	MO AB		X	X	Freezers e transporte frigorífico
	Genetron®MP66						
Substitutos do R502							
R-404a	Suva®MP62	HFC	POE	X	X	X	Refrig. comercial: novos e retrofit Transporte frigorífico
	Genetron®404a						
	Forane®404a						
R-507	Suva®507	HFC	POE	X	X	X	Refrig. comercial: novos e retrofit Transporte frigorífico
	Genetron®AZ50						
	Forane®AZ50						
R-408A	Suva®408A	HFC	MO AB	X	X	X	Refrig. comercial: retrofit
	Genetron®408A						
	Forane®408A						
R-402a	Suva®HP80	HCFC	MO AB	X	X	X	Refrig. comercial: retrofit
	Genetron®HP80						
R-402b	Suva®HP81	HFC	MO AB		X	X	Máquinas de gelo e outras
	Genetron®HP81						
R-407c	Suva®407C	HFC	POE	X			Equipos. de desloco positivo - AC Equipos. novos para AC
	Genetron®407C						
	Forane®407C						
R-410a	Suva®410A	HFC	POE	X			Equipos. de desloco positivo - AC Equipos. novos para AC.
	Puron®						
	Genetron®410A						
	Forane®410A						

Se o retrofit de gases for feito sem que se leve em conta todos esses cuidados, provavelmente o sistema não funcionará da maneira correta, e desperdícios de energia e recursos financeiros, com certeza, aparecerão.

9.8. TERMOACUMULAÇÃO

9.8.1. Introdução

O ar condicionado, nos dias de verão, é o maior responsável individual pela ocorrência de pontas de demanda de energia elétrica em instalações comerciais. No período da tarde, quando o ar condicionado é mais necessário, para manter temperaturas confortáveis, este aumento da demanda de energia soma-se à aquela já causada pela iluminação, equipamentos, computadores e outros usuários. Isto exige que as concessionárias públicas coloquem em serviço fontes de geração adicionais, mais dispendiosas, para atender tal aumento da demanda.

Os consumidores comerciais, cujas elevadas cargas devidas ao ar condicionado contribuem para essa necessidade de geração suplementar, são taxados com um custo adicional, baseado na sua mais alta demanda de eletricidade das horas de ponta. Além disso, a energia elétrica consumida, durante o horário de ponta (ou de demanda máxima), tem uma tarifa diferenciada (R\$ / kWh), e que é superior aquela do período de demanda normal (fora de ponta).

A armazenagem de frio, ou termoacumulação, é um método para deslocamento dos horários de ponta de carga, ou ainda, para nivelamento da carga, que reduz a demanda, transferindo o consumo de energia do horário de ponta para um horário fora de ponta. Conseqüentemente, reduz os custos de energia. O frio é armazenado através da produção de gelo, ou através do resfriamento de água feito pelo sistema frigorífico. Isto ocorre durante a noite, fora dos horários de ponta, quando a demanda de energia é mínima.

O frio armazenado auxilia no resfriamento, nos horários de ponta de carga do ar condicionado no dia seguinte. Armazenar frio durante a noite e usá-lo durante o dia, não é uma idéia nova, nem tão pouco experimental. Durante muitos anos este conceito tem sido usado no condicionamento de ar em instalações com demanda de pico de curta duração, como igrejas e teatros. Agora há interesse renovado no uso mais de sistemas de armazenagem de frio, tanto por parte dos usuários como também por parte das empresas geradoras de eletricidade, responsáveis pela oferta de energia elétrica. Isto ocorre porque a termoacumulação pode se constituir numa maneira segura e econômica de reduzir os custos operacionais e de investimentos em novas usinas de geração de energia.

A termoacumulação não só pode reduzir, até pela metade, os custos operacionais, como também pode reduzir substancialmente os desembolsos de capital, quando os sistemas são adequadamente projetados para novos edifícios comerciais e industriais. Projetistas podem especificar equipamentos (chillers) de capacidade média, operando 24 horas por dia, ao invés de máquinas com capacidade integral para atender aos picos, operando somente 10 ou 12 horas por dia. Quando aplicados em reforma ou reequipamento de instalações existentes, um sistema de termoacumulação pode, freqüentemente, suprir as cargas térmicas adicionais sem aumento da capacidade do chiller existente.

Em projetos convencionais de sistemas de ar condicionado, as cargas térmicas de refrigeração são medidas em termos de "Toneladas de Refrigeração" ou "TR" necessárias. Sistemas de Termoacumulação, entretanto, têm suas capacidades indicadas em "Toneladas Hora" ou "TR-HORA". A Figura 9.23 representa a carga teórica de refrigeração de 100 TR mantida durante 10 horas, ou uma carga de refrigeração de 1000 TR-HORA. Cada quadrado no diagrama representa 10 TR-HORA.

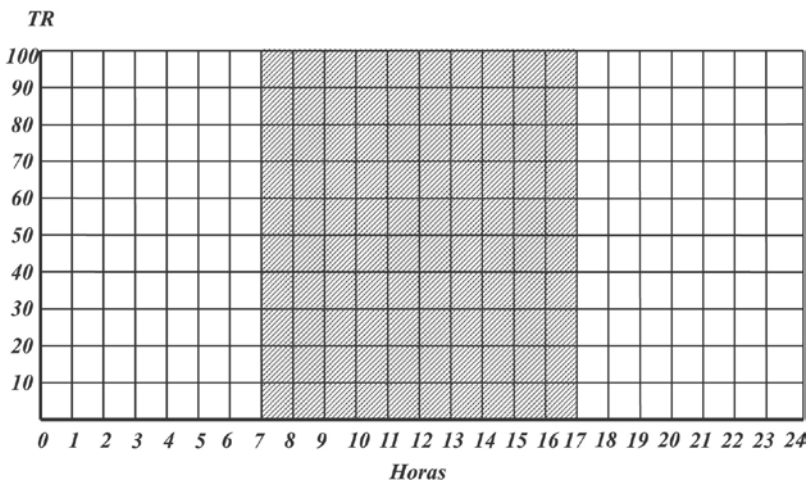


Figura 9.23 – Carga de refrigeração de 100TR mantida por 10 horas

Na prática, nenhum sistema de ar condicionado de edifícios comerciais opera com 100% de capacidade durante todo o ciclo diário de refrigeração. A carga de ar condicionado atinge o seu pico durante o período da tarde - geralmente entre 14:00 e 16:00h - quando as temperaturas ambientes são mais altas. A Figura 9.24 representa o perfil típico da carga de ar condicionado de um edifício comercial durante o dia.

Como se vê, o chiller de 100 TR de capacidade total é necessário somente durante duas das dez horas do ciclo de refrigeração. Durante as outras oito horas, apenas uma parcela da capacidade total do chiller é solicitada. Somando-se os quadrados sombreados, encontra-se um total de 75, cada um dos quais representando

10 TR-HORA. Entretanto, é necessário especificar chiller de 100 TR, para atender à carga de refrigeração de 100 TR no horário de ponta. O fator de carga é definido como a relação entre a carga real de refrigeração e a capacidade potencial total do chiller, conforme mostra a equação abaixo.

$$\text{Fator de carga (\%)} = \frac{\text{TR - HORA (carga real)} \times 100}{\text{TR - HORA (carga potencial total)}} = \frac{750}{1000} \times 100$$

Como se vê, o chiller de 100 TR de capacidade total é necessário somente durante duas das dez horas do ciclo de refrigeração. Durante as outras oito horas, apenas uma parcela da capacidade total do chiller é solicitada. Somando-se os quadros sombreados, encontra-se um total de 75, cada um dos quais representando 10 TR-HORA. Entretanto, é necessário especificar chiller de 100 TR, para atender à carga de refrigeração de 100 TR no horário de ponta. O fator de carga é definido como a relação entre a carga real de refrigeração e a capacidade potencial total do chiller, ou seja:

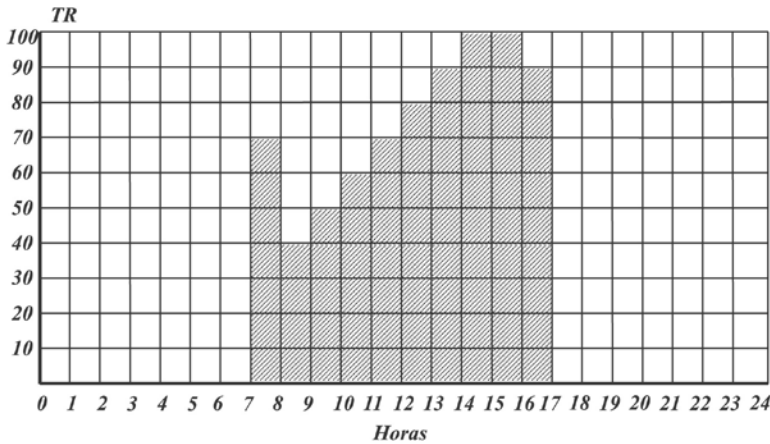


Figura 9.24 - Perfil típico da carga de ar condicionado de um edifício comercial durante o dia

$$\text{Fator de carga (\%)} = \frac{\text{TR - HORA (carga real)} \times 100}{\text{TR - HORA (carga potencial total)}} = \frac{750}{1000} \times 100$$

Neste caso, o chiller tem um fator de carga de 75%, sendo capaz de prover 1000 TR-HORA, quando somente são solicitadas 750 TR-HORA. Se o fator de carga é baixo, o desempenho financeiro do sistema também é baixo. Dividindo-se o total de TR-HORA pelo número de horas que o chiller opera, tem-se a carga média do edifício durante o período de refrigeração. Se a carga do ar condicionado pudesse ser deslocada para um horário fora de ponta ou nivelada para a carga média, poder-se-ia utilizar um chiller de menor capacidade, com um fator de carga de 100%, e melhor o desempenho financeiro.

9.8.2. Escolhendo armazenagem total ou parcial

Duas estratégias de administração de carga são possíveis com o sistema de armazenagem de frio por bancos de gelo. Quando as tarifas de energia elétrica requerem um deslocamento completo de carga, pode-se usar um chiller de capacidade convencional, com armazenagem de energia de frio suficiente para deslocar a carga total para as horas fora de ponta. Essa estratégia é chamada Sistema de Armazenagem Total e é frequentemente usada em ampliações de instalações existentes usando a capacidade do chiller existente.

A Figura 9.25 mostra o mesmo perfil da carga de ar condicionado do edifício comercial, mas com a carga de refrigeração completamente deslocada para as 14 horas fora do horário de uso da refrigeração. O chiller é usado para produzir e armazenar gelo ou para resfriar água durante a noite. O frio armazenado atende à demanda de 750 TR-HORA durante o dia. A carga média foi reduzida para 53,6 TR ($750 \text{ TR-HORA} / 14:00 \text{ horas} = 53,6 \text{ TR}$), o que resulta em significativa redução dos custos de energia, tanto pela redução do pico da demanda, quanto pela redução nas horas de tarifas altas.

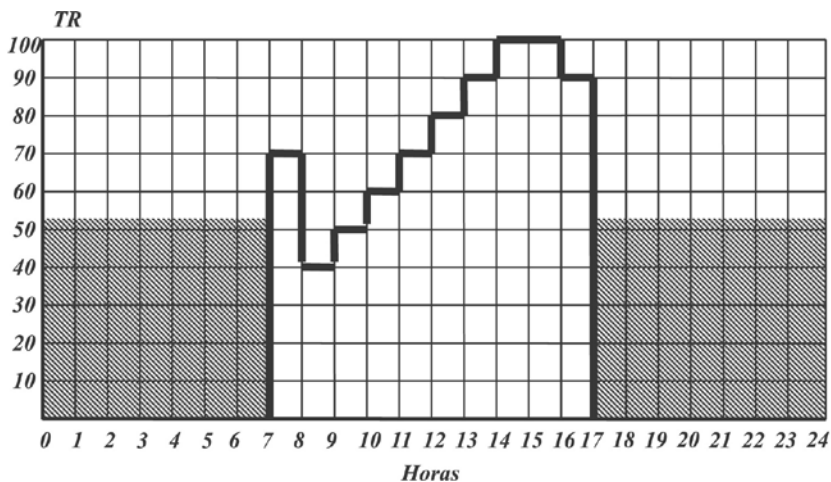


Figura 9.25 - Sistema de Armazenagem Total

Em instalações novas, um Sistema de Armazenagem Parcial é a estratégia de administração de carga mais prática e aquela de maior eficiência de custo. Neste método de nivelamento de carga, o chiller funciona continuamente. Ele formará gelo ou resfriará água durante a noite, e durante o dia, funcionará para atender a carga do sistema de ar condicionado com a ajuda do frio armazenado. O aumento das horas de operação de 14 para 24 horas resulta na carga média mais baixa possível ($750 \text{ TR-HORA} / 24 \text{ horas} = 31,25 \text{ TR}$), como ilustrado na Figura 9.26. A incidência de tarifa de ponta da demanda é, consideravelmente, reduzida e a capacidade do chiller pode ser diminuída em 50 a 60%.

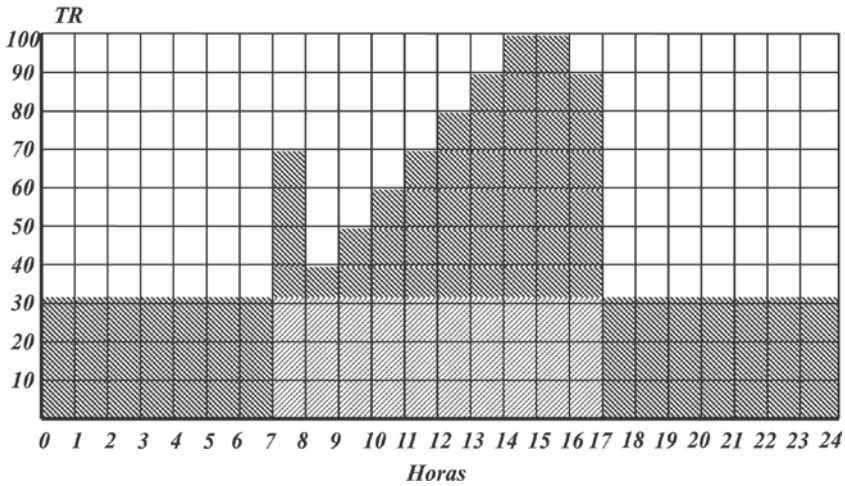


Figura 9.26 - Sistema de Armazenagem Parcial

9.9. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

A grande importância dada ao uso racional de energia elétrica, no setor de ar condicionado e refrigeração, é facilmente compreendida quando são considerados os percentuais de consumo destes setores. Segundo artigo publicado na revista Oficina do Frio (1997) estes setores representam 20% do consumo total de energia do Brasil, sendo que os refrigeradores e freezers são responsáveis pelo maior consumo no setor residencial, com participação de 32%, e respondem ainda por 17% do consumo comercial e 9% do consumo global do país.

A seguir são ressaltados alguns aspectos que, se observados, podem reduzir não só o consumo de energia dos equipamentos, como também aumentar a sua vida útil. Os aspectos abordados procuram identificar e eliminar problemas relacionados a projeto, instalação, operação e manutenção dos sistemas de ar condicionado, sempre com o principal enfoque na conservação de energia. Assim, devem ser observados os seguintes itens:

9.9.1. Nível inadequado de temperatura

Quando as temperaturas medidas em uma câmara frigorífica ou em um ambiente condicionado estão abaixo das temperaturas recomendadas, há um consumo desnecessário de energia elétrica, o qual pode ser facilmente evitado pelo ajuste correto do termostato de controle.

9.9.2. Inexistência de controle automático (termostato ou pressostato)

Os equipamentos de geração de frio são, geralmente, dimensionados para operarem em média de 16 a 18 horas para cada ciclo de 24 horas. Na falta de acessórios de controle (termostatos ou pressostatos), o funcionamento do equipamento frigorífico será contínuo, o que provoca desperdício de energia, portanto, a utilização destes controles é imprescindível para o funcionamento adequado de uma instalação frigorífica.

9.9.3. Tipo inadequado de iluminação

Se as lâmpadas utilizadas em ambientes refrigerados forem do tipo incandescente, pode-se obter uma economia considerável com a sua substituição por lâmpadas mais eficientes, como as lâmpadas fluorescentes.

9.9.4. Incidência direta de raios solares e/ou isolamento deficiente

Em se tratando de câmaras frigoríficas, o consumo excessivo de energia devido à incidência direta de raios solares e/ou isolamento deficiente é proporcional às dimensões da câmara, à diferença entre a temperatura externa e a interna, ao material e à espessura do isolamento e ao tempo funcionamento diário da câmara. Este consumo excessivo pode ser facilmente evitado, pela utilização de isolantes adequados, de um correto planejamento da localização e da orientação do espaço refrigerado.

Em edifícios comerciais é comum a utilização de grandes áreas envidraçadas, o que eleva consideravelmente a carga térmica do ambiente. A simples adoção de cortinas, persianas ou peças arquitetônicas (brise-soleil), que evitem a radiação direta pode reduzir de forma bastante significativa a carga térmica destes ambientes.

Deve-se evitar também que portas e janelas fiquem abertas além do tempo estritamente necessário, pois enquanto as portas e/ou janelas permanecem abertas ocorre a entrada de ar não refrigerado no ambiente condicionado.

9.9.5. Condições e forma de armazenagem de produtos nos espaços refrigerados

A armazenagem dos produtos de forma inadequada em câmaras frigoríficas prejudica a circulação de ar frio, assim, deve-se corrigir este problema para que ocorra um ganho de eficiência térmica do sistema, o que acarreta na redução do consumo de energia elétrica.

A instalação de câmaras, balcões, ilhas, etc., próximo a fontes de calor, também aumenta a carga térmica do sistema. Assim, deve-se evitar a proximidade destas fontes, dentro das possibilidades, evitando-se o consumo excessivo de energia elétrica.

Com relação aos balcões e ilhas, deve-se cobrir, ou fechar, as suas aberturas no final da jornada de trabalho, para que não haja “perda de frio” para o ambiente. Pode-se também desligar o equipamento frigorífico, quando as características do produto e/ou operacionais permitirem, ao final do expediente. Porém sempre obedecendo as normas sanitárias vigentes.

9.9.6. Ventilador do evaporador

O ventilador do evaporador é responsável pela circulação do ar frio no ambiente refrigerado, salvo as situações em que a câmara frigorífica é projetada para circulação natural de ar, sendo que sua ausência gera formação de gelo no evaporador, diminuindo a eficiência das trocas térmicas, e elevando o consumo de energia elétrica.

A formação de gelo no evaporador e tubulações do circuito frigorífico eleva o consumo de energia do sistema, pois o gelo atua como isolante no evaporador. Este problema também pode ser causado por falta de isolamento das tubulações, desregulagem da válvula termostática, ou carga de refrigerante inadequada. Pode-se conseguir uma redução de até 20% no consumo de energia com a manutenção do evaporador limpo, isto é, sem acúmulo de gelo.

9.9.7. Inexistência de controle automático da iluminação de uma câmara frigorífica

A iluminação interna de uma câmara frigorífica deve ser desligada automaticamente com o trancamento externo da porta. A simples instalação de um interruptor no batente da porta, que cumpra esta função, pode contribuir para a redução do consumo de energia elétrica.

9.9.8. Ventiladores do Condensador

A instalação de um ventilador axial descentralizado, em relação à área responsável pela troca térmica, diminui a eficiência do condensador, pois desta forma há um direcionamento de ar para as laterais do condensador, o que deve ser evitado. Além disto, os colarinhos de proteção dos ventiladores axiais, além de protegerem a hélice, são os principais responsáveis pelo correto direcionamento do ar através do condensador, elevando sua eficiência térmica e, conseqüentemente, diminuindo o consumo de energia elétrica. Portanto, estes colarinhos devem ser mantidos em bom estado, e não devem ser retirados do sistema.

Deve-se evitar a obstrução do fluxo de ar de resfriamento do condensador, pois a dificuldade de circulação de ar através da área responsável pela troca térmica, eleva a temperatura de condensação, o que acaba por aumentar o consumo de energia elétrica, ou até mesmo danificar o compressor.

9.9.9. Limpeza do condensador e do evaporador

A presença de sujeira (óleo, poeira, etc.) prejudica a eficiência dos trocadores de calor (condensador e evaporador), conseqüentemente ocorre o aumento do consumo de energia elétrica.

A falta de separador de óleo na saída do compressor, em instalações de grande porte, equipadas com compressor modulador de capacidade, permite a passagem do óleo do cárter para as linhas da instalação e demais componentes, comprometendo a eficiência do sistema, além do alto risco de fundir o compressor.

9.10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COSTA, E. C., 1982, **“Refrigeração”**, 3ª Edição, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo.
- DOSSAT, R. J., 2004, **“Principios de Refrigeración”**, John Wiley & Sons, México.
- ETSU, 2000, **“Designing Energy Efficient Refrigeration Plant”**, GPG-283, London.
- MCQUISTON, F. C., PARKER, J. D., 1994, **“Heating, Ventilating and Air Conditioning: Analysis and Design”**, 4a Ed., John Wiley & Sons, New York.
- PIZZETTI, C., 1970, **“Acondicionamiento del Aire y Refrigeracion – Teoria y Calculo de las Instalaciones”**, Editora Interciencia, Madrid.
- Revista ABRAVA, abril-agosto de 1980, março de 1982, setembro-outubro 1990,
- Revista OFICINA DO FRIO, julho-agosto de 1996, novembro de 1997 (vol. 34).
- STOECKER, W. F., e JONES, J. W., 1985, **“Refrigeração e Ar Condicionado”**, Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo.
- STOECKER, W. F., JABARDO, J. M., 2002, **“Refrigeração Industrial”**, 2ª Ed., Edgard Blucher Ltda. São Paulo.
- VENTURINI, O. J., PIRANI, 2005, **“Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial”**, Livro Técnico PROCEL, Eletrobrás, Rio de Janeiro.
- YAMANE, E. E SAITO, H., 1986, **“Tecnologia do Condicionamento de Ar”**, Ed. Edgard Blucher Ltda., São Paulo.

Capítulo 10

CALDEIRAS E FORNOS

10.1. INTRODUÇÃO

O mercado altamente competitivo que existe atualmente faz com que as empresas busquem incessantemente a redução de seus custos de produção. Uma das alternativas para alcançar-se este objetivo é a utilização racional da energia, procurando-se minimizar o consumo de energia elétrica e dos diversos energéticos utilizados no processo produtivo. Neste sentido, a utilização eficiente da energia térmica em fornos e caldeiras promove, além da esperada redução de custos e dos desperdícios de energia, uma série de outras vantagens, principalmente do ponto de vista ambiental.

Neste capítulo dedicado à utilização racional da energia térmica, inicialmente procura-se apresentar alguns conceitos básicos necessários, informações relacionadas às fontes combustíveis, como se dá o processo de sua utilização e quais são os equipamentos envolvidos neste processo. Parte-se então para a análise da eficiência do processo de utilização da energia térmica e, finalmente, das possíveis maneiras de torná-lo mais eficiente.

10.2. CONCEITOS BÁSICOS

Para a melhor compreensão da análise de sistemas térmicos é necessário o conhecimento de alguns conceitos básicos, como os principais aspectos relacionados à transferência de calor e as características dos combustíveis. Serão apresentados a seguir, de forma resumida, estes conceitos, buscando relacionar aqueles de maior importância para a indústria.

10.2.1. Conceitos Termodinâmicos

Calor e Temperatura

Calor e temperatura são termos extremamente importantes, devendo ser claramente compreendidos. A temperatura de um corpo é dada pela energia cinéti-

ca média de suas moléculas, sendo a energia cinética total destas moléculas definida como energia interna. Por calor entende-se a energia que flui entre dois sistemas devido unicamente a sua diferença de temperatura. Assim sendo, pode-se afirmar que o calor é uma forma de energia em trânsito. Desta maneira, a temperatura refere-se a um nível de intensidade e o calor a uma medida de quantidade.

Calor Específico

O calor específico define a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de um dado material em 1°C. Desta maneira, cada material possui uma característica própria no que diz respeito a sua capacidade de absorver ou rejeitar calor. Como exemplo para comparação, pode-se citar que o calor específico do cobre é quase dez vezes superior ao da água, ou seja, para causar uma mesma variação de temperatura, cada quilo de cobre precisa receber ou rejeitar calor cerca de 10 vezes menos calor do que um quilo de água.

Tabela 10.1 – Calor Específico de algumas substâncias

Substância	Calor específico (cal/g°C)	Calor específico (kJ/kg°C)
Água	1,00	4,19
Álcool	0,58	2,43
Alumínio	0,22	0,92
Chumbo	0,03	0,13
Cobre	0,09	0,39
Ferro	0,11	0,46
Mercúrio	0,03	0,14
Prata	0,06	0,23
Vidro	0,20	0,84

Calor Sensível

Calor sensível é o calor removido ou adicionado a uma substância causando uma mudança de temperatura, sem causar uma mudança de fase. É dito sensível, pois seu efeito pode ser “sentido”.

Calor Latente

Calor latente, ao contrário do calor sensível, é aquele que é removido ou adicionado a um corpo sem causar mudança de temperatura, mas causando mudança de fase. Para exemplificar estas definições, pode-se utilizar o processo de vaporização da água à pressão atmosférica, esquematizado na Figura 10.1. A água, ao ser aquecida até a temperatura de vaporização (100°C), passa por um processo de aumento gradativo em sua temperatura, conforme indica o trecho AB. O calor recebido pela água e que causa este aumento de temperatura é chamado de calor sensível. Ao iniciar-se a vaporização, a água continua recebendo calor (trecho BC) mas a temperatura continua constante. Desta maneira, o calor responsável pela mudança de fase é o calor latente.

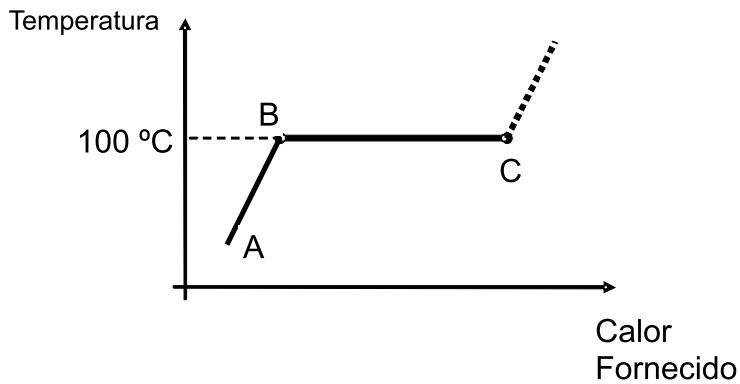


Figura 10.1 - Diagrama temperatura x calor absorvido

Poder Calorífico

O poder calorífico representa a quantidade de calor liberada na combustão de uma unidade de massa de um determinado combustível e pode ser classificado em superior ou inferior. Para analisar esta diferença é necessário introduzir alguns conceitos.

Quando a água começa a se vaporizar, a temperatura permanece constante e, durante um certo intervalo de tempo, tem-se uma mistura de água e vapor até que toda a água seja convertida em vapor. Chama-se de título a razão entre a massa de vapor presente na mistura e a massa total da mistura. Por exemplo, quando a água está começando a se tornar vapor, o título é zero, pois ainda não se tem nenhuma massa de vapor formado. Assim que toda água é convertida, tem-se título igual a um, pois toda massa existente é de vapor. Quando está em andamento o processo de vaporização, o título vai variando gradualmente de zero a um. Além disto, chama-se de vapor saturado o vapor de título igual a um.

Entre os produtos resultantes de um processo de combustão está o vapor d'água. Este vapor formado possui uma certa quantidade de energia que pode, teoricamente, ser aproveitada e que está relacionada com seu calor latente de vaporização, ou seja, com a energia necessária para levar a água de uma condição de título zero à condição de título um.

No cálculo do poder calorífico superior inclui-se entre a energia que pode ser aproveitada do combustível o calor latente de vaporização da água. Desta forma, considera-se que a água presente nos produtos da combustão esteja no estado líquido. É uma medida do calor máximo que se pode obter na combustão de um determinado combustível.

O poder calorífico inferior é calculado desconsiderando-se o calor de vaporização da água na quantidade de energia que pode ser fornecida pelo combustível, ou seja, considera-se que a água deixe o processo na forma de vapor. Como a temperatura de saída dos gases, gerados no processo da combustão, é geralmente superior à temperatura de vaporização da água, esta medida representa de maneira mais realista o calor disponível após a combustão.

O poder calorífico pode ser determinado praticamente através de um calorímetro. Neste aparelho, uma determinada quantidade de combustível é queimada em um recipiente envolto por uma quantidade conhecida de água. Medindo-se a variação da temperatura da água determina-se o calor absorvido por ela, ou seja, determina-se o calor liberado pelo combustível. A razão entre calor liberado e massa indica o poder calorífico do combustível.

Na Tabela 10.2 são apresentados os valores médios para os poderes caloríficos inferior e superior de alguns combustíveis.

Tabela 10.2 - Poder calorífico e massa específica de alguns combustíveis

Energético	Massa Específica kg/m ³	Poder Calorífico Inferior (BEESP) kcal/kg	Poder Calorífico Superior (BEN) kcal/kg
Petróleo	867	10200	10900
Carvão vapor	-	4000	4460
Carvão Metalúrgico	-	7425	7700
Lenha	390	2530 (1)	3300
Cana-de-açúcar	-	917	1030
Óleo Diesel	851	10180	10750
Óleo Combustível	999	9547	10900
Gasolina	738	10556	11230
GLP	552	11026	11750
Nafta	704	10462	11320
Querosene	787	10396	11090
Gás Canalizado	-	4230 (3)	4700 (3)
Gás Coqueria	-	4400 (3)	4500 (3)
Coque Carvão Mineral	-	6900	7300
Lixívia	2100		3030
Carvão Vegetal	250	6115	6800
Álcool Anidro	791	6400	7090
Álcool Hidratado	809	5950	6650
Bagaço de Cana (2)	-	1777	2257
Gás de Refinaria	780	8272	8800
Gás Natural	-	8554 (3)	9400 (3)

(1) Lenha com 25% de umidade

(2) Bagaço com 50% de umidade

(3) kcal/m³

10.2.2. Mecanismos de Transferência de Calor

Serão descritas a seguir as principais formas pelas quais o calor pode ser transferido: condução, convecção e radiação.

Condução

A condução ocorre pela transferência de energia causada por colisões entre moléculas vizinhas de um corpo. Quando uma barra de ferro é aquecida em uma ponta, as moléculas neste local recebem uma quantidade de energia que aumenta sua energia cinética, aumentando assim sua temperatura. Estas moléculas, ao colidirem com as moléculas a seu lado, transferem parte de sua energia cinética, ou seja, transferem calor. Deste modo, o calor propaga-se através da barra até que a temperatura nas duas extremidades seja igual. Este processo ocorre em materiais sólidos, sendo os melhores condutores os metais.

Convecção

A convecção é o processo de transferência de calor que ocorre em fluidos de maneira geral. O princípio da convecção pode ser observado no exemplo a seguir. Quando um recipiente contendo água é aquecido por baixo por uma fonte de calor, a água que está na parte inferior recebe calor pela condução através da parede deste recipiente. Como os líquidos, de maneira geral, são maus condutores de calor, apenas uma pequena parcela de água é aquecida. Como o líquido da parte inferior recebe a maior parte do calor fornecido, ele expande-se, tornando-se menos denso. Desta maneira, esta parcela do líquido desloca-se para a superfície, causando o movimento da água ainda fria da superfície para o fundo. Este movimento contínuo do fluido é chamado de corrente convectiva. Este ciclo repete-se e, se a fonte de calor mantiver-se presente, continua até ocorrer a vaporização.

Radiação

Radiação é o processo pelo qual o calor é transferido através de ondas eletromagnéticas, sem a necessidade de um meio material para sua propagação. O exemplo mais comum é a transferência de calor do sol para a Terra. Como no espaço não existe um meio material para transportar esta energia, esta chega através de ondas, movendo-se à velocidade da luz.

10.2.3. Propriedades dos Combustíveis

A correta conceituação e interpretação das propriedades dos combustíveis são de extrema importância para determinar sua correta utilização. Assim sendo, a seguir são apresentadas as principais e mais utilizadas propriedades dos combustíveis industriais.

Viscosidade

A viscosidade de um líquido é a medida da resistência que este líquido oferece ao escoamento, sendo variável em função da temperatura em que é obtida. À medida que a temperatura cresce, a viscosidade diminui, tornando-se mais fácil o escoamento do líquido. Uma das medidas mais utilizadas para a caracterização da viscosidade é a Saybolt Universal. Esta unidade indica o tempo, em segundos, que 60 ml de um líquido levam para escoar através de um orifício padrão a uma determinada temperatura, mantida constante durante o ensaio. Se o orifício for do tipo universal, a viscosidade é chamada Segundos Saybolt Universal, e se o orifício for do tipo Furol, a viscosidade é chamada Segundos Saybolt Furol. O orifício Furol é dez vezes maior que o Universal. As temperaturas mais utilizadas nestes ensaios são 37,8°C, 50°C e 98,9°C.

Ponto de fulgor

O ponto de fulgor indica a temperatura na qual o combustível, quando aquecido, emite vapores suficientes para se iniciar o processo de combustão quando na presença de uma chama. Desta maneira, o ponto de fulgor indica a temperatura máxima em que o combustível pode ser manuseado sem haver o perigo de iniciar-se a combustão.

Ponto de fluidez

O ponto de fluidez é uma indicação da menor temperatura que um óleo pode suportar sem perder a capacidade de escoar através dos diversos equipamentos, como válvulas e tubulações.

Ponto de névoa

Em um óleo, o ponto de névoa indica qual a temperatura, expressa em números inteiros, na qual se inicia a cristalização ou separação de suas parafinas. Este fato pode ser observado pelo aparecimento de uma névoa ou turvação no fundo de um tubo de ensaio, quando a amostra é resfriada sob determinadas condições. A cristalização das parafinas pode bloquear filtros, tubulações e outros equipamen-

tos, restringindo o escoamento do combustível. A temperatura na qual ocorre esta precipitação depende da origem, tipo e faixa de destilação do óleo. Quando mais parafínico o óleo, mais alto o ponto de névoa e menos adequado o combustível para operar em baixas temperaturas.

Granulometria

A granulometria refere-se às dimensões médias da cada partícula que compõem um combustível sólido. Por exemplo, o carvão ao sair da mina apresenta-se em diversos tamanhos, e, para ser comercializado, suas dimensões são reduzidas para tamanhos apropriados.

Umidade

Indica qual a porcentagem de água contida nos combustíveis. É uma das principais características de um carvão. Cada mina apresenta uma umidade quase constante, sendo seu valor variável em função da procedência.

Friabilidade

Característica que um carvão possui de se partir com facilidade em pedaços menores.

10.3. COMBUSTÍVEIS

Define-se como combustível a substância, natural ou artificial, susceptível de, ao se combinar quimicamente com outra, gerar uma reação exotérmica rápida, desprendendo calor e luz. Inúmeros elementos e compostos químicos possuem esta propriedade, principalmente quando a reação é feita entre eles e o oxigênio. Neste capítulo serão estudados os diversos tipos de combustíveis, sua classificação e características, ressaltando aqueles de principal uso na indústria.

10.3.1. Classificação dos Combustíveis

Os combustíveis são provenientes de duas fontes básicas de energia: a primária e a secundária. Nas fontes de energia primária, os combustíveis são produtos provindos da natureza, tais como o petróleo e o gás natural, podendo ser subdivididas em fontes renováveis e não renováveis. Nas fontes de energia secundária, os produtos energéticos são resultantes de diferentes centros de transformação (refinarias, destilarias, centrais elétricas, etc.). Os combustíveis podem ser classificados conforme a Tabela 10.3.

Tabela 10.3 - Classificação dos combustíveis

Classificação	Tipo	Exemplo
Sólidos	Naturais	Madeira Lenha Serragem Cavacos
		Turfa Linhito Antracito Hulha
	Artificiais	Carvão Vegetal Coque de Carvão Coque de Petróleo Briquetes
Líquidos	Naturais	Petróleo Óleos de Xisto
	Artificiais	Derivados do Petróleo Alcatrão Álcool
Gasosos	Naturais	Gás Natural Metano
	Artificiais	Hidrogênio Butano e Propano GLP Gás de Iluminação Gás de Coqueria Gás de Nafta Gás de Gasogênio Gás de Alto Forno
Coloidais (mistura de combustíveis sólidos e líquidos)		
Resíduos de Fabricação e de Extração		

Antigamente os mais utilizados, os combustíveis sólidos perderam sua posição para os outros com o advento da era do petróleo. Entretanto, com o surgimento da tecnologia da gaseificação, seu uso na indústria tende novamente a crescer, devido a sua transformação em um combustível mais apropriado para o uso em processos energéticos. Por sua vez, os combustíveis líquidos são, atualmente, muito utilizados

na indústria. Entre suas vantagens estão a facilidade de manuseio, transporte e armazenagem e sua combustão satisfatória para os objetivos usuais. Os combustíveis gasosos são aqueles que reúnem as melhores características para o uso industrial: sua combustão possui rendimento térmico elevado e necessitam de pequeno excesso de ar, não apresentam emissões sulfurosas apreciáveis e nem depósitos de cinzas. Por outro lado requerem sistemas mais caros de armazenamento e transporte.

10.3.2. Consumo de Combustíveis na Indústria

Do total da energia consumida pela indústria, cerca de 53% é fornecida por combustíveis, sendo o restante suprido pela energia elétrica. Desta parcela de energia atendida pelos combustíveis, na tabela a seguir apresenta-se a participação percentual no consumo industrial dos principais combustíveis utilizados.

Tabela 10.4 – Consumo percentual de Combustíveis no Setor Industrial (%)

Combustível	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Bagaço de cana	17,9	17,7	17,2	18,2	20,1	20,7	16,2	19,9	21,2	22,0	22,3
Óleo combustível	19,2	19,5	20,9	20,6	19,5	16,2	14,6	12,2	11,2	9,3	7,7
Coque de carvão mineral	16,7	16,8	16,0	15,1	14,3	12,2	13,4	12,8	12,8	12,3	11,9
Lenha	12,8	12,2	11,6	11,1	11,4	11,0	11,0	10,4	9,4	9,5	9,5
Carvão vegetal	11,5	10,9	9,6	8,8	7,7	8,3	8,9	7,9	7,9	8,9	10,1
Gás natural	5,1	5,1	5,9	6,3	6,0	6,5	8,0	9,2	10,7	10,7	11,6
Outras fontes primárias renováveis	5,1	5,3	5,4	5,4	5,5	6,0	6,2	6,2	6,4	7,1	7,0
Carvão mineral	2,6	3,1	4,1	4,7	4,5	5,3	5,8	5,6	5,8	6,0	6,3
Gás de coqueria	2,6	2,6	2,4	2,3	2,2	1,8	1,9	1,8	1,7	1,8	1,8
Outras	6,4	6,8	6,8	7,4	8,9	12,0	14,1	14,1	12,9	12,4	11,8

10.3.3. Características dos Combustíveis

A seguir será feita uma breve descrição dos principais combustíveis industriais, apresentando alguns dados de consumos para os mais comumente encontrados.

10.3.3.1. Combustíveis sólidos

Madeira

A lenha é um dos combustíveis mais antigos ainda em uso e até hoje larga-

mente utilizado em diversos países, inclusive no Brasil. É composto principalmente de celulose, resinas, água e sais minerais. Sua principal utilização ocorre na sua transformação em carvão vegetal e na geração de energia elétrica (37% do consumo total em 1999), sendo o restante distribuído no setor residencial (30%) e nos setores agropecuários (8%) e industrial (25%), principalmente nas indústrias de cerâmica, alimentos e bebidas e papel e celulose.

A serragem e os cavacos são resíduos das serrarias ou da extração de madeiras. Sua queima requer grelhas especiais. Um outro combustível proveniente da madeira é o nó de pinho, possuindo um poder calorífico superior ao da lenha normal devido ao seu alto teor de resinas.

Carvão Mineral

O carvão, segundo sua formação, pode ser classificado de quatro maneiras distintas: turfa, linhito, antracito e hulha. A turfa é uma substância carbonosa proveniente da carbonização de plantas e pequenas espécies vegetais em zonas pantanosas. Geralmente amorfa, tem baixo poder calorífico e grande porcentagem de umidade. O linhito é um carvão mineral em formação e o seu aspecto ainda é o da madeira no processo de carbonização, daí o seu nome. Tem melhor poder calorífico do que a turfa e o seu uso é restrito. O antracito é um carvão seco, muito friável e se apresenta sob forma de moinha, porém tem bom poder calorífico e seu uso industrial é bem disseminado. Antes do incremento do uso do óleo combustível, o Brasil importou muito antracito para uso, principalmente, em fornos de cerâmica e grelhas automáticas de caldeiras. É usado também em forma de briquetes. A hulha é o carvão mineral propriamente dito. É resultante da carbonização e fossilização de imensas florestas que existiram há milênios, durante a consolidação da crosta terrestre. É ainda muito usado em alguns países como principal combustível industrial, sendo utilizado na fabricação do coque para fins siderúrgicos. No Brasil, as principais jazidas de carvão de pedra estão no sul do país, sendo, entretanto, de baixa qualidade, contendo muitas impurezas e elevado teor de cinzas.

Devido às condições das jazidas e aos métodos de lavra do carvão mineral, este possui elevadas parcelas de material inerte. Após seu beneficiamento, o carvão pode ser encontrado comercialmente como carvão vapor e carvão metalúrgico. O carvão vapor é utilizado principalmente na geração de energia elétrica e na indústria de cimento. O carvão metalúrgico é quase totalmente processado em coqueiras para a produção do coque de carvão mineral.

Coque de Carvão

O coque é um combustível sólido obtido da destilação seca do carvão mineral em retortas ou coqueiras. Tem largo emprego na indústria siderúrgica e de

fundição. No Brasil, a produção de coque limita-se às indústrias siderúrgicas, que o emprega em consumo próprio.

Coque de Petróleo

O coque de petróleo é um produto resultante da quebra de moléculas de derivados de petróleo, sendo mais utilizados os óleos combustíveis residuais. O seu aspecto lembra o coque de carvão. Logo que sai das unidades de coqueificação, o coque de petróleo recebe o nome de coque verde. Ele contém apreciável quantidade de matérias voláteis. Do coque verde, submetido à alta temperatura (1300°C) em fornos especiais, geralmente rotativos, resulta o coque calcinado de petróleo. O coque verde é empregado como combustível e como redutor em altos fornos. Aliado ao coque de carvão siderúrgico, ele melhora o rendimento dos altos fornos.

Carvão Vegetal

O carvão vegetal ou carvão de madeira é obtido artificialmente pela carbonização de madeira em fornos especiais. Seu maior uso industrial ocorre nas siderúrgicas, que são responsáveis por cerca de 82% de seu consumo total. Tem ainda largo emprego no uso doméstico, embora esta forma de utilização esteja em constante declínio há diversos anos.

Bagaço de cana

O bagaço é o resíduo da cana-de-açúcar da qual foi extraído o caldo. É constituído por fibras (principalmente celulose, hemicelulose e lignina), sais minerais, açúcar residual, substâncias solúveis e água. É, praticamente, todo consumido nas próprias usinas de açúcar e álcool para fornecimento de energia, especialmente em ciclos de cogeração.

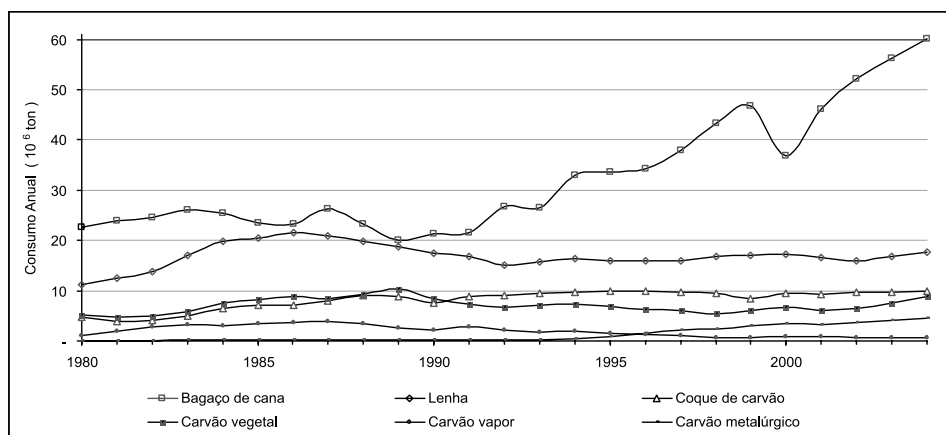


Figura 10.2 – Consumo Industrial de Combustíveis Sólidos

10.3.3.2. Combustíveis líquidos

Óleo de Xisto

Os xistos são formações rochosas que, submetidas à ação do calor, produzem gases que, condensados ou não, são utilizados como combustíveis. Os xistos betuminosos são rochas estratificadas impregnadas com esses óleos. Outros xistos, como os da formação Irati, são secos e devem sofrer um processo de pirólise para fornecer os derivados combustíveis. No Brasil existem grandes jazidas de xisto que se estendem por quilômetros. Os óleos de xisto, devidamente processados, fornecem produtos idênticos aqueles obtidos do petróleo.

Óleo Combustível

O óleo combustível pode ser classificado como óleo combustível destilado, quando é obtido por processos de destilação atmosférica ou a vácuo, ou residual, quando é derivado de processos de craqueamento térmico ou catalítico. É largamente usado na indústria moderna para aquecimento de fornos e caldeiras, principalmente nas indústrias química, de papel e celulose e de alimentos e bebidas. Em 1999 consumiu-se 8056 . 103 m3 de óleo combustível no setor industrial.

Alcatrão

O alcatrão é obtido na destilação da madeira e, principalmente, da hulha. Seu emprego, embora restrito, como combustível resulta do fato de ser produzido em determinadas indústrias como subproduto. As siderúrgicas que produzem seu próprio coque pela destilação do carvão, usam o alcatrão obtido como combustível em seus fornos de aquecimento. Certos tipos de alcatrão (piche) podem ser usados em pavimentação.

10.3.3.3. Combustíveis gasosos

Gás Natural

De origem semelhante a do carvão e a do petróleo, o gás natural originou-se de uma longa decomposição de matéria vegetal e animal, em meio carente de oxigênio e sob condições de elevadas pressão e temperatura. O gás natural é encontrado em rochas porosas, algumas vezes associado ao petróleo, sendo que, neste caso, sua exploração está vinculada a do petróleo. Neste caso, é comum encontrar-se pontos de queima de gás natural em campos não providos de gasodutos.

O gás natural é constituído quase de metano puro, possuindo menores porcentagens de etano e propano, e possui alto poder calorífico. Os principais compo-

nentes do gás natural estão apresentados na Tabela 10.5. Em termos mundiais, o gás natural é um dos combustíveis mais importantes, sobretudo por causa de seu alto poder calorífico, sua baixa densidade e à ausência de impurezas.

A utilização de gás natural tem apresentado sustentada evolução nos últimos anos, especialmente para fins industriais e energéticos.

Tabela 10.5 - Elementos constituintes do Gás Natural (valores médios)

Elemento	% molar	Elemento	% molar
Metano	82,54	Iso-pentano	0,26
Etano	10,36	N-pentano	0,27
Propano	2,96	Hexanos e superiores	0,19
Nitrogênio	1,42	Hélio	Traços
Iso-butano	0,75	Argônio	Traços
N-butano	0,76	H ₂ S	2.000 ppm
Dióxido de Carbono	0,49	RSH	200 ppm

Gás Liquefeito de Petróleo

O GLP é formado por hidrocarbonetos e, dependendo de sua origem e dos processos de tratamento a que foi submetido, pode apresentar composição variável. Estes hidrocarbonetos são obtidos no início da destilação do petróleo, consistindo basicamente de propano e butano. É inodoro e mais pesado que o ar. Seu armazenamento é feito em tanques de alta pressão ou refrigerados. Seu uso está difundido como combustível doméstico e nas indústrias como combustível auxiliar. Para fins de segurança os gases liquefeitos, para uso doméstico, são odorizados para identificar vazamentos.

Gás de Gasogênio

O gás de gasogênio é produzido em aparelhos especiais (gasogênios) pela combustão incompleta do coque ou carvão de madeira, que gera o monóxido de carbono. Também chamado gás pobre, possui baixo poder calorífico.

Gás de Coqueria

Este gás é produzido nas baterias de retortas onde é feita a destilação seca do carvão mineral para a produção do coque siderúrgico. A estas baterias dá-se o nome de coquerias. O gás de coqueria é utilizado nas próprias usinas siderúrgicas para aquecimento das retortas ou outros fornos da usina.

Gás de Alto Forno

O gás de alto forno é produzido no interior dos altos-fornos siderúrgicos por meio de reações entre o oxigênio e o coque, a umidade do ar soprado, o minério de ferro e suas impurezas, o calcário etc. Ele é coletado no topo dos altos fornos, ciclonado, lavado e armazenado em gasômetro, quando não diretamente utilizado. Devido ao alto teor de dióxido de carbono e nitrogênio, o seu poder calorífico é baixo.

10.3.3.4. Combustíveis Coloidais

São misturas de combustíveis líquidos com combustíveis sólidos. O mais empregado é a mistura de óleo combustível residual com finos de carvão de pedra, coque ou carvão vegetal. A maior dificuldade do uso de combustíveis deste tipo é o seu manuseio. Devendo estar sempre em agitação, os encanamentos devem ter quatro vezes o diâmetro do que seria usado para o combustível líquido e o seu bombeamento requer bombas especiais de diafragma. Seu uso está mais condicionado ao aproveitamento de finos de carvão ou coque.

10.4. COMBUSTÃO

Serão apresentados a seguir os principais conceitos relacionados à combustão, assim como alguns dados sobre os principais equipamentos utilizados neste processo.

10.4.1. A Reação de Combustão

A combustão é um processo químico exotérmico composto de dois elementos distintos, o combustível e o comburente. Várias reações são caracterizadas como combustão, como, por exemplo, a combinação de carbono e outros elementos com oxigênio, a combinação do cloro com hidrogênio e a do fósforo com iodo. Entretanto, a reação mais largamente utilizada na indústria é a que utiliza o oxigênio como elemento comburente. Os combustíveis são compostos basicamente de carbono e hidrogênio, contendo ainda pequenas porcentagens de enxofre e outros elementos. O comburente mais utilizado é o ar atmosférico, pelo fato de ser a fonte mais abundante e barata de oxigênio, sendo ainda utilizados o ar atmosférico enriquecido ou mesmo o oxigênio puro. Na maioria das vezes o ar é utilizado sem nenhum tratamento específico, sendo composto principalmente de nitrogênio e oxigênio, contendo parcelas de dióxido de carbono, vapor d'água e gases raros. Em certas regiões pode ainda conter parcelas de óxidos de enxofre e nitrogênio, ozônio e mesmo partículas sólidas. A composição média do ar seco é dada abaixo.

Tabela 10.6 - Composição do ar seco

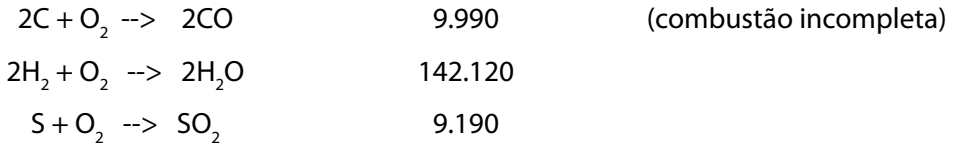
Elemento	Composição média		Valores práticos	
	Em peso	Em volume	Em peso	Em volume
Nitrogênio	75,55	78,13	77	79
Oxigênio	23,10	20,90	23	21
Outros	1,35	0,97	---	---

O processo de combustão inicia-se quando a mistura atinge o ponto de inflamação, ou seja, atinge uma temperatura mínima, característica de cada combustível, na qual a reação de oxidação, que até então progredia lentamente, torna-se consideravelmente mais rápida. O processo de combustão ocorre de maneira diferenciada, dependendo da natureza dos combustíveis. No caso dos combustíveis gasosos, havendo uma mistura adequada de ar e gás, o simples alcance do ponto de inflamação já é suficiente para que ocorra a combustão. No caso dos combustíveis líquidos, inicialmente, sob a ação do calor e do oxigênio, há um desdobramento molecular dos compostos do combustível em frações gasosas mais simples, ocorrendo então a combustão destas frações. Já na combustão dos combustíveis sólidos ocorre, inicialmente, a queima dos produtos voláteis e, em seguida, a formação de compostos gasosos que entram então em combustão. No caso dos combustíveis com baixo teor de voláteis, ocorre a formação de um núcleo de carbono, que se oxida na medida em que o oxigênio se difunde em seu interior.

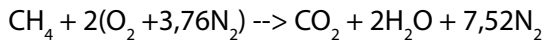
10.4.2. Aspectos Químicos

A combustão pode ser classificada de duas maneiras: completa ou incompleta, dependendo de como se dá a reação entre o carbono do combustível e o oxigênio. Na combustão completa ocorre a reação total do carbono com o oxigênio, gerando como produtos deste processo dióxido de carbono, vapor d'água, óxidos de enxofre e de nitrogênio. Na incompleta, parte do carbono não reage ou reage parcialmente com o oxigênio, produzindo, além dos compostos anteriores, monóxido de carbono e, algumas vezes, fuligem, se houver falta considerável de ar. Em alguns casos, podem ainda ser encontrados traços do combustível nos gases de saída do processo. As principais reações entre os constituintes básicos dos combustíveis e o oxigênio são:

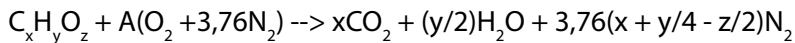
Reação	Calor Liberado (kJ/kg)	
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	32.600	(combustão completa)
$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	10.100	(combustão incompleta)



Uma outra classificação possível é a chamada combustão estequiométrica, que é um caso particular da combustão completa onde a quantidade de ar admitida no processo é exatamente a necessária para que ocorra a reação total do carbono com o oxigênio. A partir da composição do combustível pode-se chegar a esta quantidade mínima teórica de ar necessária a sua combustão através de um balanço químico. Por exemplo, a reação estequiométrica da combustão do metano é:



A parcela $(O_2 + 3,76N_2)$ refere-se à composição média do ar. De maneira genérica, a equação de combustão estequiométrica de um combustível qualquer é dada por:



onde A é chamado de coeficiente estequiométrico, e é dado por:

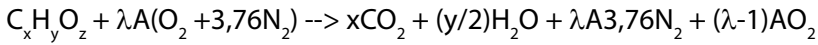
$$A = x + y/4 - z/2$$

A partir da equação genérica acima pode-se deduzir a relação ar/combustível estequiométrica para um determinado combustível. Esta relação pode ser dada em volume ou em peso, como é apresentado em seguida.

$$\text{Em volume} \quad \frac{a}{c} = \frac{A(1 + 3,76)}{1} = 4,76A$$

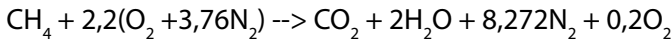
$$\text{Em peso} \quad \frac{a}{c} = \frac{A(32 + 3,76 \cdot 28)}{12x + y + 16z} = \frac{137,28A}{12x + y + 16z}$$

Na prática, sempre se utiliza uma quantidade de excesso de ar para se garantir a combustão completa, devido aos problemas relativos à mistura ar-combustível, que, geralmente, não se dá de maneira perfeita, especialmente com os combustíveis sólidos. A quantidade de excesso de ar deve ser cuidadosamente estudada quando se procura obter o máximo rendimento da combustão. Quando ocorre falta de ar, a combustão se dá de maneira incompleta, não aproveitando todo o potencial do combustível e gerando gases poluentes como o monóxido de carbono. Quando há uma quantidade excessiva de ar, a temperatura de saída dos gases de combustão diminui consideravelmente, prejudicando sua utilização. A equação da combustão com excesso de ar de um combustível genérico é dada por:



onde λ é o coeficiente de excesso de ar.

Utilizando-se esta equação, pode-se chegar aos valores da composição volumétrica dos gases gerados na combustão de um determinado combustível. Para exemplificar esta metodologia será utilizada, como exemplo, a combustão do metano com excesso de ar de 10%. Esta reação é dada por:



A percentagem em volume de cada constituinte do gás de saída da combustão, em relação ao volume total gerado, é dada pela razão entre o número de moles destes constituintes pelo número total de moles presentes na composição do gás gerado. Este valor pode ser calculado em base seca, quando não se considera o vapor presente nos gases, ou em base úmida. Para o exemplo acima, tem-se:

Componente	Porcentagem em volume (base seca)	Porcentagem em volume (base úmida)
CO ₂	8,72	10,56
H ₂ O	17,43	-----
N ₂	72,11	87,33
O ₂	1,74	2,11

De maneira genérica, as percentagens em volume em base seca de dióxido de carbono e oxigênio presentes no gás gerado podem ser dadas conforme a Tabela 10.7.

Tabela 10.7 - Percentagens em volume de CO₂ e O₂ nos gases de combustão

Porcentagem em volume	Base seca	Base úmida
CO ₂	$\frac{100x}{x + 3,76.A.\lambda + (\lambda - 1)A}$	$\frac{100. x}{x + y/2 + 3,76.A.\lambda + (\lambda - 1)A}$
O ₂	$\frac{100. A. (\lambda - 1)}{x + 3,76.A.\lambda + (\lambda - 1)A}$	$\frac{100. A. (\lambda - 1)}{x + y/2 + 3,76.A.\lambda + (\lambda - 1)A}$

É interessante notar como as equações acima se comportam para valores extremos de λ . Quando não existe excesso de ar, ou seja, λ é igual a um, a percentagem de CO₂ é máxima e a de O₂ é nula. Na situação em que o excesso de ar tende a infinito, a percentagem de CO₂ tende a zero e a de O₂ tende a 21%, que é o valor adotado

como a porcentagem média de oxigênio no ar.

Na prática, estas equações são mais aplicadas quando o parâmetro λ é explicitado. Deste modo, a partir da análise dos gases de combustão chega-se ao excesso de ar utilizado na combustão, conforme está apresentado na Tabela 10.8.

Tabela 10.8 - Excesso de ar obtido através da análise dos gases da combustão

Gás analisado	Base seca	Base úmida
CO ₂	$\lambda = \frac{A + x\left(\frac{100}{\%CO_2} - 1\right)}{4,76A}$	$\lambda = \frac{A + x\left(\frac{100}{\%CO_2} - 1\right) - y/2}{4,76A}$
O ₂	$\lambda = \frac{\%O_2 (A - x) - 100A}{A(4,76\%O_2 - 100)}$	$\lambda = \frac{\%O_2 (A - x - y/2) - 100A}{A(4,76\%O_2 - 100)}$

Uma definição decorrente da combustão estequiométrica é a Temperatura Adiabática de Chama, ou seja, a temperatura teórica máxima que se pode alcançar com a queima de um determinado combustível na presença de ar (ou oxigênio), admitindo-se um processo adiabático, ou seja, sem perdas de calor. Esta temperatura é alcançada quando ocorre a combustão estequiométrica, sendo que, conhecendo-se a composição do combustível, pode-se determinar esta temperatura considerando-se que o calor fornecido por ele seja todo absorvido pelos gases da combustão.

10.4.3. Perdas de Calor na Combustão

Mesmo quando ocorre a combustão completa existem perdas de calor nos gases de exaustão, sejam eles produtos secos ou com vapor d'água. Estas perdas podem ou não ser inerentes ao processo de combustão.

As perdas inerentes são basicamente de dois tipos. A primeira deve-se ao vapor d'água nos gases de exaustão. Esta perda corresponde ao calor contido no vapor d'água presente nos gases gerados pela combustão, formado a partir da água contida no combustível e daquela gerada pela queima do hidrogênio. Esta última parcela, que corresponde à diferença entre os poderes caloríficos superior e inferior do combustível, constitui a parte mais significativa, porém, não pode ser reduzida, pois é inerente à composição do combustível. A segunda corresponde à perda nos gases secos da exaustão. Deve-se ao fato de conterem ar em excesso e saírem a uma temperatura maior que a ambiente. Mesmo considerando que estas perdas estão intimamente ligadas ao processo de combustão, algumas providências podem ser tomadas para diminuir seu impacto. Pode-se utilizar o fato dos gases saírem a uma

temperatura maior do que a ambiente para diminuir a umidade do combustível ou para aquecer o ar de combustão ou o próprio combustível.

Entre as perdas que são evitáveis pode-se citar a que deve-se à combustão incompleta do carbono, formando monóxido de carbono ao invés de dióxido, podendo ocorrer também com a presença de carbono não oxidado nos gases de saída, presente na forma de fuligem. Estas perdas evitáveis podem ser combatidas através de várias medidas, como, por exemplo, pelo controle cuidadoso do excesso de ar e pela manutenção regular dos queimadores.

10.4.4. Equipamentos para combustão

Vários equipamentos são utilizados nos processos de combustão, podendo ser utilizados para controle ou para aumentar a sua eficiência. Entre os principais estão os queimadores, dispositivos utilizados tanto para combustíveis gasosos como para líquidos, podendo também ser utilizados para combustíveis sólidos quando pulverizados ou gaseificados. Outros equipamentos importantes na combustão de sólidos são as grelhas e os leitos fluidizados. Neste item, serão apresentadas as principais características destes equipamentos e suas diversas classificações.

Queimadores para gases

A combustão de gases pode ser facilmente controlada. A grande difusão dos combustíveis gasosos, tanto no meio industrial como residencial, fez com que surgissem vários tipos de queimadores. Estes equipamentos podem ser classificados segundo a necessidade ou não de ar secundário do ambiente, ou seja, se ao atingirem o orifício de queima precisam ainda da presença de ar do ambiente para queimar ou não. No primeiro caso podem ainda ser classificados em não aerados e em aerados.

O queimador não aerado caracteriza-se por utilizar, unicamente, o ar do ambiente em torno da chama como fonte de oxigênio. Neste queimador, o gás é liberado por um orifício e, ao encontrar o ar, entra em combustão. Sua eficiência depende fortemente da velocidade com que o gás deixa a canalização.

Já no queimador aerado, também chamado de atmosférico, de baixa pressão ou de tiragem normal, parte do ar é introduzido como ar primário pelo efeito da passagem do gás em um venturi. Assim o gás, ao sair pelo orifício para queima, já está misturado com o ar, sendo o restante necessário fornecido pelo ambiente. A chama produzida por este queimador é limpa, podendo ser utilizada diretamente sobre a superfície a aquecer. É o tipo comumente encontrado em residências.

No caso dos queimadores que não necessitam de ar secundário do ambiente, pode-se classificá-los em três diferentes tipos: ar insuflado, gás de alta pressão e pré-mistura.

O queimador de ar insuflado recebe o ar necessário para a combustão do gás através de um injetor, admitindo o gás a baixa pressão pela depressão causada pelo fluxo de ar. É em geral utilizado para médias e altas potências, sendo o mais utilizado na indústria.

Já no caso do queimador de gás de alta pressão, é o ar que é admitido no queimador pela depressão causada pelo fluxo de gás a alta pressão. É o tipo utilizado em maçaricos, permitindo uma chama dirigida.

No caso do queimador de pré-mistura, o gás e o ar necessário à combustão são previamente misturados e esta mistura chega ao queimador já pronta para a queima. É um sistema mais sofisticado e requer um maior investimento inicial, além de necessitar de manutenção frequente.

Queimadores para líquidos

A queima de combustíveis líquidos pode ser dividida em quatro fases:

- Atomização, quando o combustível é dividido em várias gotículas;
- Vaporização, quando as gotículas são vaporizadas;
- Mistura, quando o combustível vaporizado mistura-se ao comburente;
- Combustão, quando se inicia a reação exotérmica.

A fase mais importante é a de atomização, estágio determinante para que a mistura ar-combustível ocorra de maneira adequada, permitindo uma maior eficiência de combustão. Nesta fase, é admitido o ar primário para facilitar o processo da desagregação do líquido, sendo o restante admitido na fase seguinte.

Os queimadores de líquidos podem ser classificados de diversas maneiras, como, por exemplo, pela sua capacidade, pela produção de energia e pelo combustível utilizado. A classificação mais utilizada é feita em função do método de atomização: mecânica, por fluidos ou mista.

A atomização mecânica pode ser realizada de três maneiras diferentes: a jato pressão, por corpo rotativo e por emulsificador. Nos queimadores com atomização a jato pressão, o combustível é admitido, sob condições de alta pressão e viscosidade controlada, em uma câmara, onde lhe é imprimido um movimento giratório, saindo do bico do queimador na forma de uma película fina. É necessária a presença de um direcionador de ar para promover a mistura ar-combustível e estabilizar a chama. Pode ser do tipo simples, que contém apenas o bico atomizador e trabalha com vazões limitadas, ou do tipo com retorno, que inclui um canal de retorno para o combustível não atomizado e trabalha com um campo maior de vazões. No caso da atomização mecânica por corpo rotativo, o combustível é admitido no interior de uma peça de formato

cônico que gira a alta rotação. A película formada, no seu movimento de escapar do cone, entra em contato com um fluxo de ar admitido pelas bordas, sendo atomizada. Na atomização por emulsificador, o combustível, com uma determinada viscosidade, é misturado com uma certa quantidade de ar ou vapor em um compressor, resultando em uma emulsão. Esta mistura é então conduzida ao bico do queimador, onde ocorre a atomização, utilizando o ar como elemento desagregador.

A atomização por fluido consiste em direcionar o combustível para o bico do queimador, onde este encontra uma corrente de fluido pressurizado (ar ou vapor) e é atomizado. É necessária a existência de um medidor para regular a vazão de combustível. Pode ser de três tipos: baixa pressão, quando o ar é fornecido a pressões entre 0,5 e 3 bar, alta pressão, quando o ar é admitido por uma pressão superior a três bar, e vapor, quando utiliza este fluido ao invés de ar comprimido, possuindo uma operação mais eficiente, porém mais cara.

A atomização mista é a união dos outros dois tipos vistos acima. O combustível passa inicialmente por uma atomização mecânica e, em seguida, encontra um fluxo de fluido que aumenta a atomização.

Queimadores para combustíveis sólidos

Neste tipo de queimador, a mistura ar-combustível deve ser feita de modo que haja, ao redor de todas as partículas, a quantidade de ar necessária à combustão. A pulverização do combustível facilita esta mistura, além de trazer uma série de outras vantagens, como o aumento da eficiência térmica, a possibilidade de trabalhar com menor excesso de ar e a melhor resposta às mudanças de carga do sistema.

Além dos cuidados comuns que devem ser tomados com qualquer tipo de queimador, os queimadores utilizados na combustão de combustíveis sólidos requerem atenção especial, especialmente no que diz respeito à umidade do combustível, que deve ser reduzida ao menor nível possível, e ao projeto das tubulações de condução do combustível, que devem assegurar uma velocidade mínima de transporte para evitar deposições.

Grelhas

A queima em grelhas é uma das mais antigas técnicas de combustão utilizadas, podendo ser aplicada a, praticamente, todos os combustíveis sólidos. Neste sistema, o combustível é colocado sobre um leito rígido onde recebe o ar de combustão. Embora possua um menor rendimento, é o equipamento mais adequado para pequenas instalações, como, por exemplo, caldeiras de pequeno porte.

As grelhas podem ser fixas ou móveis, nas posições plana e inclinada. A grelha fixa é a mais barata, porém, para a remoção de cinzas, é necessária, na maioria

dos casos, a interrupção da alimentação de combustível. Este inconveniente pode praticamente ser eliminado com a utilização de grelhas inclinadas.

Leito fluidizado

Neste equipamento, as partículas sólidas são mantidas em suspensão pela ação de um fluxo ascendente de ar e combustível, injetados na parte inferior da câmara de combustão. O objetivo da fluidização é tornar o leito homogêneo, o que é obtido através da agitação gerada pela grande velocidade do ar dentro da câmara.

As principais vantagens da combustão em leito fluidizado são:

- maior contato entre o ar e o combustível, o que possibilita a utilização de um menor excesso de ar;
- fácil manuseio do combustível, na alimentação e na retirada, devido às características do processo;
- a possibilidade de admitir alto teor de materiais inertes no combustível, podendo trabalhar com até 95%;
- baixo nível de poluição, podendo-se adicionar calcário ou dolomita ao combustível para diminuir a emissão de SO_2 .

A principal desvantagem é o porte do ventilador, que deve ser, relativamente, mais potente do que o que seria utilizado na queima convencional.

10.5. FORNOS E CALDEIRAS

Neste item apresentam-se os principais equipamentos da indústria que utilizam a energia térmica como fonte de energia: os fornos e os geradores de vapor, mais conhecidos como caldeiras. Nos dois casos serão estudados não apenas os modelos mais comuns, os equipamentos à combustão, mas também os tipos existentes de equipamentos elétricos. Serão abordados ainda os principais equipamentos auxiliares e sua utilização.

10.5.1. Fornos

Fornos são equipamentos destinados ao aquecimento de materiais com vários objetivos: cozimento, fusão, calcinação, tratamento térmico, secagem, etc. A característica primordial de um forno, qualquer que seja sua finalidade, é transferir ao material o calor necessário gerado por uma fonte de calor, com o máximo de eficiência, uniformidade e segurança. Para atingir essas características, a construção de um forno requer um cuidadoso estudo de transferência de calor, da circulação do

mesmo e dos meios de minimizar as perdas de chaminé e por radiação, devendo ser considerados quatros pontos básicos:

- O material deve absorver o máximo de calor disponível, devendo a velocidade dos gases ser função da condutibilidade térmica do material, de seu calor específico e da capacidade do forno;
- A câmara de combustão deve ser projetada para gerar a quantidade de calor proporcional à absorção de calor pelo material;
- A qualidade do refratário e o isolamento térmico do forno devem receber atenção especial;
- A transferência de calor da chama para o material deve ser a mais adequada.

10.5.1.1. Fornos à combustão

O forno à combustão é o mais utilizado e sua classificação está baseada no relacionamento entre o combustível, o produto da combustão e o material. A seguir apresentam-se alguns dos diversos tipos de fornos, relacionados segundo sua classificação.

a) Fornos em que o combustível e o material estão na mesma câmara

Medas ou Caieiras

São fornos simples em que o material e o combustível são colocados em uma única câmara, misturados ou em camadas, de modo que, ao se iniciar o processo de combustão, os gases quentes atuam sobre o material. São muito usados para extração de enxofre das argilas ou rochas enxofradas, na calcinação de calcário e no cozimento de artefatos de argila ou aglomerados refratários. Fornos verticais para uso de cimento utilizam este sistema.

Cubilos

São fornos usados para a produção de ferro fundido ou outros materiais, constituídos por um cilindro de ferro revestido internamente por refratário. O ferro gusa, o coque e o calcário são carregados na parte superior, em camadas ou misturados, e, iniciada a combustão, os gases quentes atuam diretamente sobre o metal, fundindo-o, sendo este recolhido na parte inferior (cadinho), de onde é retirado por um canal próprio.

Alto-fornos

O alto-forno é, ao mesmo tempo, um forno e um reator. A carga, constituída de minério de ferro, coque e fluxo (calcário, dolomita, areia, fundente), é introduzida e misturada pela parte superior em duas etapas. A carga descendente vai se aque-

cendo à medida que se aproxima da zona de fogo e ao mesmo tempo em que se dá a redução do minério, liberando o ferro metálico. Este então se funde e é recolhido na parte inferior (cadinho), de onde é retirado por canal próprio. O fluxo, por sua vez, funde e recolhe as impurezas do minério e da cinza do coque e ainda alguns gases de combustão e sobrenada sobre o ferro fundido do cadinho, constituindo a escória, que é retirada por um outro canal próprio para este fim.

b) Fornos em que o combustível e o material estão em câmaras separadas e os gases de combustão não têm contato com o material

Muflas

São câmaras constituídas de materiais especiais que, sendo resistentes e bons condutores de calor, proporcionam maior transferência de calor ao material que se encontra no seu interior. Os gases quentes circulam pela parte externa da câmara e saem pelos dutos da chaminé, sem ter contato com o material. São utilizadas quando se deseja resguardar o material da ação dos gases da combustão como para esmaltação ou recozimento ou ainda para aquecer em atmosferas especiais.

Retortas

São recipientes feitos de ferro fundido ou material refratário como as muflas e cujo objetivo é aquecer o material completamente ao abrigo do ar. São usadas na pirólise da madeira ou carvão de pedra, na fabricação do sulfeto de carbono, na calcinação de substâncias que se requer puras, etc. Sua operação pode ser contínua ou intermitente.

Cadinhos

São recipientes cônicos que têm por finalidade a fusão de metais e suas ligas e, eventualmente, de outras substâncias em pequenas quantidades. Providos ou não de tampa, recebem a ação dos gases quentes, principalmente, na parte inferior. As fornalhas onde os cadinhos são colocados devem ser projetadas para que a distribuição de calor seja uniforme a fim de evitar choques térmicos que inutilizariam o cadinho. A retirada do material é, geralmente, feita pela parte superior, por meio de conchas próprias ou, simplesmente, despejando-o.

c) Fornos em que o combustível e o material estão em câmaras separadas, mas os gases de combustão têm contato com o material

Este tipo de forno pode ser intermitente ou contínuo.

Os fornos intermitentes são usados para cerâmica, calcinação, secagem, processos químicos, etc. A circulação dos gases nestes fornos é feita em função da distribuição do material dentro do forno, e nesta distribuição está a base do maior ou

menor aproveitamento de calor. Arranjos malfeitos, além de reduzirem a eficiência dos fornos com a exaustão dos gases excessivamente quentes, expõe parte do material à temperatura muito alta, enquanto parte sai cru ou mal cozido.

Os fornos contínuos são os mais eficientes, pois o calor é aproveitado ao máximo. Entretanto, só se justificam para fabricação contínua e uniforme. A alteração de seu regime de funcionamento é complicada e este só deve ser modificado após longos períodos. Entre os fornos contínuos mais comuns na indústria estão:

Rotativos

Estes fornos são cilíndricos, interiormente revestidos de refratários, colocados ligeiramente inclinados, sendo a parte mais baixa voltada para a fonte de calor. O material é colocado na parte mais elevada e, pelo movimento rotativo do cilindro, vai se deslocando para a direção da fonte de calor (zona de fogo), onde é completado o cozimento ou a calcinação. A marcha é regulada pela rotação do forno e a temperatura pela intensidade da chama. Os gases quentes da combustão escapam através do próprio forno, de modo que o material descendente vai se aquecendo gradativamente até atingir a temperatura mais alta. Estes fornos são usados para fabricação de cimento, cal, óxidos metálicos, etc.

Túneis

Estes fornos são túneis, como o próprio nome sugere, feitos de material refratário, ao longo dos quais o material a ser cozido ou aquecido circula sobre vagonetes, esteira ou suspenso em cabos. O sentido do deslocamento do material é feito de forma que ele receba o calor dos gases de combustão a partir do momento em que entra no forno. Como a zona de fogo está situada um pouco além do meio do forno, é nesta direção que o material se desloca. Vai assim aquecendo-se pouco a pouco, até receber, ao passar na zona de fogo, o máximo de calor, completando seu aquecimento. Prossegue sua marcha até o outro extremo do túnel, sendo resfriado por um fluxo de ar que se aquece e vai alimentar a combustão. A eficiência destes fornos é bastante elevada e aumenta em função de seu comprimento, sendo a temperatura e o tempo de cozimento regulados através da velocidade da marcha. Estes fornos são muito usados na fabricação de louças, azulejos, refratários, entre outros, e também, com temperaturas moderadas, na secagem de materiais pintados, em litografia, etc.

Circulares

Os fornos circulares ou Hoffman são constituídos de várias câmaras justapostas formando um circuito fechado, contendo dispositivos adequados que permitem fazer passar de um para o outro os gases quentes ou o ar comprimido, ou desviar os gases de qualquer câmara para a chaminé. As fontes de calor estão situadas na abó-

bada de cada câmara e são removíveis. Diversos orifícios existentes nessas abóbadas permitem introduzir no interior da câmara o combustível necessário, de modo a ter dentro da mesma uma distribuição uniforme de calor. Para este fim, a introdução em cada orifício não é simultânea, mas alternada e diversificada, procurando estabelecer um rodízio para que cada orifício receba o combustível periodicamente.

Nestes fornos, os gases quentes da combustão entram em contato com o material e em seguida passam à câmara seguinte, onde preaquecem o material que ali se encontra aguardando o momento de se introduzir combustível nesta outra câmara. Prosseguindo seu caminho, os gases tanto podem ir ter aos dutos da chaminé como podem passar à câmara seguinte, liberando o calor residual que porventura contenha. Uma vez terminada a queima em uma câmara processa-se o resfriamento do material, fazendo passar através dele ar frio. Este ar é assim aquecido e conduzido à câmara seguinte, onde alimenta a combustão. Deste modo há sempre, pelo menos, uma câmara com material em resfriamento, outra em processo de queima e uma terceira em preaquecimento. Assim vão se sucedendo a queima das diversas câmaras, num processo contínuo. Estes fornos são largamente utilizados na indústria cerâmica.

De cuba

Nos fornos de cuba contínuos, a carga é continuamente renovada, entrando pela parte superior e saindo pela inferior, em um circuito inverso ao feito pelos gases quentes. São muito usados na indústria de calcinação e para outros fins. Um exemplo é o forno tanque, de largo uso na indústria do vidro. Trata-se de um tanque onde é colocada a mistura para fabricação de vidro, o qual, na maioria das vezes, é dividido em duas partes separadas por uma divisão por onde se escoo o material fundido. A primeira parte é chamada de zona de fusão, e a segunda de zona de refino. Como as impurezas tendem a sobrenadar a massa fundida, o material que passa para o outro lado é considerado refinado. A zona de fusão é constantemente alimentada pela mistura crua, introduzida através de rampas, de modo a manter o nível do tanque na zona de refino sempre constante, de onde é coletado o material utilizado na fabricação do vidro. É necessário manter sempre a mesma viscosidade da massa para garantir a coleta da quantidade certa, principalmente na fabricação de garrafas tubos e vidro plano. Para isto, mantém-se a temperatura da zona de refino sempre constante.

Um forno semelhante a este é o Siemens-Martin. São cubas onde o ferro ou sucata é colocado juntamente com outros materiais (manganês, cromo, fluxo, etc.) e submetido à fusão. Após a conversão da mistura em aço e a remoção da escória, a cuba é despejada e o aço levado às lingoteiras ou ao lingotamento contínuo.

d) Fornos em que o combustível é constituído pelas próprias impurezas do material ou parcialmente pelo próprio material

Esta classe de fornos engloba dois tipos diferentes: os incineradores (mais simples) e os conversores ou convertedores (mais complexos).

Incineradores

Este tipo de forno aproveita o material combustível dos detritos para sustentar a combustão e para destruí-los. Pode haver, eventualmente, a necessidade de um combustível auxiliar para o início do processo.

Conversores

São fornos destinados à fabricação de aço. Os conversores queimam as próprias impurezas do ferro, como o silício e o carbono, não consumindo combustível e variando de tipo conforme usem ar ou oxigênio puro na combustão. Devido à alta temperatura, o silício e o carbono entram em combustão, sustentando o calor suficiente para fundir a sucata e outros materiais ali adicionados. Como o silício e o carbono estão em quantidades limitadas, a quantidade de calor gerado fica em função do teor destas impurezas. Deste modo, a não ser que combustível adicional seja usado, a quantidade de sucata que o conversor pode receber é limitada pela quantidade de impurezas. Após a queima das impurezas, o aço é despejado nas lingoteiras.

10.5.1.2. Fornos Elétricos

Os fornos elétricos utilizam a energia elétrica como fonte de calor, podendo ser à resistência, a arco voltaico ou de indução. A eficiência térmica dos fornos elétricos é bastante elevada, pois não existem problemas de combustão e perdas de chaminé. Existe uma série de outras vantagens no uso desta tecnologia, como facilidade de operação e limpeza, mas os custos iniciais, de manutenção e, principalmente, de operação têm sido obstáculos para sua maior disseminação.

Os fornos elétricos à resistência são constituídos de refratários, contendo em seu interior resistências distribuídas de tal forma que o aquecimento seja uniforme. Utilizam fios especiais de níquel-cromo e outras ligas que, oferecendo resistência à passagem de corrente, aquecem-se atingindo altas temperaturas. A durabilidade de uma resistência depende da dissipação do calor nela gerado. Desta forma, procura-se distribuí-las de forma que a transferência de calor se faça com facilidade, limitando o comprimento de seus elementos e aumentando seu número. Alguns tipos destes fornos usam a resistência do próprio material que é, assim, aquecido.

Os fornos a arco voltaico são usados na indústria siderúrgica. O aquecimento

é feito através de eletrodos especiais que fazem passar um arco entre si. Os eletrodos vão se desgastando, pois seu material é consumido pelo arco voltaico, porém mecanismos especiais os mantêm na distância necessária para formação do arco. A demanda de energia elétrica nestes fornos é intensa.

Os fornos elétricos de indução utilizam este fenômeno para gerar o calor requerido. De alto custo, são bastante eficientes, atingindo altas temperaturas em pouco tempo. São utilizados largamente em forjarias e nas indústrias siderúrgica e metalúrgica.

10.5.1.3. Equipamentos auxiliares

Para melhorar o rendimento dos fornos é necessário utilizar ao máximo o calor gerado na combustão. Para isto, existem alguns equipamentos que são utilizados para aumentar a eficiência dos fornos e que procuram otimizar sua performance. Entre os principais estão os regeneradores, os recuperadores e os aquecedores de ar.

Regeneradores

Certos materiais exigem altas temperaturas em seu processo, de modo que os gases de combustão, depois de terem transferido parte do seu calor, não estão mais em condições de serem utilizados para este fim. Apesar de ainda conterem considerável quantidade de energia, deixam, desta maneira, o forno a altas temperaturas. Entretanto, pode-se aproveitar esse calor dos gases acumulando-o em materiais susceptíveis de absorvê-lo. Esta é a função dos regeneradores.

Estes regeneradores são pilhas de tijolos altamente resistentes às mudanças térmicas e à ação dos gases, retendo a energia térmica para eles transferida. Quando a temperatura do regenerador atinge um máximo, suspende-se a passagem dos gases quentes, que passam a se dirigir a outro regenerador, e começa-se a passar o ar que vai alimentar a combustão. Aumentando-se a temperatura da entrada do ar, a temperatura resultante do processo de combustão também cresce, aumentando-se assim a temperatura dos gases. Desta maneira, consegue-se obter um maior rendimento térmico.

Recuperadores

Neste equipamento, a corrente de gases quentes e a de ar de combustão são sempre as mesmas, mas em sentido inverso. Uma montagem comum é a que consta de dois dutos concêntricos: em um deles passam os gases quentes e no outro os gases da combustão, sendo a parede divisória entre os dutos feita de um material de alta condutibilidade. São de fácil construção, porém sujeitos aos efeitos corrosivos dos gases.

Aquecedores de ar

Os aquecedores de ar são de construção semelhante aos regeneradores e são utilizados quando não se dispõe de gases quentes mas se requer uma alta temperatura de chama. Podem ser utilizados quaisquer combustíveis para o aquecimento dos tijolos. São utilizados na indústria siderúrgica para o aquecimento do ar destinado aos alto-fornos.

10.5.2. Geradores de Vapor

Geradores de vapor ou caldeiras são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refreradores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo. Neste item serão apresentados seus principais componentes e suas diversas classificações, além de uma introdução aos termos mais utilizados.

10.5.2.1. Principais componentes

A seguir serão relacionados e apresentados, em um esquema ilustrativo (Figura 10.3), os principais componentes de uma caldeira.

- Fornalha (F) - local destinado à queima do combustível, onde o calor é gerado através de reações de combustão. O combustível pode ser sólido, líquido ou gasoso.
- Caldeira (C) - a caldeira propriamente dita corresponde ao vaso fechado sob pressão onde a água transforma-se em vapor saturado.
- Superaquecedor (S) - o superaquecedor eleva a temperatura da água de alimentação. A utilização deste vapor é imprescindível para produção de energia, mas é pouco usado em processo. Por vezes superaquece-se o vapor para não haver condensação do mesmo nas redes de distribuição.
- Economizador (E) - o economizador eleva a temperatura da água de alimentação para obter-se um maior rendimento do gerador de vapor e para se evitar choques térmicos excessivos que possam danificar os materiais. Para isto, utiliza os gases de combustão após a passagem destes pela caldeira e pelo superaquecedor.
- Preaquecedor de ar (P) - trata-se de um trocador de calor cuja finalidade é aquecer o ar que será utilizado na queima do combustível, aproveitando o calor restante dos gases de combustão. Desta maneira, melhora-se a combustão na fornalha mantendo-se a temperatura de regime mais elevada, economizando-se, assim, combustível.
- Chaminé - é o componente que garante a circulação dos gases quentes da com-

bustão através de todos os sistemas pelo efeito de tiragem, que pode ser natural ou forçada através de ventiladores.

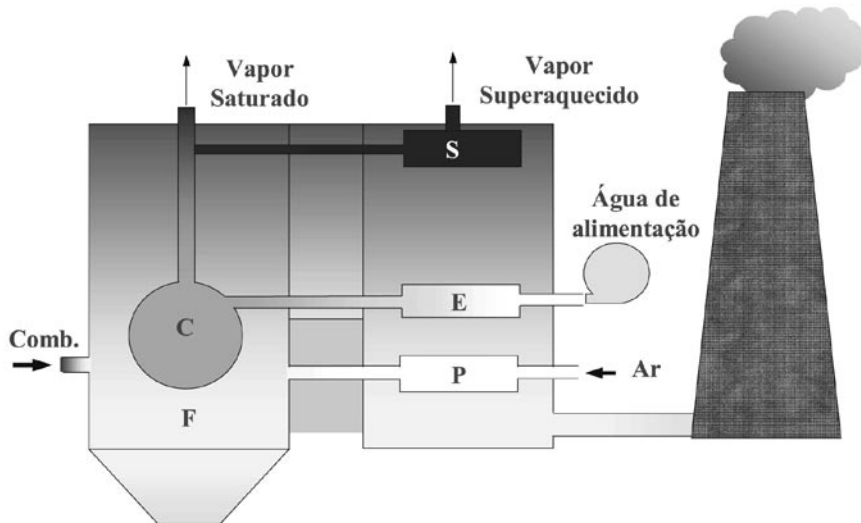


Figura 10.3 - Principais componentes de um gerador de vapor

10.5.2.2. Definições Importantes

Superfície de Aquecimento

É a parte metálica onde, de um lado está em contato com a água ou com a mistura água vapor e, do outro, com os gases quentes e com a energia calorífica radiante. É expressa em m^2 .

Produção Normal de Vapor

É a descarga de vapor capaz de ser gerada pela caldeira em condições de regime de pressão, temperatura e eficiência garantida pelo fabricante.

Câmara de Alimentação

É o espaço compreendido entre o nível máximo e o nível mínimo da água. Numa caldeira é sempre necessário prever estes dois níveis. O máximo para evitar que a linha de saída de vapor não seja inundada pela água, e o mínimo para evitar a formação de superfícies secas, ou seja, superfícies em contato de um lado com os gases de combustão e do outro com vapor d'água, o que pode acarretar a elevação da temperatura da chapa acima do limite tolerável.

Pressão de Trabalho

É a pressão de vapor com a qual opera-se a caldeira.

Pressão de Prova

É a pressão de teste hidrostático a qual é submetida a caldeira.

Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA)

Também chamada de pressão máxima de trabalho permitida (PMTP), é o maior valor de pressão com a qual a caldeira pode operar, sendo compatível com o código de projeto, com a resistência dos materiais utilizados, com as dimensões do equipamento e com seus parâmetros operacionais.

10.5.2.3. Classificação das Caldeiras

As caldeiras podem ser classificadas de diversas maneiras, mas de maneira geral podem ser classificadas em dois grandes grupos: as caldeiras flamotubulares e as aquotubulares.

Caldeiras Flamotubulares

As caldeiras flamotubulares são essencialmente metálicas, tendo o processo de combustão dentro da própria caldeira, no tubo-fornalha. Uma vez queimado o combustível, os gases quentes passam a percorrer os tubos internamente, onde fornecem calor à água até que esta atinja a vaporização. São caldeiras mais simples, tendo sido inicialmente utilizadas em larga escala em navios. São importantes nos processos industriais, onde fornecem calor para aquecimento.

Vantagens:

- Atendem a aumentos instantâneos na demanda de vapor, pois possuem grande volume de água;
- Possui relativamente menor custo;
- Construção fácil, sendo totalmente pré-fabricada, havendo muitos fabricantes;
- Fácil de operar;
- Não exige tratamento de água muito apurado;
- Normalmente necessitam de pouca quantidade de alvenaria;
- Fácil limpeza da fuligem;
- Fácil substituição de tubos.

Desvantagens:

- Partida lenta devido ao grande volume de água;
- Limitada quanto à capacidade de pressão;
- Ocupam muito espaço com relação à área de aquecimento;
- Circulação de água deficiente;
- Grande peso por metro quadrado de superfície de aquecimento;
- Dificuldade de adaptação de equipamentos, tais como superaquecedor, economizador de ar e preaquecedor.

Caldeiras Aquotubulares

Foi somente com o advento das caldeiras aquotubulares que se tornou possível maiores produções de vapor a pressões elevadas e a altas temperaturas. Atualmente elas existem em uma infinidade de tamanhos e formatos. Neste tipo de caldeira, a água circula no interior dos tubos e os gases da combustão circulam por fora. Seu princípio de funcionamento está baseado na circulação natural da água, mantida pela diferença de densidade conseguida por diferença de temperatura entre dois conjuntos de tubos. Evidentemente, com a circulação natural tem-se limitada a pressão de trabalho que podemos alcançar na caldeira. Nesse sentido, se pretendermos alcançar maiores pressões, é necessário o auxílio de uma bomba na circulação da água.

Vantagens:

- Não há limite de pressão;
- Não há limite de capacidade;
- Partida rápida devido ao pequeno volume de água relativo à superfície de aquecimento
- Ocupam pouco espaço com relação à capacidade de produção obtida;
- Apresentam facilidade de adaptação de equipamentos, tais como superaquecedor, economizador de ar e preaquecedor.
- Apresentam a possibilidade de colocação de tubos de água nas paredes da fornalha, que, além de protegerem o refratário, auxiliam na produção de vapor;
- Possuem grande flexibilidade de operação.

Desvantagens:

- Exigem pessoal mais qualificado para sua operação;
- Exigem tratamento de água adequado e rigoroso;

- Tem pouca capacidade no que diz respeito à demanda, devido ao relativamente pequeno volume de água;
- São de construção mais complexa que as flamotubulares;
- Exigem sempre alvenaria;
- São de preço elevado.

Entre as diversas outras classificações pode-se citar:

Quanto à energia empregada para o aquecimento

O tipo mais comumente encontrado é o de caldeiras que queimam combustíveis sólidos (carvão, lenha, cavaco, bagaço, etc.), líquidos (principalmente óleos combustíveis) e gasosos (GLP, embora em desuso).

Caldeiras a eletrodos submersos e a jato de água são os tipos de caldeiras elétricas mais utilizadas, sendo as caldeiras elétricas a resistores particularmente empregadas para a produção de água aquecida ou para baixas quantidades de vapor. A utilização de eletricidade na geração de vapor mostra-se viável sempre que o valor das tarifas de energia elétrica seja interessante.

Existem caldeiras que utilizam como elemento de fornecimento de energia gases quentes resultantes de outros processos que liberam calor. São denominadas caldeiras de recuperação e funcionam à semelhança de trocadores de calor, com a peculiaridade que um dos lados (o da água) muda de fase.

Nas usinas nucleares, os reatores são utilizados basicamente para a produção de energia elétrica, por meio da movimentação de turbinas a vapor. O calor gerado pela fissão do urânio é transmitido à água mediante circuitos fechados, gerando, assim, o vapor, que é usado em circuitos secundários à semelhança de caldeiras e turbinas convencionais, sugerindo, deste modo, a denominação de caldeiras nucleares.

Quanto ao fluido que contém

Além das caldeiras destinadas à vaporização da água, existem as que são usadas para a vaporização do mercúrio, de fluidos térmicos e outros. Ultimamente vêm sendo empregadas caldeiras de fluido térmico, que aquecem, vaporizando ou não, fluidos em circuitos fechados, fornecendo calor a processos, sem transferência de massa.

Quanto à montagem

Normalmente, as caldeiras flamotubulares são pré-montadas ou, como também se denominam, compactas, isto é, saem prontas da fábrica, restando apenas sua montagem no local onde serão operadas.

As caldeiras aquotubulares, porém, além do tipo compacta, podem ser do tipo “montadas em campo” quando seu porte justificar sua construção no local de operação. A caldeira montada em campo pode ainda ser caracterizada conforme a estrutura que a suporta, como caldeira auto-sustentada, quando os próprios tubos e tubulões constituem sua estrutura, como caldeira suspensa, quando há a necessidade de construção de uma estrutura à parte e como caldeiras mistas, que empregam estas duas formas básicas de sustentação.

Quanto à circulação de água

Para o fornecimento homogêneo de calor à água é necessário que haja a circulação desta. Quando a circulação é mantida graças à diferença de densidade entre a água mais quente e a água menos quente, a circulação da água é dita natural. Em contraposição, denominam-se caldeiras de circulação forçada aquelas que possuem sistemas de bombeamento de água.

Quanto ao sistema de tiragem

Após a queima do combustível na fornalha, os gases quentes percorrem o circuito dos gases, desenvolvendo diversas passagens para o melhor aproveitamento do calor, sendo, finalmente, lançados à atmosfera pela chaminé. Para haver esta movimentação, há a necessidade de diferenças de pressão que promovam a retirada dos gases queimados e possibilitem a entrada de nova quantidade de ar e combustível.

Denomina-se tiragem o processo que retira os gases de dentro do gerador de vapor mediante a criação de pressões diferenciais na fornalha. Pode-se, portanto, caracterizar as caldeiras como de tiragem natural, quando esta se estabelece por meio de chaminés, e como caldeiras de tiragem artificial (mecânica ou forçada) quando, para produzir-se este efeito, empregam-se ventiladores ou ejetores.

Como se percebe, existem inúmeros critérios para a classificação das caldeiras, variando não só entre países, mas também de acordo com a abordagem. Do ponto de vista da segurança, a ABNT classifica como “caldeiras de baixa periculosidade” as que possuem dimensões, volume e pressão dentro de determinados limites. Caldeira nova e não-nova, caldeira estacionária e não-estacionária, são outras classificações também de uso corrente, conforme as necessidades de cada caso.

10.5.2.4. Caldeiras elétricas

Caldeiras elétricas são aquelas que utilizam, como fonte de energia para gerar vapor, a energia elétrica.

Caldeiras a resistores

Também chamadas caldeiras elétricas resistivas ou a resistência indireta, são constituídas por um vaso de pressão e por um conjunto de resistências elétricas blindadas inseridas no vaso e que devem ser mantidas imersas na água. A energia elétrica se transforma em calor nos resistores e este é transferido à água por convecção. A circulação de água é obtida mediante um formato e localização correta dos módulos de aquecimento de forma a permitir uma vigorosa e livre circulação da água, aproveitando toda a tendência de convecção natural em benefício do resfriamento das resistências.

Caldeiras a eletrodos

São caracterizadas por possuírem, inseridos no vaso de pressão, eletrodos metálicos isolados eletricamente do mesmo. A corrente elétrica circula através da água a ser vaporizada entre os eletrodos e contra-eletrodos, constituindo a água o elemento condutor e resistivo. Como a potência dissipada se dá por efeito Joule, esta é função da resistividade da água, da superfície dos eletrodos e contra-eletrodos e do nível de tensão. Desta maneira, o tratamento da água torna-se de maior importância, influenciando no isolamento dos eletrodos e na quantidade de vapor a ser gerado. A tensão de alimentação varia muito, estando compreendida entre 220 e 20.000 V.

Este tipo de caldeira pode ainda ser subdividido em caldeira a eletrodo submerso, quando os eletrodos ficam imersos na água, e caldeira a jato d'água, quando a água é vaporizada por bicos injetores e, desta maneira, choca-se com os eletrodos, formando vários caminhos para a passagem da corrente.

10.6. ISOLANTES TÉRMICOS E REFRAATÓRIOS

A redução de perdas pela instalação de isolantes térmicos e colocação de materiais refratários em caldeiras e fornos é uma das maneiras mais práticas de evitar-se o desperdício de energia. A seguir serão apresentados os principais materiais utilizados para estes fins e suas características.

10.6.1. Isolantes Térmicos

A aplicação de isolantes térmicos é simples, utilizando materiais facilmente encontrados no mercado, sendo instalado, normalmente, sem que haja necessidade de interromper-se o processo de fabricação. O isolamento é fornecido de diversas formas, devendo ser especificado de acordo com as condições e o local onde será aplicado. As espessuras devem ser selecionadas para proporcionar máxima eficiência com o menor investimento possível.

10.6.1.1. Características dos isolantes

Para ser considerado um bom isolante térmico, um material deve apresentar uma série de características. Obter um material com todas as características é extremamente difícil, devendo analisar-se em cada caso aquelas que são mais relevantes. As principais características são:

- Baixo coeficiente de condutividade térmica;
- Boa resistência mecânica;
- Baixa massa específica;
- Incombustibilidade ou auto-extinguibilidade;
- Estabilidade química ou física;
- Inércia química;
- Resistência específica ao ambiente de utilização;
- Facilidade de aplicação;
- Resistência ao ataque de roedores, insetos e fungos;
- Baixa higroscopicidade;
- Ausência de odor;
- Economicidade.

Existe ainda a classe dos isolantes refletivos. Estes isolantes dependem da subdivisão correspondente ao espaço de ar e da baixa emissividade térmica de sua superfície para obter uma baixa condutância térmica.

10.6.1.2. Principais tipos de isolantes

A seguir serão apresentados os principais materiais isolantes, ressaltando suas propriedades e características.

Lã de Rocha

A lã de rocha, também chamada de fibra mineral, é obtida a partir da fusão de vários componentes inorgânicos, entre eles: sílica, alumina, magnésio, óxidos metálicos e alcalinos. Apresenta-se na forma de painéis, mantas, calhas ou flocos. Os painéis podem ser fabricados como elemento de suporte, como tela galvanizada e malha hexagonal costurada, sendo produzido, normalmente, assim como as mantas, na medida de 1,2 x 0,6 m e com espessura variando entre 25 e 100 mm. A lã de rocha suporta até 750°C. Os limites de temperatura são rígidos e representam a faixa ótima de atuação de cada produto.

Lã de Vidro

A lã de vidro é encontrada em diversos formatos: painéis, mantas, feltros, tubos bipartidos e cordões, cada qual apresentando características próprias.

Na forma de painéis rígidos e semi-rígidos de formato retangular, é constituída de fibras de vidro entrelaçadas e aglomeradas com resinas sintéticas. São utilizadas para temperaturas na faixa entre -200°C e 450°C .

As mantas são sustentadas por telas metálicas, sendo isentas de resinas aglutinadas, óleo ou outro material orgânico. São utilizadas onde se requer grande eficiência térmica e acústica. A faixa de temperatura de utilização depende da densidade do material: as de densidade de 40 kg/m^3 são especificadas para até 350°C e as de densidade de 60 kg/m^3 são especificadas para até 550°C .

Os feltros são fabricados em rolos e produzidos com fibras de vidro finas, aglomeradas com resinas fenólicas. Na engenharia civil são utilizadas para isolar termicamente forros e coberturas, reduzindo a troca de calor entre o ambiente exterior e interior. Sua temperatura limite de operação é de 150°C .

Os tubos bipartidos são utilizados para isolação térmica de tubulações, sendo especificados para uma faixa de temperatura de -200°C e 450°C . São constituídos por fibras de vidro finas aglomeradas com resina sintética e revestidos com gase industrial.

Os cordões são fabricados em fibras de vidro finas, isentas de resina, sendo aplicados na isolação térmica de tubulações de pequenos diâmetros, retas ou curvas, válvulas, junções, registros, etc.

Silicato de Cálcio

Este isolante refere-se a uma série de materiais conhecidos como hidrossilicato de cálcio. É composto basicamente de cal, sílica e água, sendo os dois tipos mais importantes o tubermorítico e o xenolítico. Suas principais características são: incombustibilidade, resistência mecânica, estabilidade dimensional, leveza, baixa condutividade, resistência à água e estabilidade química, ou seja, não apodrece nem ataca o material com o qual está em contato. É classificado em classe 1 (para temperaturas até 650°C) e classe 2 (para temperaturas até 815°C). Seu uso é muito diversificado, sendo o isolante mais utilizado em diversos tipos de indústria. É encontrado sob a forma de calhas, segmentos e placas.

Sílica Diatomácea

É a denominação usual de um produto usado tanto para isolantes como para refratários, utilizado para temperaturas até 1040°C , e que é similar ao silicato de cálcio.

cio, apresentando as mesmas qualidades. A sílica diatomácea é fabricada na forma de placas, acompanhando também todas as formas convencionais de peças isolantes e refratários, cobrindo todas as aplicações exigíveis em instalações industriais.

Fibras Cerâmicas

Os produtos à base de fibras cerâmicas ocupam, atualmente, uma posição de destaque entre os vários materiais disponíveis no mercado de refratários. Suas propriedades específicas, como: baixa densidade, alta resistência ao choque térmico, refratariedade e baixa condutividade térmica, tornam estes materiais indispensáveis quando se requer isolamentos de alto desempenho e eficiência. Estas fibras são classificadas em diferentes tipos, de acordo com sua composição química, estrutura mineralógica e temperatura de uso contínuo: sílico aluminosas, sílico aluminosas com cromo, fibras à base de zircônia e policristalinas.

As fibras cerâmicas são encontradas em diversas formas, numa ampla variedade de produtos como flocos, mantas, cordas, papel, cimentos, massas, concreto isolante, tecidos, etc. Dependendo de seu tipo, podem trabalhar em temperaturas que variam de 1260°C e 2200°C.

10.6.2. Refratários

Os refratários são materiais, argilosos ou não, resistentes a altas temperaturas, cuja principal aplicação ocorre nos fornos e fornalhas. São utilizados na forma de tijolos ou peças de formatos variáveis. Utiliza-se também, em lugares onde não existe o molde adequado, argamassas plásticas refratárias, que são moldadas no local. Os diversos tipos de refratários são definidos pelos elementos químicos pelos quais são formados. Os principais tipos são:

Refratários Aluminosos

Estes refratários possuem um teor de alumina (Al_2O_3) entre 50% e 80%. São resistentes ao atrito e à corrosão provocada por gases redutores e alguns tipos de escória. São utilizados basicamente na construção de fornos e fornalhas.

Refratários Silicosos

São formados principalmente por sílica (SiO_2), que compõe entre 78% e 92% do material. Possuem grande resistência à ação química.

Refratários de Magnesita

Contêm cerca de 90% de magnesita (MgO). São utilizados em fornos de aço. Possuem alta resistência ao calor e pouca resistência mecânica.

Refratários de Cromita

Possuem alta resistência mecânica, sendo utilizados em lugares de alta abrasão, como em leitos onde há material a alta temperatura em movimento.

Diversos outros materiais são também utilizados como refratários, como, por exemplo, a zirconita e a grafita. Em alguns casos, embora o material possua propriedades adequadas, não pode formar isoladamente um refratário por não aglomerar-se. Nestas situações é utilizada uma substância aglomerante, geralmente a argila refratária, formada aproximadamente por 39,5% de alumina, 46,6% de sílica e 13,9% de água.

10.7. EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência energética de um sistema, de maneira geral, indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal, no qual não existem perdas. Como na indústria perdas significam maiores custos, busca-se constantemente minimizar estes valores, procurando-se trabalhar com equipamentos de alto rendimento e manter a eficiência em um nível máximo. Desta maneira, a determinação do valor da eficiência é de relevante importância. Neste capítulo serão analisados os métodos para o cálculo de eficiência em geradores de vapor e fornos, apresentando a formulação básica envolvida.

10.7.1. Eficiência Térmica de Geradores de Vapor

A eficiência térmica, de maneira genérica, pode ser dada por:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_f} \quad (10.1)$$

onde: η - eficiência térmica

\dot{Q}_u - calor útil (kW)

\dot{Q}_f - calor fornecido pelo combustível (kW)

Considerando que os valores de calor fornecido e útil são diretamente proporcionais à vazão em massa do combustível utilizado, e que a diferença entre estes valores indica a perda de energia sistema, podemos escrever a equação 10.1 como:

$$\eta = \frac{q_u}{q_f} \quad (10.2)$$

ou

$$\eta = 1 - \frac{p}{q_f} \quad (10.3)$$

onde: q_u - energia útil por unidade de combustível (kJ/kg)

q_f - energia fornecida pelo combustível por unidade de combustível (kJ/kg)

p - energia perdida por unidade de combustível (kJ/kg)

O valor de q_f pode ser considerado, de maneira aproximada, igual ao poder calorífico do combustível. Desta maneira, percebe-se que o valor da eficiência varia dependendo de qual valor adota-se para o poder calorífico: o superior ou o inferior.

Partindo destas considerações iniciais, a eficiência térmica em geradores de vapor é calculada através de duas maneiras distintas, os métodos direto e indireto, que serão apresentados a seguir.

10.7.1.1. Método Direto

A eficiência pelo método direto é dada por:

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot q_f} \quad (10.4)$$

onde: η_{MD} - eficiência pelo método direto

\dot{m}_v - vazão mássica de vapor (kg/s)

\dot{m}_c - vazão mássica de combustível (kg/s)

h_v - entalpia do vapor produzido (kJ/kg)

h_a - entalpia da água de entrada (kJ/kg)

Para obter-se estes valores são necessárias diversas medições, como, por exemplo, a vazão, temperatura e pressão do vapor produzido. Quando a medida de algumas destas variáveis for imprecisa ou não puder ser obtida, o valor da eficiência pode ser obtido pelo método indireto.

10.7.1.2. Método Indireto

O método indireto utiliza a análise das perdas do gerador de vapor para obter o valor da eficiência. Também neste método são necessárias várias medidas, que, da

mesma maneira, podem estar associadas a erros. Entretanto, como a maior parcela de perda está relacionada com o fluxo de gases pela chaminé, que pode ser medido de maneira precisa, o valor da eficiência pode ser obtido com razoável precisão.

A perda total de calor é obtida pela soma das perdas por transferência de calor e pelas perdas associadas aos fluxos que deixam a caldeira, com exceção, naturalmente, do fluxo de vapor. Desta maneira, a perda total é composta basicamente pelas seguintes parcelas, que serão vistas a seguir: perdas pela chaminé, perdas por radiação e convecção, perdas por purgas. Existem ainda outras perdas, como, por exemplo, as perdas associadas à temperatura das cinzas e perdas associadas ao combustível não convertido presente nas cinzas, mas que não são tão significativas como as anteriores.

Perdas pela chaminé

As perdas na chaminé podem ser divididas em duas parcelas principais: as perdas associadas aos gases secos formados na combustão e as perdas associadas ao vapor presente na chaminé.

A perda associada aos componentes do gás seco gerado na combustão surge devido ao fato destes gases estarem acima da temperatura ambiente. Pode ser representada por:

$$p_{GS} = (m_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + m_{SO_2} \cdot c_{pSO_2} + m_{O_2} \cdot c_{pO_2} + m_{N_2} \cdot c_{pN_2}) \cdot (T_{CH} - T_{Ref}) \quad (10.5)$$

onde: m_i - massa do componente i formado na combustão (kg/kg de comb.)

c_{pi} - calor específico médio entre as temperaturas T_{CH} e T_{Ref} (kJ/kg°C)

T_{CH} - temperatura dos gases na chaminé (°C)

T_{Ref} - temperatura de referência adotada (°C)

Em cálculos práticos, a equação 10.5 pode ser substituída, sem incorrer em grandes erros, por:

$$p_{GS} = m_{GS} \cdot c_{Par} (T_{CH} - T_{Ref}) \quad (10.6)$$

onde: m_{GS} - vazão mássica dos gases de combustão (kg/kg de comb.)

c_{Par} - calor específico médio do ar entre as temperaturas T_{CH} e T_{Ref} (kJ/kg°C)

Uma maneira alternativa de se calcular esta perda, dada agora em termos percentuais, quando não se conhece o valor da vazão dos gases de combustão, é através da equação a seguir:

$$P_{GS} = 100 \cdot \frac{[28,8 \cdot \lambda \cdot (1-a) \cdot (1+w) \cdot k] c_{Par} (T_{CH} - T_{Amb})}{PC} \quad (\%)$$

onde: λ - coeficiente de excesso de ar

a - fração em massa de umidade presente no combustível (valor entre 0 e 1)

w - fração em massa de umidade presente no ar (valor entre 0 e 1)

T_{CH} - Temperatura dos gases da chaminé (°C)

T_{Amb} - Temperatura ambiente (°C)

PC - Poder calorífico do combustível (kJ/kg °C)

O parâmetro k é função da composição do combustível e é dado por:

$$k = 4,76 \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s-o}{32} \right)$$

onde: c - Fração em massa de Carbono presente no combustível

h - Fração em massa de Hidrogênio presente no combustível

o - Fração em massa de Oxigênio presente no combustível

s - Fração em massa de Enxofre presente no combustível

As perdas associadas à presença de vapor na chaminé podem ser divididas em duas parcelas: uma associada ao fato do vapor d'água estar acima da temperatura ambiente (equação 10.7) e a outra relacionada com o calor latente de vaporização da água (equação 10.8). Podem ser calculadas como:

$$p_{VS} = m_v \cdot c_{Pv} (T_{CH} - T_{Ref}) \quad (10.7)$$

$$p_{VL} = m'_v \cdot h_{lv} \quad (10.8)$$

onde: m_v - vazão mássica total de vapor (kg/kg de comb.)

c_{Pv} - calor específico médio do vapor entre as temperaturas T_{CH} e T_{Ref} (kJ/kg °C)

m'_v - vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no combustível (kg/kg de comb.)

h_{lv} - entalpia de vaporização da água na entalpia de referência (kJ/kg)

Quando se utiliza no cálculo da eficiência o poder calorífico superior, as duas perdas relacionadas anteriormente devem ser consideradas, ou seja, a perda associada à presença de vapor na chaminé é dada pela soma das duas equações anteriores.

Ao se trabalhar com o poder calorífico inferior, apenas a perda referente ao fato do vapor d'água estar acima da temperatura ambiente (equação 10.7) deve ser considerada. Neste caso, não se considera a perda relacionada com o calor latente de vaporização da água (equação 10.8).

A perda associada à presença de vapor na chaminé pode ser obtida também, de maneira aproximada e em termos percentuais, através das equações apresentadas a seguir. A diferença entre elas diz respeito novamente à utilização do poder calorífico superior ou inferior no cálculo da eficiência. Se for considerado o PCS, utiliza-se a equação 10.9, caso contrário, utiliza-se a equação 10.10.

$$P_{H_2O} = 100 \cdot \frac{\left[9 \cdot (1-a) \cdot h + a + 4,29 \cdot w \cdot 32 \cdot \lambda \cdot (1-a) \cdot \frac{k}{4,76} \right] \cdot c_{pv} (T_{CH} - T_{Amb}) + [9 \cdot (1-a) \cdot h + a] h_{lv}}{PCS} (\%) \quad (10.9)$$

$$P_{H_2O} = 100 \cdot \frac{\left[9 \cdot (1-a) \cdot h + a + 4,29 \cdot w \cdot 32 \cdot \lambda \cdot (1-a) \cdot \frac{k}{4,76} \right] \cdot c_{pv} (T_{CH} - T_{Amb})}{PCI} (\%) \quad (10.10)$$

Nestas equações, além dos termos já definidos anteriormente, tem-se que a entalpia de vaporização pode ser estimada por:

$$h_{lv} = 2503,5737 - 2,4404511 \cdot T_{ref}$$

sendo que, neste caso, T_{ref} refere-se à temperatura ambiente.

Também fazem parte da perda pela chaminé as perdas associadas à presença de monóxido de carbono e fuligem nos gases de combustão. Estas perdas, na maioria das vezes, não são significativas, pois os geradores de vapor operam com excesso de ar.

Perdas por radiação e convecção

A determinação das perdas por radiação e convecção é geralmente complexa, devido às diversas e complexas medições necessárias para sua obtenção. De maneira geral, adota-se que estas perdas variam entre 1% a 5% da energia fornecida.

Perdas por purgas

Esta parcela está relacionada com a perda de energia causada pelo fluxo de água retirada na purga, sendo dada por:

$$p_p = m_p \cdot c_{pa} (T_p - T_{Ref}) \quad (10.11)$$

onde: m_p - vazão média de água purgada (kg/kg de comb.)

c_{pa} - calor específico da água no estado líquido (kJ/kg°C)

T_p - temperatura de saturação da água na pressão da caldeira ($^{\circ}\text{C}$)

Após a determinação das perdas, se estas forem obtidas em valores absolutos, a eficiência pelo método indireto pode ser dada por:

$$\eta_{\text{MI}} = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{q_f} \quad (10.12)$$

Esta equação pode também ser apresentada da seguinte forma:

$$\eta_{\text{MI}} = 1 - \left(K + \frac{(\lambda a/c + 1)c_p \cdot (T_{\text{CH}} - T_{\text{Ref}})}{PC} \right) \quad (10.13)$$

onde:

K - representa a somatória de todas as perdas exceto as perdas pela chaminé, correspondendo a menor parcela das perdas.

PC - poder calorífico do combustível, de acordo com a discussão apresentada anteriormente.

Se as perdas forem obtidas em termos percentuais, a eficiência é obtida através da equação apresentada a seguir.

$$\eta_{\text{MI}} = 1 - \sum \text{Perdas} \quad (10.14)$$

10.7.2. Eficiência Térmica de Fornos

Para a eficiência térmica de fornos valem as mesmas definições acerca dos métodos direto e indireto. Para os fornos, as perdas a serem estudadas no método indireto são:

- Perdas por transferência de calor, através do calor absorvido pelas paredes, pelo teto e pela soleira do forno e liberado por radiação e convecção. O valor destas perdas, embora possam ser calculados teoricamente, são estimados em função do tipo e do estado do refratário, correspondendo à cerca de 20% do calor total.
- Perdas por vazamentos na estrutura do forno, que costumam operar com pressão superior à atmosférica, e perdas de calor pela porta, quando esta é aberta. Estas perdas geralmente variam entre 2% e 8% do calor total, dependendo da operação e da manutenção do forno.
- Perdas pelos gases de exaustão, que, como nos geradores de vapor, correspondem a maior parte das perdas.

Além destas perdas, existem outras relacionadas com tipos específicos de fornos. Por exemplo, perdas de calor por radiação pelas superfícies de banhos de sal ou de metal, perdas nos eletrodos de fornos elétricos, perdas para o ambiente em fornos tipo túnel.

10.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil, Ministério de Minas e Energia, 1996, "**Balanco Energético Nacional - Ano Base 2005**", Brasília.

BRUNO, M. A. C. et alli, 1985, "**Conservação de Energia na Indústria de Fertilizantes - Manual de Recomendações**", IPT, São Paulo.

CEMIG, 1990, "**Uso de energia na indústria de açúcar e álcool em Minas Gerais**", Belo Horizonte.

GARCIA, R. E BERNARDES, H. J., 1990, "**Manual de utilização de óleos ultraviscosos**", Petrobrás, Belo Horizonte.

Instituto Brasileiro de Petróleo, 1988, "**Curso de informação sobre combustíveis e combustão**", 11a ed., Rio de Janeiro.

PATRICK, R. S. et alli, 1993, "**Energy Conservation Guidebook**", The Fairmont Press Inc., Lilburn

ROBERTSON, W. S. et alli, 1981, "**Boiler Efficiency and Safety**", The MacMillan Press LTD, London

RUSSOMANO, V. H., 1987, "**Introdução à administração de energia na indústria**", Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SUDENE & CELPE, 1990, "**Estudo do mercado de gás natural na região metropolitana do Recife e municípios de Goiana e Vitória de Santo Antão**", Recife.

TORREIRA, R. P., 1995, "**Geradores de vapor**", Companhia Melhoramentos, São Paulo.

TRINKS, W. e MAWHINNEY, M. H., 1961, "**Industrial Furnaces**", John Wiley & Sons

Capítulo 11

ACIONAMENTOS COM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

11.1. INTRODUÇÃO

Mesmo sendo os motores de indução trifásicos máquinas intrinsecamente eficientes, estes se constituem como um grande potencial de conservação de energia. Tal fenômeno pode ser explicado através de duas razões principais, a saber, a grande quantidade de motores instalados e a aplicação ineficiente dos mesmos. As figuras a seguir apresentam os resultados de uma pesquisa recente sobre a distribuição do consumo de energia elétrica nos principais setores do País (Figura 11.1.a) e como esta energia é usada dentro do setor industrial (Figura 11.1.b). A análise da informações contidas nestas figuras mostra que os motores são responsáveis por cerca de 24% do consumo de toda energia gerada no País.

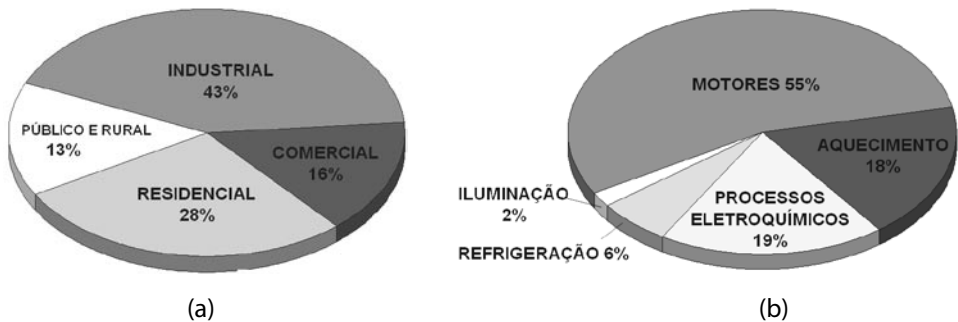


Figura 11.1 – Utilização da energia elétrica no País (a) e no setor industrial (b)

Por outro lado, é muito comum encontrar-se o chamado motor sobredimensionado, ou seja, motores acionando cargas muito inferiores à sua capacidade nominal, acarretando em baixos fatores de potência e rendimentos, contribuindo para a sua aplicação ineficiente. A seguir, serão apresentados alguns tópicos importantes em se tratando de conservação de energia em motores elétricos, desde a avaliação do real potencial de economia, até a análise de investimento na implantação de alguma medida de conservação, sempre à luz de critérios técnicos e econômicos [1,20].

11.2. A MÁQUINA “MOTOR DE INDUÇÃO”

O motor de indução utilizando o campo girante foi inventado por Nikola Tesla durante o período entre 1882 e 1887, porém, a máquina de M.O. Dolivo-Dobrovolsky, desenvolvida entre 1888 e 1890, é a que mais se assemelha aos motores atuais [2]. Desde então, os motores elétricos vêm sofrendo uma série de desenvolvimentos e melhorias. Um bom exemplo é a relação peso-potência que em 1891 era da ordem de 88 kg/kW, passou para 5,7 kg/kW nos dias atuais, como mostrado na Figura 11.2 [1-3]. Esta redução de peso se deve principalmente aos avanços nas técnicas de isolamento e na redução da seção dos condutores, extraindo-se, contudo, uma mesma potência.

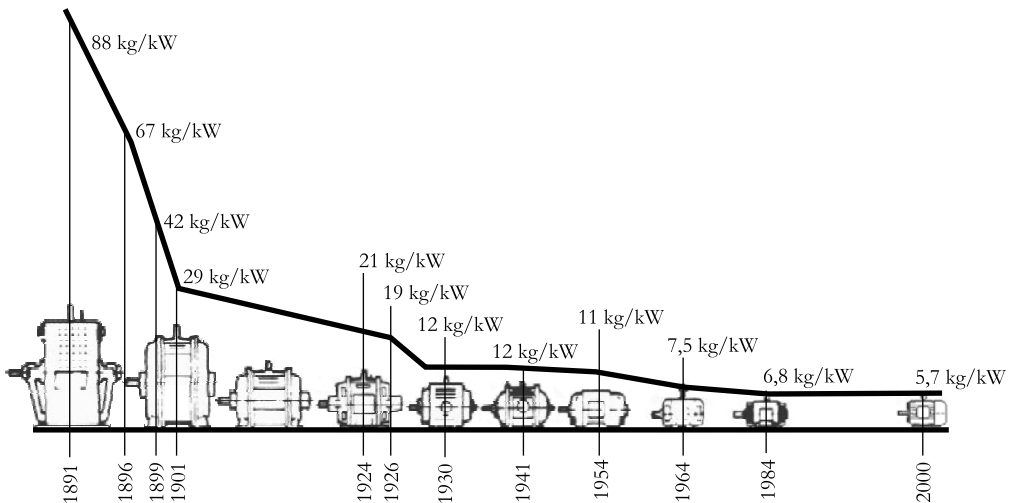


Figura 11.2 - Evolução dos motores elétricos

Basicamente, o motor é um conversor eletromecânico que, baseado em princípios eletromagnéticos, converte energia elétrica em energia mecânica, ou vice-versa, quando passa a se chamar gerador. A Figura 11.3 mostra os principais componentes desta máquina. Naturalmente, esta conversão não é completa devido a uma série de perdas que ocorrem no interior da máquina durante este processo. Tais perdas podem ser agrupadas da seguinte forma: perdas Joule no estator, perdas Joule no rotor, perdas no ferro, perdas por dispersão e perdas por atrito e ventilação.

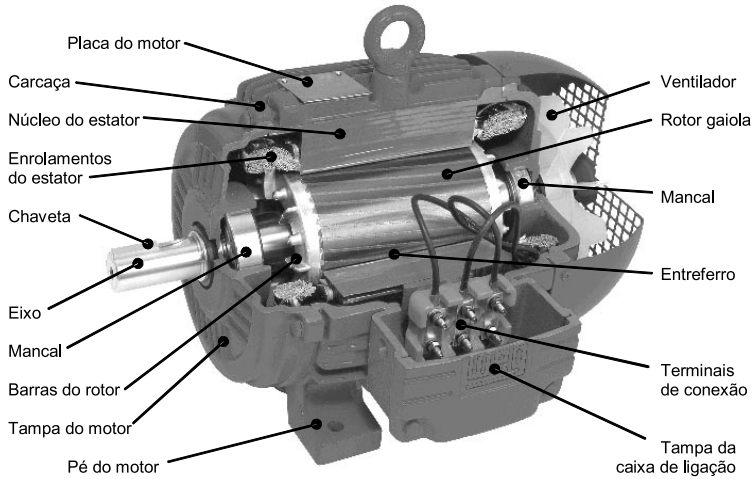


Figura 11.3 – Aspecto construtivo de motores de indução trifásicos

As perdas por efeito Joule no estator (P_{J1}) e no rotor (P_{J2}) resultam da passagem de corrente elétrica pelos seus enrolamentos. As perdas no ferro são constituídas pelas perdas por histerese e Foucault (P_{HF}). A perda por histerese resulta da constante reorientação do campo magnético sobre o pacote de lâminas de aço-silício, já as perdas de Foucault são devidas às correntes induzidas no interior do material magnético, que circulando, produzem perdas na forma de calor. As perdas por histerese e Foucault ocorrem tanto na parte estacionária (maior parcela) como na parte girante do motor. As perdas por atrito e ventilação (P_{AV}) ocorrem devido ao atrito nos rolamentos da máquina e pelo arrasto aerodinâmico provocado pela geometria irregular do rotor e pelo próprio ventilador por vezes instalado na ponta do eixo. As perdas adicionais (P_{AD}), ou por dispersão, incluem todas as perdas não classificadas anteriormente e normalmente crescem com o carregamento da máquina.

A potência elétrica absorvida da rede (P_{el}) menos as perdas (ΣP) resulta na potência mecânica (P_m) disponível no eixo do motor. O rendimento (η) será dado pela relação entre a potência mecânica e a potência elétrica. As equações a seguir explicitam estas afirmações.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}}$$

$$P_{el} = P_m + \Sigma P$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} = \frac{P_m}{P_m + \Sigma P} = \frac{P_{el} - \Sigma P}{P_{el}}$$

Esta última expressão para a determinação do rendimento é mais usada, principalmente pela facilidade de se medir a potência elétrica em relação à potência mecânica.

A distribuição das perdas em um motor varia de acordo com o seu carregamento. A Figura 11.4 apresenta a relação de proporção e distribuição média das perdas em um motor operando em condições nominais.

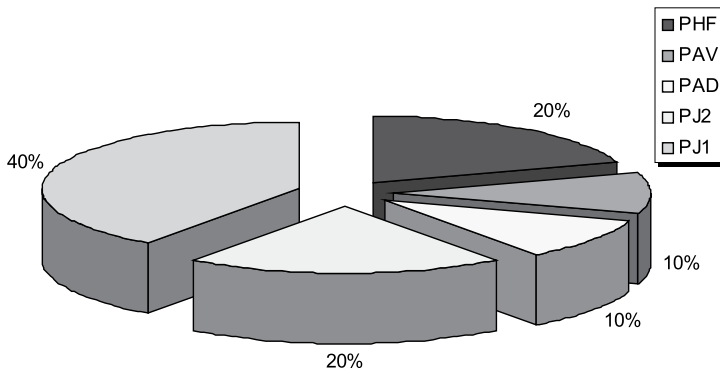


Figura 11.4 – Distribuição das perdas em um motor de indução trifásico

Fora das condições nominais, a distribuição percentual das perdas é totalmente diferente, uma vez que o valor absoluto de cada componente das perdas totais varia significativamente. A Figura 11.5 mostra a evolução típica das perdas de um motor de 15 cv, de projeto padronizado, em função da potência mecânica fornecida em seu eixo. A Figura 11.6 mostra esta distribuição de forma percentual.

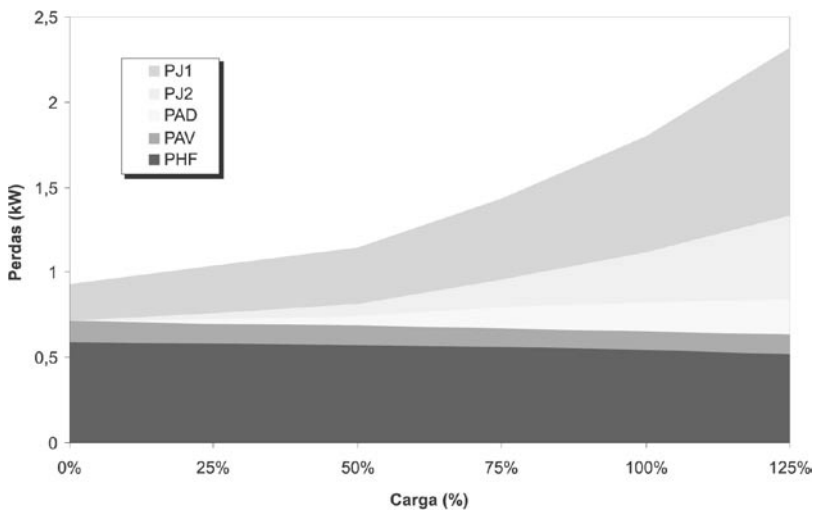


Figura 11.5 – Distribuição das perdas em função da carga

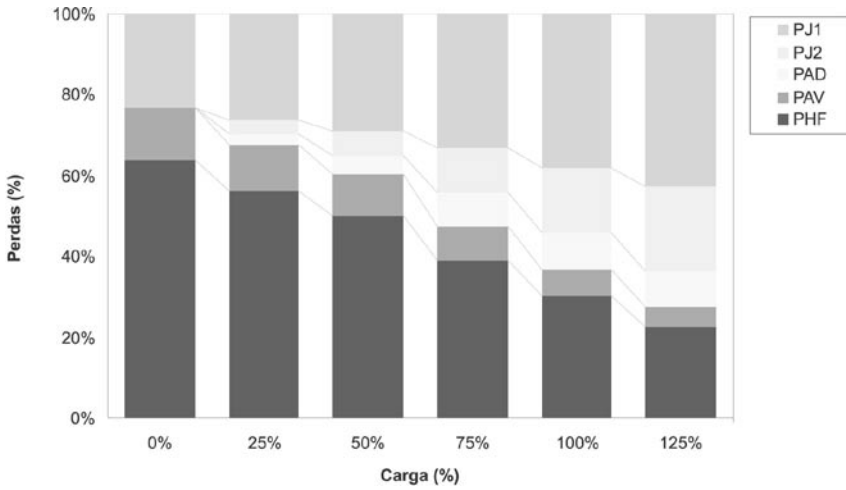


Figura 11.6 – Distribuição percentual das perdas em função da carga

Além da distribuição das perdas variar em função da carga, ela também varia em função da potência do motor. Observe que para potências maiores, percentualmente, as perdas Joule são menores e as perdas por Histerese e Foucault são maiores do que para os motores de menores potências.

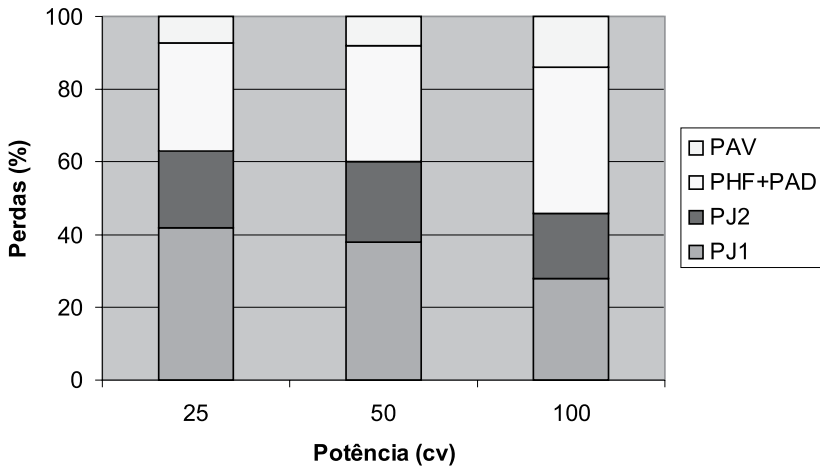


Figura 11.7 – Distribuição percentual das perdas em função da potência do motor

A Figura 11.8 mostra as características típicas de um motor de projeto padronizado em função da potência mecânica. É importante notar o patamar que cobre uma ampla faixa de potência fornecida com rendimentos elevados.

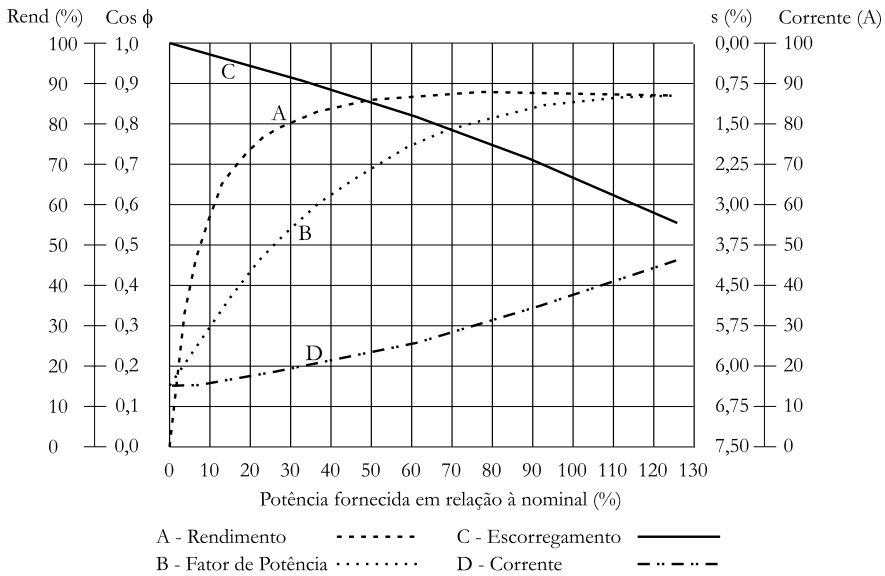


Figura 11.8 - Características típicas de motores de indução trifásicos

11.3. MOTOR DE ALTO RENDIMENTO

Os motores de alto rendimento se apresentam como uma alternativa para a economia de energia em sistemas motrizes, muito embora não sejam as soluções definitivas para todos os problemas energéticos relacionados aos motores de indução, posto que são tão suscetíveis a fatores exógenos (condições do alimentador, método de partida, ambiente de trabalho, etc.) quanto os motores de projeto padronizado.

A principal característica destes motores é a melhoria em pontos vitais onde se concentram a maioria das perdas. Como exemplo, pode-se citar o aumento da quantidade de cobre nos enrolamentos do estator, incluindo o projeto otimizado das ranhuras, e, o superdimensionamento das barras do rotor para diminuir as perdas por efeito Joule; diminuição da intensidade de campo magnético e utilização de chapas magnéticas de boa qualidade para reduzir as perdas no ferro e a corrente de magnetização; emprego de rolamentos adequados e otimização do projeto dos ventiladores para diminuir as perdas por atrito e ventilação; e, finalmente, regularidade do entre-ferro, melhoria no isolamento e tratamento térmico das chapas do estator e do rotor para reduzir as perdas adicionais. Estas medidas podem acarretar uma redução de até 30% das perdas, o que significa uma real economia de energia.

As tabelas a seguir apresentam os rendimentos mínimos preconizados na norma NBR-7094/2000, para motores de projeto padronizado e de alto rendimento.

Tabela 11.1 – Rendimento mínimo para motores de projeto padronizado

Potência Nominal (cv)	Velocidade Síncrona (rpm)			
	3600	1800	1200	900
	Rendimento Nominal (%)			
1,0	70,0	71,0	69,0	65,1
1,5	75,7	72,7	73,2	67,7
2,0	79,0	75,0	73,0	74,7
3,0	78,0	78,0	76,6	78,0
5,0	83,0	83,0	80,0	79,0
7,5	84,0	85,0	82,0	77,0
10,0	83,0	86,0	81,0	81,4
15,0	82,0	85,0	87,1	87,3
20,0	85,0	87,0	87,0	85,0
25,0	87,0	87,0	89,2	88,8
30,0	88,7	89,1	90,2	88,0
40,0	88,8	90,4	90,6	90,0
50,0	89,3	91,1	90,0	90,6
60,0	88,7	90,0	88,0	88,0
75,0	89,0	89,0	90,0	91,0
100,0	90,0	91,9	90,0	92,0
125,0	90,0	91,8	92,0	92,6
150,0	90,0	92,0	91,0	92,0
200,0	90,0	93,0	93,7	94,0
250,0	92,5	93,0	94,0	93,9

Tabela 11.2 – Rendimento mínimo para motores de alto rendimento

Potência Nominal (cv)	Velocidade Síncrona (rpm)			
	3600	1800	1200	900
	Rendimento Nominal (%)			
1,0	80,0	80,0	77,9	74,0
1,5	83,0	81,5	82,5	75,5
2,0	83,2	83,0	82,9	82,5
3,0	85,0	84,9	84,0	83,5
5,0	86,5	87,5	86,7	85,2
7,5	87,5	89,4	88,6	86,9
10,0	87,5	90,0	89,0	87,5
15,0	89,5	91,7	90,2	91,2
20,0	90,2	91,8	91,0	91,0
25,0	91,0	92,5	92,2	92,0
30,0	91,7	92,2	93,0	92,3
40,0	92,0	92,7	93,3	93,0
50,0	91,8	93,0	93,5	93,3
60,0	91,7	93,4	93,6	93,1
75,0	92,4	93,9	93,8	93,7
100,0	93,1	94,3	94,2	94,3
125,0	93,0	94,4	94,5	94,7
150,0	93,0	95,0	94,7	94,9
200,0	94,7	95,0	95,3	95,2
250,0	95,0	95,5	95,2	94,9

Um grande potencial de aplicação de motores de alto rendimento pode ser encontrado no acionamento de pequenas máquinas, muitas vezes colocadas à margem em estudos de conservação energética, já que é comum imaginar que motores com potência inferior a 10 cv são pequenos demais para viabilizar a sua substituição. Porém, deve-se ter sempre em mente que estes motores contam com uma fatia de 85% dos motores instalados, contribuindo com cerca de 25% de todo o consumo industrial, e que a melhoria de eficiência em um motor de pequeno porte pode ser de 4 a 6 pontos percentuais, enquanto que este ganho para grandes motores é da ordem de apenas 2 pontos percentuais.

Cerca de dois milhões e quinhentos mil motores de indução trifásicos foram vendidos no mercado brasileiro nos últimos vinte anos. A Figura 11.9 mostra a distribuição percentual destes motores por faixa de potência. Nota-se que quase 90% dos motores vendidos se encontra entre de 0 e 10 cv, justamente na faixa de potência onde se observam maiores ganhos de rendimento nos motores de projeto eficiente [20].

A escolha de um motor de alto rendimento em relação a um motor de projeto padronizado passa, necessariamente, por uma análise de viabilidade econômica, uma vez que o primeiro custa mais caro do que o último. No cômputo do benefício energético, um importante fator a ser considerado é o número de horas de operação por ano. Neste caso, acionamentos que possuam um fator de utilização reduzido dificilmente apresentarão méritos para o uso de um motor de alto rendimento.

Da mesma forma, um estudo acurado deve ser considerado ao analisar a viabilidade de se empregar motores de alto rendimento ao acionamento de cargas com elevada inércia. O fato é que, dependendo do ciclo de operação da carga, a perda decorrente da freqüente aceleração do motor, que depende do momento de inércia do conjunto e da variação de velocidade, pode ser muito maior do que a perda em operação, inviabilizando a utilização de um motor de alto rendimento.

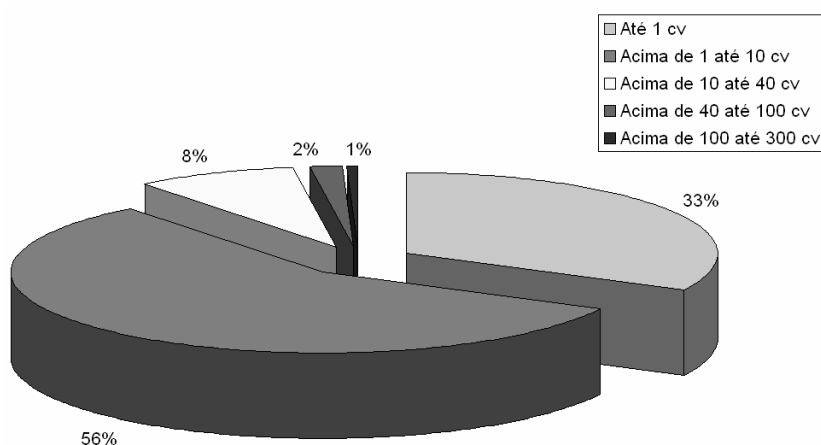


Figura 11.9 – Distribuição de motores vendidos por faixa de potência

Pode-se observar em alguns casos que, dependendo do projeto do motor, a elevação do rendimento tende a reduzir o fator de potência. Isto pode ser parcialmente explicado posto que as perdas contribuem com uma parcela significativa da potência ativa absorvida da rede; logo, a redução das perdas resultaria em uma redução do fator de potência.

Outra questão que dever ser cuidadosamente analisada é a aplicação de mo-

tores de alto rendimento em acionamentos de bombas e ventiladores. A fim de se reduzir perdas, o rotor de um motor de alto rendimento possui resistência de reduzido valor. Isto irá provocar uma menor inclinação da curva de conjugado na região de operação, proporcionando uma maior velocidade de rotação em condições nominais. A Figura 11.10 mostra uma comparação das curvas de conjugado para um motor de alto rendimento (A) e um motor de projeto padronizado (B).

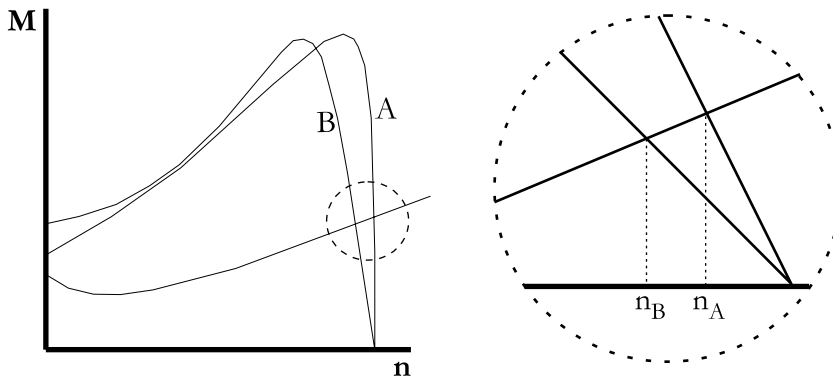


Figura 11.10 - Comparação de curvas de conjugado

Como a vazão em bombas e em ventiladores é proporcional ao quadrado da velocidade, o acionamento irá solicitar uma potência proporcional ao cubo da rotação. Sendo assim, deve-se avaliar o real benefício de um aumento na eficiência face ao aumento da potência requerida. Como consequência do aumento de potência tem-se também uma maior elevação de temperatura de operação com o novo motor, que poderá refletir em uma redução de sua vida útil. As equações a seguir ajudam a quantificar estas características.

$$P = P_c \cdot \left(\frac{n_A}{n_B} \right)^3$$

$$\eta = \eta_A \cdot \left(\frac{n_B}{n_A} \right)^3$$

Nestas equações n é a rotação e P_c é a potência da carga, P e η são a potência e o rendimento nas novas condições de operação, os índices A e B se referem ao motor de alto rendimento e ao motor de projeto padronizado, respectivamente.

Uma solução alternativa para este problema seria, naqueles casos onde o acoplamento fosse feito por correia, uma alteração no diâmetro da polia, a fim de

que a variação da rotação do motor não implicasse em uma variação da rotação da carga. Por outro lado, em determinados tipos de aplicação, este aumento da velocidade em decorrência da aplicação de um motor de alto rendimento pode ser até benéfico, como por exemplo, no acionamento de esteiras, elevadores, ou até mesmo na aplicação em bombas cuja finalidade é o enchimento de um tanque ou reservatório, onde o aumento de vazão resulta em uma redução do tempo de trabalho.

11.3. ANÁLISE DE CARREGAMENTO

A avaliação das reais condições de carregamento dos motores elétricos deve ser feita partindo-se da obtenção das diversas características de operação dos mesmos. Tais características são um conjunto de grandezas elétricas, mecânicas e térmicas que exprimem o comportamento do motor sob várias condições operativas.

Os métodos para a obtenção destas características podem ser classificados em dois grandes grupos, ou seja, os métodos normalizados e os métodos expeditos. Os primeiros, face à complexidade do ferramental necessário e das condições excepcionais para a sua realização, são mais indicados para aplicação em laboratório. Dentre eles podem-se destacar: ensaio através de freio mecânico, ensaio através de dinamômetro, ensaio com máquina calibrada, ensaio de oposição elétrica e mecânica (back-to-back), determinação das perdas separadamente para a sua adição, determinação das perdas totais e o método do diagrama circular com ensaio de frequência reduzida.

Observe-se que, mesmo nos métodos normalizados, algumas discrepâncias podem ocorrer entre os resultados quando aplicados a um mesmo motor, como é mostrado na Figura 11.11, com relação à determinação do rendimento.

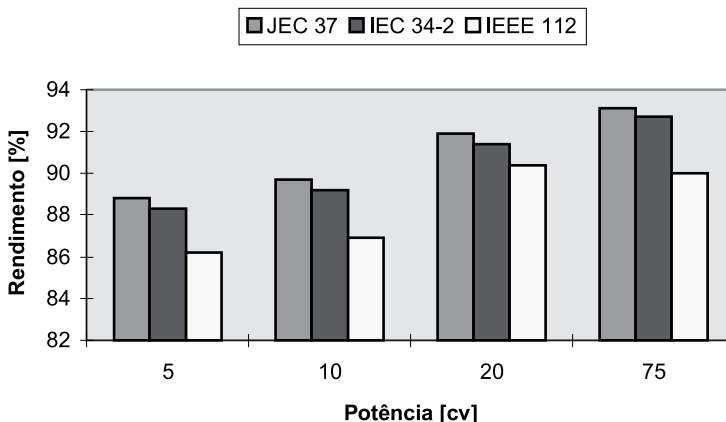


Figura 11.11 - Discrepâncias de resultados sob diferentes normas

O segundo grupo trata dos métodos de fácil execução em campo. Daí virem a ser chamados “metodologias expeditas”. Estes métodos utilizam-se de medidas de corrente, rotação, dados de placa e de catálogos de fabricantes e, quando muito, potência elétrica absorvida da rede. Alguns dos instrumentos usados são mostrados na figura a seguir.

Deve-se ressaltar que na aplicação destas metodologias não se está interessado na determinação exata do rendimento de trabalho dos motores, mas sim, do carregamento, para a observação do seu eventual sobredimensionamento.



(a) Wattímetro alicate (b) Tacômetro óptico estroboscópico (c) Pirômetro de radiação

Figura 11.12 – Instrumentos utilizados em análises expeditas

Com a disponibilidade de amperímetros e wattímetros alicate, além de tacômetros digitais e toda a sorte de sistemas de aquisição de dados, estes métodos encontram grande aplicabilidade em campo. Dentre as metodologias expeditas podem-se destacar as seguintes: diagrama circular inverso, circuito equivalente obtido através de dados de catálogos e o método da linearização.

11.3.1. Dados de Fabricantes

Esta técnica faz uso de dados fornecidos por fabricantes para tecerem-se análises técnicas sobre o carregamento de motores. Naturalmente, o seu uso parte do princípio de que se consideram a representatividade de tais dados.

Seja por exemplo o uso de um motor de projeto padronizado com potência de 100 cv, IV pólos, em 440V, operando com uma corrente de 150 A.

Levando a informação da corrente na curva do fabricante mostrada na Figura 11.13, pode-se obter a potência de trabalho, rendimento, fator de potência e outras informações. Neste caso, tem-se que a potência de trabalho deste motor é de aproximadamente 83%, ou seja, 85 cv, com um rendimento de 93%

Neste caso, percebe-se que se pode empregar um motor mais próximo da potência da carga, por exemplo, um motor de 90 cv de alto rendimento.

Nestas novas condições, ter-se-á um rendimento de 95% e uma corrente de trabalho de 140 A. Além do melhor rendimento, uma corrente menor reduzirá as perdas por efeito Joule nos alimentadores, havendo também uma pequena melhoria no fator de potência.

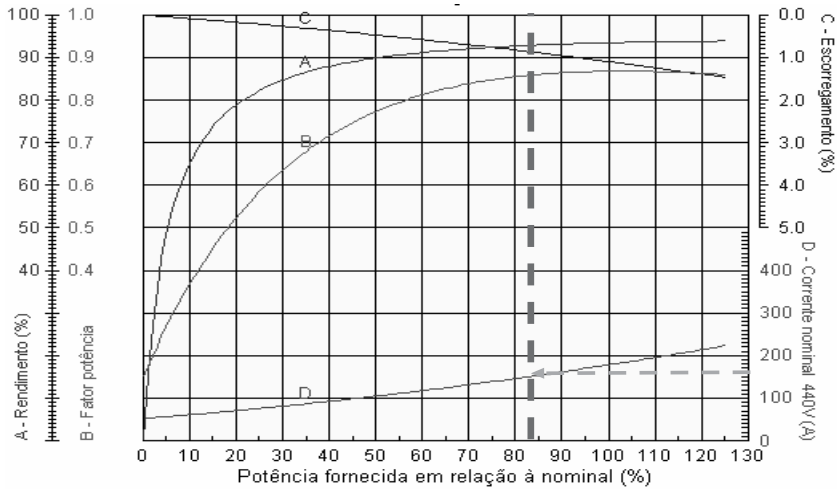


Figura 11.13 – Curvas características do motor de 100 cv

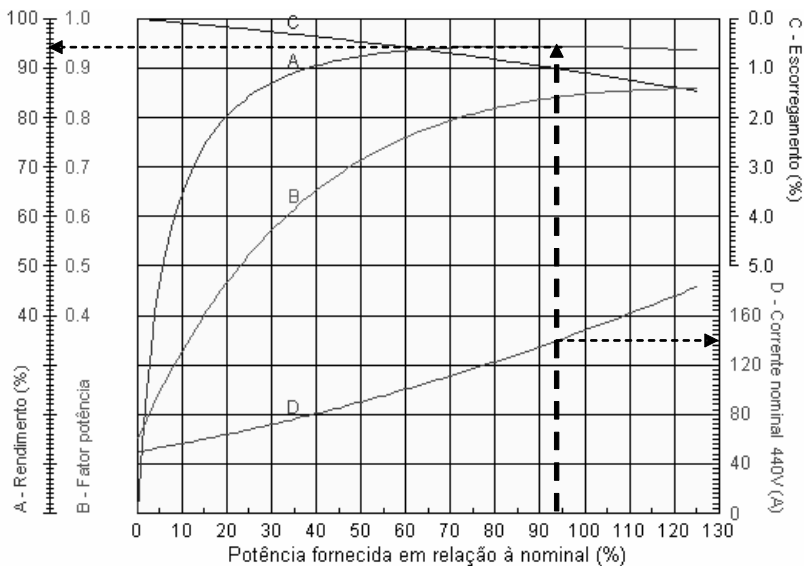


Figura 11.14 – Curvas características do motor de 90 cv

Em aplicativos computacionais, é comum utilizar-se de bancos de dados de fabricantes e obter-se os valores de interesse aplicando-se aproximações polinomiais.

11.3.2. Método da Linearização

A identificação de potenciais de conservação de energia em motores elétricos deve partir da avaliação das reais condições de operação da máquina. O carregamento de um motor pode ser entendido como a potência da carga instalada em relação à potência nominal do motor, ou seja, se a potência da carga for muito inferior à sua potência nominal, pode-se dizer, em um primeiro momento, que o motor se encontra sobredimensionado. Observe-se que o carregamento de um motor bem dimensionado deve se situar acima de 75% da potência nominal.

Uma das técnicas mais simples e confiáveis para tecer estas avaliações é o método da linearização. Este método se baseia no fato de que a curva de conjugado versus rotação, dentro da região de operação do motor, pode ser aproximada por uma reta. A Figura 11.15 ilustra o exposto.

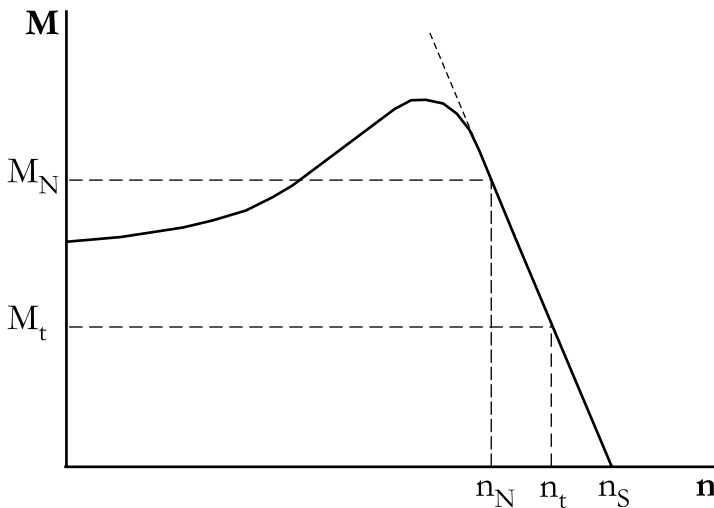


Figura 11.15 - Linearização da curva de conjugado

Nestas condições, a partir da simples medição da rotação de trabalho pode-se obter o conjugado de trabalho, conhecendo-se o conjugado e rotação nominais e a rotação síncrona, da seguinte forma:

$$M_t = M_N \cdot \left(\frac{n_s - n_t}{n_s - n_N} \right)$$

Onde M é o conjugado (cv/rpm) e n é a rotação (rpm), os índices t , N e s correspondem aos pontos de trabalho, nominal e síncrono, respectivamente. O conjugado nominal é dado por:

$$M_N = \frac{P_N}{n_N}$$

A potência de trabalho (P_t) será dada por:

$$P_t = M_t \cdot n_t$$

Um parâmetro de grande interesse para verificar o dimensionamento de um motor é o chamado fator de carregamento (F_c). Este pode ser obtido pela relação entre a potência de trabalho e a potência nominal do motor.

$$F_c = \frac{P_t}{P_N}$$

Se este valor estiver acima de 0,75, isto é, um carregamento superior a 75%, pode-se considerar que o motor está bem dimensionado, haja vista que o mesmo opera em uma região de operação com rendimentos elevados. Se, no entanto, o fator de carregamento estiver abaixo de 75%, não se pode afirmar, categoricamente, que tal motor esteja sobredimensionado, mas sim, que há indícios de que esteja. Isto porque existem situações tais como em ciclos de carga severos ou em partidas de cargas com alta inércia onde o uso de motores sobredimensionados se faz necessário.

Um valor aproximado do rendimento de operação poderá ser obtido com a medida da potência elétrica absorvida pelo motor nestas condições de operação através da seguinte expressão.

$$\eta = \frac{P_t}{P_{el}}$$

De uma maneira prática, considerando o motor de indução uma carga equilibrada, esta potência elétrica poderá ser medida em campo empregando-se um Wattímetro alicate em duas etapas, como mostra a Figura 11.16.

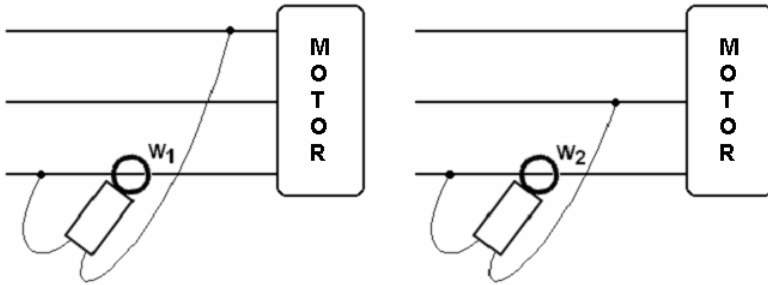


Figura 11.16 – Medida de potência com Wattímetro Alicate (Conexão Aron)

Considerando-se a carga invariante durante o processo de medição, tem-se:

$$P_{el} = W_1 + W_2$$

Onde W1 e W2 são as potências medidas em cada etapa da medição.

Na impossibilidade da medição da rotação, pode-se também estimar o seu valor a partir da linearização da curva corrente versus rotação do motor e medição da corrente de operação, como mostra a Figura 11.17.

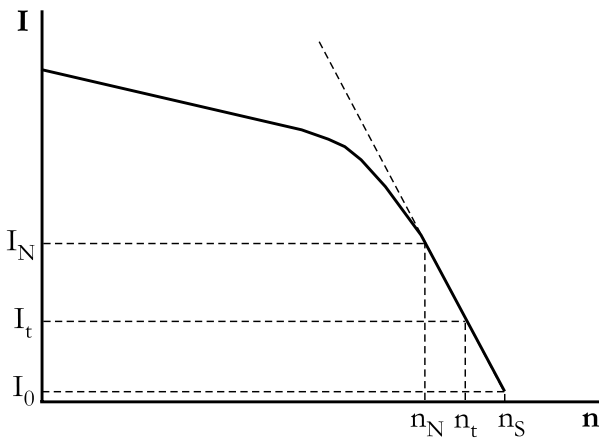


Figura 11.17 - Linearização da curva de corrente

A rotação de trabalho será dada por:

$$n_t = n_s - \left(\frac{I_t - I_0}{I_N - I_0} \right) \cdot (n_s - n_N)$$

Nesta expressão tem-se a corrente nominal (I_N), a corrente em vazio (I_0) e a

corrente de trabalho (I_t) medida através de um amperímetro alicate. Caso o motor seja acoplado através de uma correia, a corrente em vazio poderá prontamente ser medida através da retirada ou simples afrouxe desta correia. Quando não for possível desacoplar o motor da carga, pode-se estimar o valor da corrente em vazio percentual usando a seguinte expressão:

$$I_0/I_N (\%) = A_0 - B_0 \cdot I_N (P_N)$$

Onde P_N é a potência nominal do motor em (cv), A_0 e B_0 são coeficientes que variam com o número de pólos do motor. A Figura 11.17 mostra o levantamento feito a partir de dados de fabricantes e os coeficientes determinados para a estimativa da corrente em vazio percentual em função da potência nominal do motor.

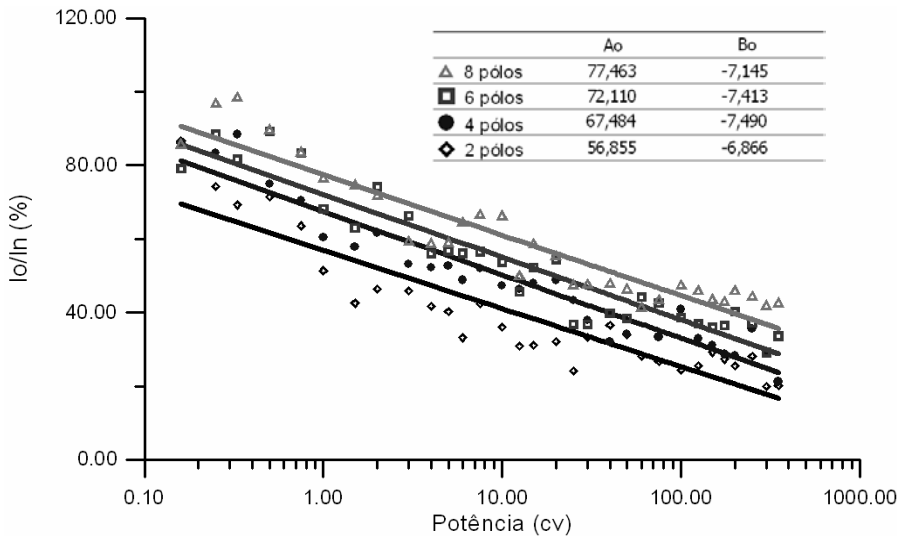


Figura 11.18 - Corrente em vazio percentual

11.3.3. Exemplo de Aplicação

Um motor de indução trifásico tem, em sua placa de identificação, registrada a sua potência, corrente e rotação nominais de 15cv, 22A e 1740rpm, respectivamente. Para a avaliação do seu carregamento não foi possível medir a rotação de trabalho. A corrente de trabalho, contudo, medida no centro de controle de motores é de 18A. Solicita-se verificar o carregamento do motor.

Solução: Como não foi possível medir a rotação de trabalho, o primeiro passo é calculá-la empregando a linearização da curva de corrente. Para um motor com 4 polos, a corrente em vazio percentual é estimada em:

$$I_0(\%) = 67,484 - 7,490 \ln(15) = 47,2\%, \text{ ou seja, } I_0 = 10,4 \text{ (A)}$$

A rotação de trabalho será:

$$n_t = 1800 - (18-10,4) / (22-10,4) \cdot (1800-1740) \cong 1760 \text{ (rpm)}$$

Uma vez conhecida a rotação de trabalho pode-se determinar o conjugado e a potência de trabalho:

$$M_t = 15/1740 \cdot (1800-1760) / (1800-1740) = 10 / 1740 \text{ (cv/rpm)}$$

$$P_t = 1760 \cdot 10 / 1740 = 10,11 \text{ (cv)}$$

$$F_c = 10,11 / 15 = 0,674$$

O fator de carregamento é 67,4% o que sugere um sobredimensionamento do motor analisado. Porém, como exposto anteriormente, existem várias situações impostas pelo ciclo de operação que torna obrigatório o uso de motores com potências superiores à da carga para que estes não se danifiquem. O mesmo acontece em acionamentos que envolvem a partida de cargas com elevada inércia.

Nestes casos deve-se efetuar uma análise térmica, procurando avaliar o perfil de elevação de temperatura do motor durante o ciclo de trabalho, bem como a análise da partida, identificando-se a curva de conjugado da carga, a fim de comparar o tempo de partida com o tempo de rotor bloqueado do motor. Metodologias específicas para estas análises são apresentadas a seguir.

11.4. PARTIDA DE MOTORES

A análise da partida de motores é de fundamental importância para se identificar o seu real sobredimensionamento, assim como para a análise da viabilidade técnica da substituição de um motor sobredimensionado por um de menor potência, verificando se o novo motor é capaz de partir a carga, acelerando-a em um tempo inferior ao de rotor bloqueado.

A segunda lei de Newton preconiza que a aceleração que um corpo adquire é diretamente proporcional à resultante das forças que atuam nele e tem a mesma direção e o sentido desta resultante, e que a velocidade do corpo varia tanto mais rapidamente quanto menor for a sua massa. A famosa expressão matemática da segunda lei de Newton, em sua forma mais geral é:

$$F = m \cdot a$$

Onde F é a força resultante (N), m é a massa (kg) e a a aceleração (m/s^2).

Esta expressão é válida para o movimento retilíneo, a correspondente equação para o movimento angular pode ser obtida substituindo-se a força pelo conjugado acelerante (M), a massa pelo momento de inércia (J) e a aceleração linear pela aceleração angular ($d\omega/dt$), a saber:

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Esta é a expressão utilizada para se estudar a aceleração de motores. Neste caso, o conjugado acelerante é dado pela diferença entre o conjugado do motor e o conjugado da carga. Como é comum trabalhar-se com a velocidade em rotações por minuto (rpm), usa-se a seguinte expressão:

$$M = M_M - M_C = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt}$$

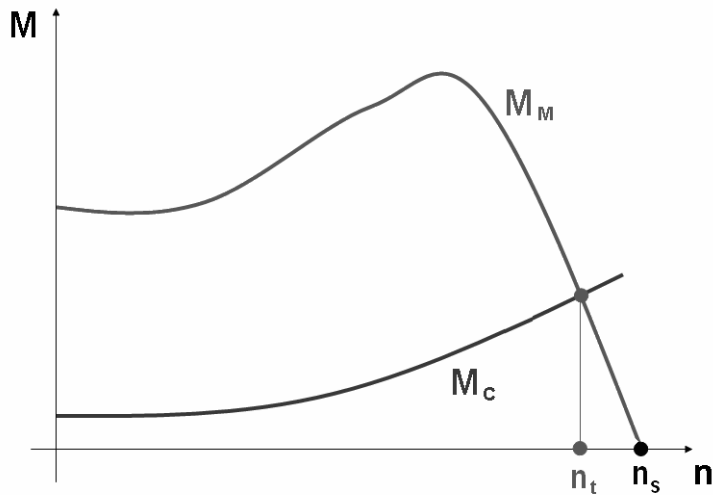


Figura 11.19 – Curvas de conjugado do motor e da carga

O tempo de partida (t_p) que é o tempo necessário para a rotação sair de zero até a rotação de trabalho (n_t) poderá ser obtido re-arranjando a expressão anterior e integrando-a no tempo:

$$t_p = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot J \cdot \int_0^{n_t} \frac{1}{M_M - M_C} \cdot dn = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot J \cdot I$$

Onde I é o valor da integral, em geral, obtido algébrica ou numericamente. A figura a seguir ilustra um procedimento gráfico que permite o cálculo geométrico da integral, dividindo-se, por exemplo, área hachurada em pequenos trapézios.

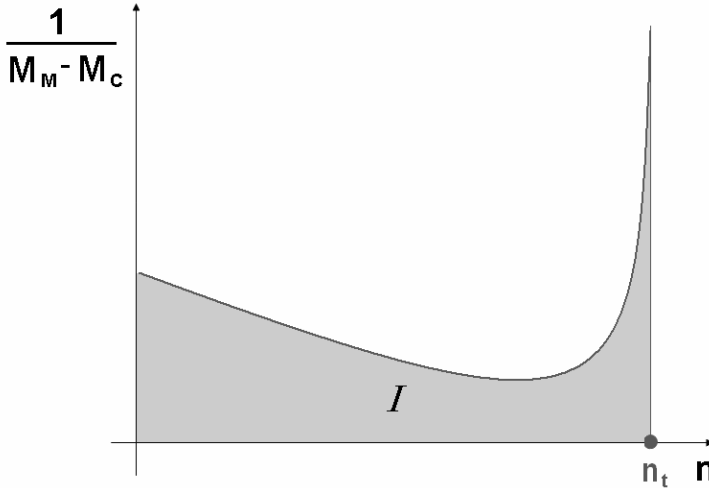


Figura 11.20 – Cálculo da integral

De posse do valor da integral, basta calcular-se o tempo de partida. Se este for menor que o tempo de rotor bloqueado garantido pelo fabricante do motor, tem-se que o motor suporta a partida, caso contrário, deve-se buscar um motor com uma curva de conjugado mais adequada ao acionamento e ao regime de operação imposto pela carga.

11.4.1. Determinação das características da carga

Para calcular-se o tempo de partida de um motor deve-se, necessariamente, determinar-se a curva característica de conjugado e o momento de inércia da carga. O desconhecimento destas características, em verdade, constitui-se em um dos principais motivos de sobredimensionamento de motores através da adoção de fatores de segurança majorados.

Em um ambiente industrial existem praticamente quatro tipos de cargas mecânicas, como apresentadas na Figura 11.21.

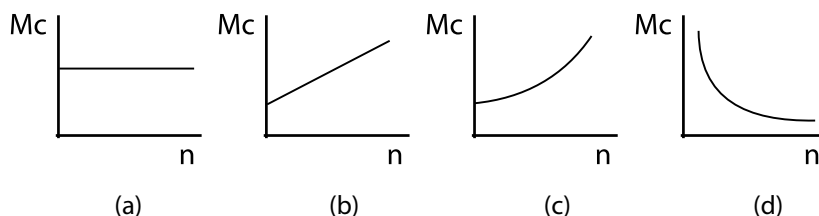


Figura 11.21 – Tipos de cargas mecânicas

Na Figura 11.21.a tem-se uma carga do tipo conjugado constante, dentre as quais pode-se citar pontes rolantes, esteiras, guinchos, elevadores e semelhantes. Na Figura 11.21.b estão as cargas de variação linear, tais como moinhos de rolo, bombas de pistão, plainas e serras. As cargas de variação quadrática são mostradas na Figura 11.21.c, dentro desta classificação se encontram os ventiladores, misturadores, centrífugas, bombas centrífugas, exaustores e compressores. Finalmente, na Figura 11.21.d, tem-se as cargas de variação inversa com a rotação, tais como máquinas operatrizes, frezadoras, mandriladoras e bobinadeiras. Todas estas cargas podem ser representadas pela seguinte equação estática de conjugado:

$$M_c = k_1 + k_2 \cdot n^x$$

onde:

M_c - conjugado da carga (Nm);

n - rotação (rpm);

k_1 e k_2 - constantes a serem determinadas;

x - coeficiente de variação do conjugado em função da rotação.

Dentro da caracterização das cargas mostrada na Figura 11.21, o coeficiente x pode assumir os seguintes valores:

Tabela 11.3 – Coeficientes de variação do conjugado com a rotação

Carga Tipo	x
Constante	0
Linear	1
Quadrática	2
Inversa	-1

A fim de se estimar os parâmetros k_1 , k_2 e J , será utilizada a curva de desaceleração do conjunto motor-carga, cuja característica da carga deseja-se determinar [15]. Esta curva poderá ser obtida desligando-se o motor e registrando-se a variação da velocidade de rotação em função do tempo. Esta medida poderá ser feita utilizando-se um transdutor de rotação, tais como tacogeradores, PMG e outros, e registrada através de oscilógrafos, registradores gráficos ou um sistema de aquisição de dados, utilizando microcomputadores. A Figura 11.22 mostra um exemplo de registro da rotação durante uma desaceleração.

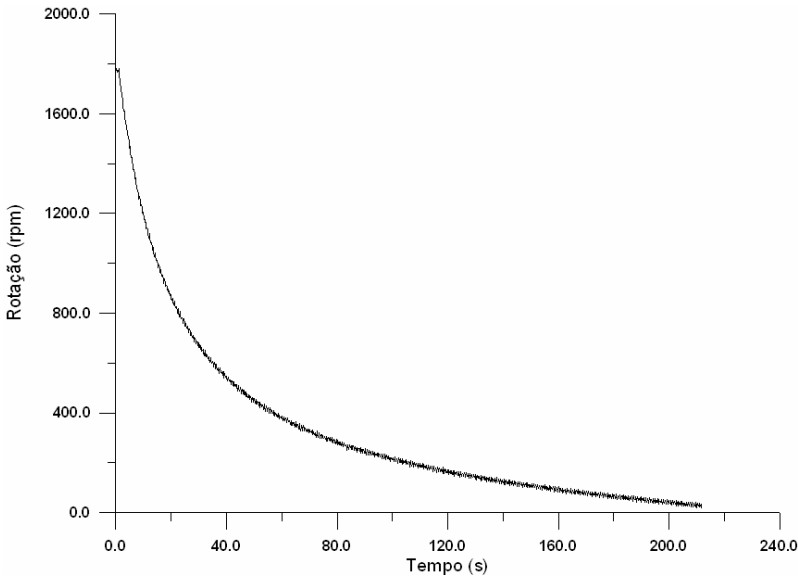


Figura 11.22 - Desaceleração de um conjunto motor-carga

No instante exato do desligamento (t_0), o conjugado do motor é igual a zero. Também pode-se dizer que o conjugado da carga no instante imediatamente posterior (t_0^+) ao desligamento é igual ao conjugado do motor no instante imediatamente anterior (t_0^-) ao desligamento. Este poderá ser calculado utilizando o método da linearização. Sendo assim, tem-se:

$$M_C (t_0^+) = M_M (t_0^-) = M_N \cdot \frac{n_s - n_t (t_0^-)}{n_s - n_N}$$

A derivada pode ser obtida numérica ou geometricamente a partir do registro da rotação, donde se obtém:

$$J = - \frac{M_C (t_0^+)}{\frac{2\pi}{60} \cdot \left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=t_0^+}}$$

Para cada instante de tempo i , tomando-se a curva de desaceleração do conjunto motor carga, a equação pode ser reescrita como:

$$-k_1 - k_2 \cdot n^x = \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt}$$

Procedendo-se à seguinte substituição de variáveis:

$$y = \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} \cong \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad e$$

$$z = n^x$$

tem-se

$$y = -k_1 - k_2 \cdot z$$

que é a equação de uma reta. Logo, conhecendo-se a rotação e sua derivada em diversos pontos da curva de desaceleração, pode-se lançar mão de algoritmos de regressão linear para a determinação dos parâmetros k_1 e k_2 .

11.4.2. Exemplo de Aplicação

Determinar a característica dinâmica da carga de um ventilador centrífugo, acionado por um motor de 200 (cv), 1780 (rpm), cuja curva de rotação durante o desligamento é a apresentada na Figura 11.22. A rotação no instante anterior ao desligamento era 1794 (rpm).

Solução: O primeiro passo para a solução deste problema é identificar o coeficiente x da carga que exprime a relação entre o conjugado e a rotação. Como a citada carga é centrífuga, tem-se que x vale 2.

Utilizando-se do método da linearização, pode-se calcular o conjugado de trabalho correspondente à rotação de trabalho no instante imediatamente anterior ao desligamento, resultando em um valor de 236,75 Nm. Com a derivada da curva de velocidade em função do tempo no instante do desligamento é -108,2 (rpm/s), o momento de inércia pode ser calculado de:

$$J = -236,75 / (2 \cdot 3,14/60) / (-108,2) = 20,89 \text{ Nm}^2$$

A partir da curva de desaceleração pode-se tirar os seguintes pontos e, procedendo-se à citada substituição de variáveis, vem:

Tabela 11.4 – Coeficientes de variação do conjugado com a rotação

t (s)	0	25	50	75	100	125
n (rpm)	1794	750	457	302	210	146
dn/dt (rpm/s)	-41,76	-11,7	-6,2	-3,68	-2,56	-1,64
z/10⁴ (rpm^x)	321,84	56,25	20,88	9,12	4,41	2,13
y (Nm)	91,37	25,64	13,57	8,05	5,60	3,59

Aplicando uma regressão linear aos pontos z e y pode-se obter os parâmetros k_1 e k_2 :

$$k_1 = 8,13 \text{ Nm}$$

$$k_2 = 0,25E-4 \text{ Nm/rpm}^2$$

O que termina por caracterizar a carga.

11.5. ANÁLISE TÉRMICA

A determinação do carregamento de um motor e a garantia de que o mesmo consegue acelerar a carga até a sua rotação de trabalho não são argumentos suficientes para declarar que um motor está ou não sobredimensionado. Além destes fatores, deve-se também verificar a elevação de temperatura no motor durante todo o seu regime de operação, fazendo-se necessário, então, a condução de uma análise térmica.

As condições de aquecimento das partes de um motor que operam em contato com o seu isolamento são diferentes e dependem das condições operativas. O cálculo do aquecimento é complexo, porém, simplificando o problema, sabe-se que a temperatura alcançada pelo isolamento depende das perdas, das condições de carga e da temperatura ambiente.

Considerando o isolamento como um corpo homogêneo, resulta que a elevação de temperatura alcançada ($\Delta\theta$) pelo motor, em relação ao meio ambiente, durante um período de funcionamento t é:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_F \cdot (1 - e^{-t/T_A}) + \theta_0 \cdot e^{-t/T_A}$$

onde:

$\Delta\theta_F$ - elevação de temperatura final, em um tempo suficientemente longo, tal que possa ser considerado como em regime permanente;

T_A - Constante de tempo de aquecimento;

θ_0 - Temperatura inicial.

Por outro lado, as cargas possuem um comportamento variável ao longo do tempo. De forma a permitir a obtenção de valores numéricos para a elevação de temperatura a partir de dados facilmente disponíveis, empregam-se novas simplificações nos cálculos, a saber:

a) Na partida

$$\Delta\theta_F = \left(\frac{I_p}{I_N}\right)^2 \cdot \frac{n_N}{n_p} \cdot \Delta\theta_{LIM}$$

$$T_A = T_{AP} \cong 1,5 \text{ a } 2,5 T_{AN}$$

b) Em carga

$$\Delta\theta_F = \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 \cdot \Delta\theta_{LIM}$$

$$T_A = T_{AN}$$

c) Em vazio

$$\Delta\theta_F = \left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2 \cdot \Delta\theta_{LIM}$$

$$T_A = T_{A0} = T_{AN}$$

d) Na frenagem elétrica

$$\Delta\theta_F = \left(\frac{I_F}{I_N}\right)^2 \cdot \frac{n_N}{n_F} \cdot \Delta\theta_{LIM}$$

$$T_A = T_{AF} = T_{AP}$$

e) Em repouso

$$T_A = T_R \cong 1,5 \text{ a } 3 T_{AN} \quad \text{para motores autoventilados, e}$$

$$T_A = T_R = T_{AN} \quad \text{para motores com ventilação independente.}$$

Nestas expressões tem-se:

n_p - valor médio da velocidade durante a partida;

n_F - valor médio da velocidade durante a frenagem;

I_p - corrente de partida;

I - corrente de operação;

I_0 - corrente em vazio;

I_F - corrente de frenagem;

I_N - corrente nominal.

$\Delta\theta_{LIM}$ é a elevação de temperatura máxima admissível pela classe de isola-

mento, definida por norma, conforme mostra a Tabela 11.5. A Tabela 11.6 apresenta valores de constantes térmicas típicas obtidas junto a fabricantes.

Tabela 11.5 - Máxima elevação de temperatura

Classe de Isolamento	A	E	B	F	H
Elevação da temperatura média admissível - $\Delta\theta_{LIM}$ -, calculada pelo método da resistência (°C)	60	75	80	100	125
Diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a temperatura média (°C)	5	5	10	15	15
Temperatura ambiente (°C)	40	40	40	40	40
Temperatura admissível do ponto mais quente	105	120	130	155	80

Tabela 11.6 - Constantes de térmicas típicas de motores

Carcaça	Rotação (rpm)			
	900	1200	1800	3600
63		10,0	11,0	6,5
71				8,0
80	19,0			9,0
90S		16,5	13,0	9,0
90L			16,0	11,0
100L		17,5	18,0	11,5
112M	25,0	20,5		8,0
132M	32,0	37,0		
132S			24,0	12,0
160L	35,0	40,0	35,0	
160M		32,0		21,5
180L	37,0	33,0		
180M	30,0		33,0	
200L	46,0	35,0	27,0	
200M		43,0	28,0	23,0

11.5.1. Exemplo de Aplicação

Como exemplo, a Figura 11.23 mostra um ciclo de operação de um determinado motor [11]. Neste gráfico pode-se observar a corrente de linha ao longo do tempo. Os picos mostram os momentos de partida do motor que, no caso estudado, era feita por uma chave estrela-triângulo, reduzindo a corrente de partida a um terço de seu valor nominal. Nestas condições a elevação máxima de temperatura era de apenas 16 (°C), Figura 11.24.a, com a qual, à primeira vista, poder-se-ia concluir que o motor estava sobredimensionado. Uma simulação de partida com tensão plena da rede, Figura 11.24.b, no entanto, revela que a elevação de temperatura seria maior que 80 (°C), superando o valor limite da classe de isolamento do motor. Ou seja, um motor estar ou não sobredimensionado depende, inclusive, do método de partida.

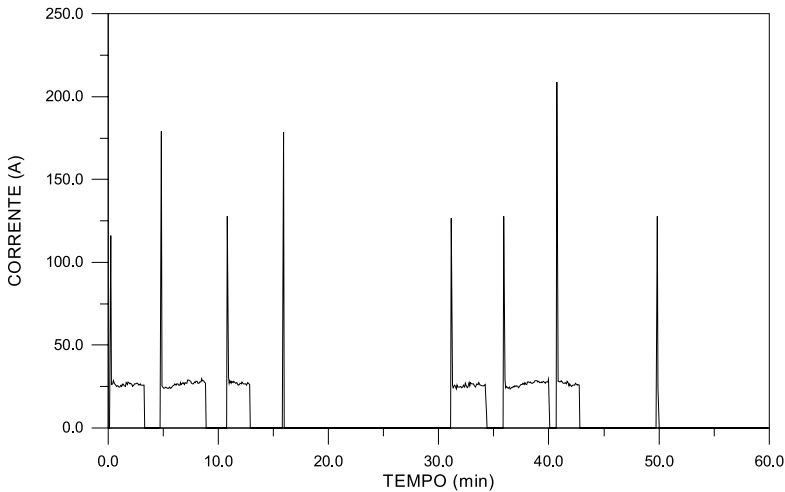


Figura 11.23 - Ciclo de operação de um motor

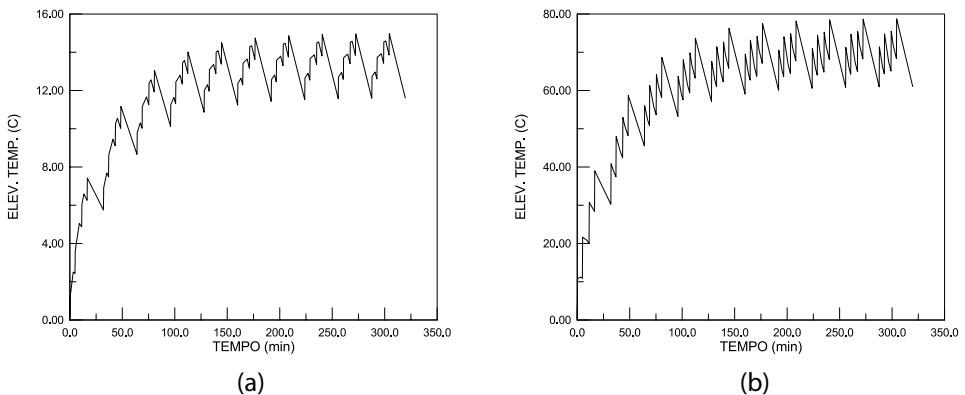


Figura 11.24 - Análise térmica: a) Partida estrela-triângulo; b) Partida direta da rede

11.6. APLICAÇÃO EFICIENTE

Ao se analisar a eficiência do motor de indução, percebe-se que este está inserido em um sistema onde o rendimento total do processo depende de cada uma de suas partes componentes. O uso racional dos recursos existentes, mediante pequenos e médios investimentos, ou mesmo, através da adoção de medidas operativas, pode trazer grandes benefícios e reduzir substancialmente os gastos com energia.

Este é o caso típico do acionamento em bombas ou ventiladores. Atualmente, aproximadamente 63% das aplicações dos motores nas indústrias são destinadas à movimentação de fluidos. Nestes casos, o controle de velocidade dos motores, em substituição aos tradicionais métodos de controle de fluxo, permite otimizar e adequar as condições de operação da bomba ou ventilador para cada valor de vazão desejado, reduzindo perdas, ruídos e desgastes mecânicos. Para tanto, pode-se empregar inversores de frequência e controle de tensão para motores com rotor em gaiola, ou a cascata subsíncrona e variação da resistência rotórica no caso de motores de indução com rotor bobinado. Cuidados devem ser considerados com o nível de harmônicos gerados pelos sistemas de controle de velocidade, devendo-se utilizar filtros especiais nos casos mais críticos.

Os controles aplicados a motores também são muito úteis no sentido de se reduzir o fluxo e conjugado, e conseqüente demanda de potência, quando da operação em baixas cargas. É o caso, por exemplo, do uso de softstarters, que são equipamentos projetados especialmente para suavizar a partida de motores, reduzindo correntes de partida, quedas de tensões, torções bruscas, vibração e outros. Da mesma forma, a partida sequencial de motores com vistas à redução de perdas no sistema alimentador é uma medida de baixo custo que leva a uma solução de compromisso entre os custos de operação e as restrições impostas pelo processo industrial. Motores em acionamentos que possuam sentido único de giro podem ter o seu ventilador de resfriamento redimensionado para reduzir as perdas por atrito e ventilação, proporcionando economia de energia e redução dos níveis de ruído, já que o rendimento de um ventilador nunca é superior a 50% quando o mesmo é projetado para gerar fluxo de ar nos dois sentidos de giro.

Como medidas operativas com custos de implantação praticamente nulos, pode-se citar a verificação das condições dos acoplamentos, ajustando alinhamentos e eliminando possíveis folgas que dão origem a vibrações indesejáveis e elevação de temperatura. O acoplamento direto é o mais eficiente, porém, se mal alinhado, não só produz um aumento nas perdas, como, também, reduz a vida útil dos mancais. Acoplamentos com redutores também são comuns, mas podem introduzir perdas de até 30%. Isto acontece devido, principalmente, ao atrito entre engrenagens, ventilação e pela viscosidade do fluido lubrificante.

Acoplamentos com correia são freqüentemente encontrados na indústria. O rendimento de correias em V pode variar de 90 a 96% [18]. Um dos fatores mais importantes em um sistema acionado por correia é a flexão e a força tensora que agem sobre a mesma, podendo acarretar em ruídos e redução da eficiência na transmissão de potência. Uma tensão muito pequena pode causar escorregamento, perdas e falha prematura da correia. Por outro lado, correias muito esticadas resultam em esforços excessivos nas correias, mancais e eixo.

As correias corrugadas são 1 a 3% mais eficientes que as correias em V, principalmente por serem mais flexíveis. Em geral podem ser usadas em substituição às correias em V, sem que haja a necessidade de se alterar qualquer componente do sistema, constituindo-se, assim, em um grande potencial de conservação de energia.

A correia mais eficiente é a correia dentada. Uma vez que a mesma garante o sincronismo entre as polias acionadas, são flexíveis e evitam o escorregamento, o seu rendimento pode chegar a 98 e 99%. A figura a seguir apresenta alguns modelos de correia normalmente encontradas no mercado.

A limpeza e lubrificação dos mancais são de suma importância. Neste sentido, pôde-se verificar que o acúmulo de poeira e falta de lubrificação podem aumentar as perdas por atrito e ventilação em quase 50%, reduzindo o rendimento de um motor em até dois pontos percentuais. A figura a seguir apresenta os resultados de uma pesquisa onde foi verificada a influência da simples limpeza sobre as perdas por atrito e ventilação (Pav) em motores de indução trifásicos [19]. Nestes resultados, o aumento das perdas se deveu, provavelmente, por um mau alinhamento do rotor em uma eventual montagem do motor.

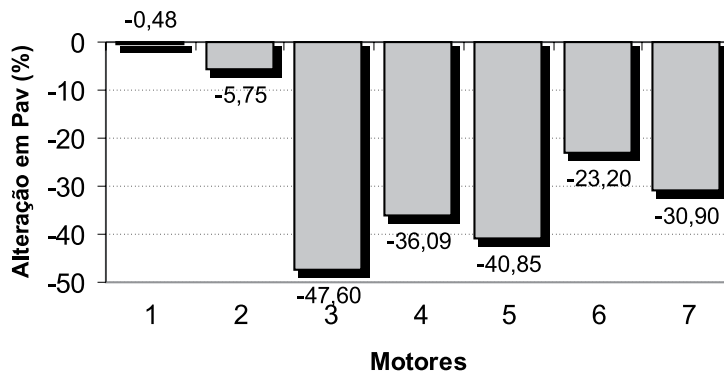


Figura 11.25 - Efeito da limpeza e lubrificação sobre as perdas por atrito e ventilação

Também com custo praticamente nulo de implantação, em processos onde motores permanecem em vazio por um intervalo de tempo, pode-se fazer um estudo verificando o que é mais vantajoso, ou manter o motor em vazio ou desligá-lo neste período, como ilustra o exemplo da Figura 11.26.

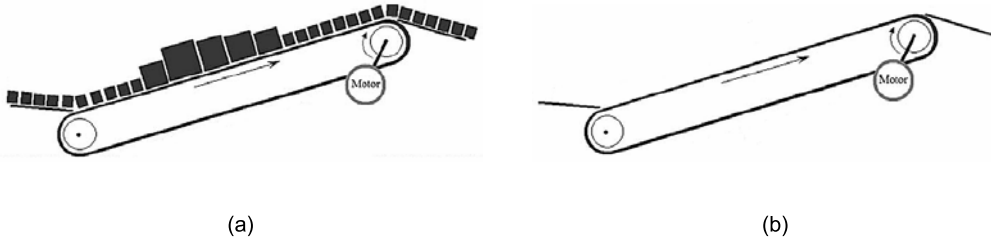


Figura 11.26 - Operação temporária de esteira em vazio

A resposta é simples, se o consumo na partida for menor do que o consumo do motor durante o período ocioso, deve-se desligar o motor. Como regra prática pode-se desligar o motor quando o tempo em vazio for dez vezes maior do que o tempo de partida ou, mais tecnicamente, quando for verificada a seguinte expressão:

$$T_v > 4 \cdot k \cdot T_p$$

Nesta expressão k é um fator que depende da categoria do motor e vale 2,50, 2,00 e 1,35 para as categorias N, H e D, respectivamente. T_p e T_v são o tempo de partida e o tempo em vazio, ambos em segundos. Ao implementar esta medida de conservação deve-se avaliar os efeitos de eventuais partidas subseqüentes sobre o aquecimento motor.

Uma alternativa ao desligamento, para condições de operação com baixo carregamento, consiste na mudança da conexão dos enrolamentos dos motores. Os motores de baixa tensão normalmente têm seus enrolamentos conectados em triângulo, com a possibilidade de mudança para a conexão estrela, principalmente para atender restrições de queda de tensão durante a sua partida. No entanto, observa-se que em condições específicas de baixo carregamento, pode-se auferir ganhos energéticos e aumento do rendimento de operação, chaveando-se a configuração de conexão dos enrolamentos de triângulo para estrela [21].

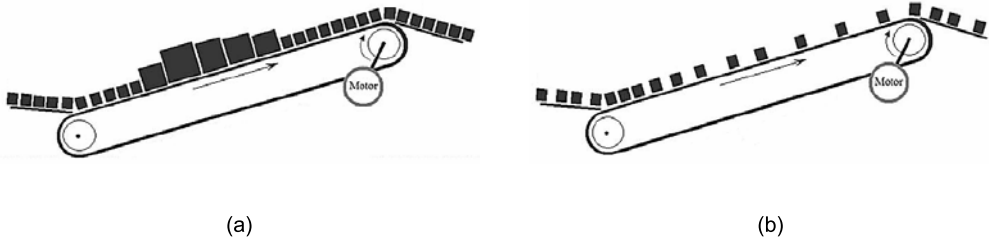


Figura 11.27 - Operação temporária de esteira em baixo carregamento

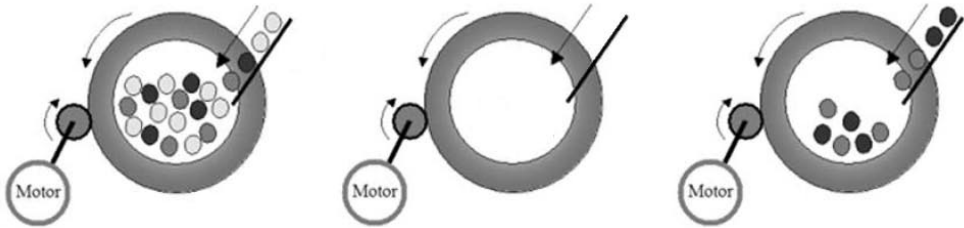


Figura 11.28 – Ciclos de operação de um misturador

Um levantamento experimental realizado em [21] mostra que, em geral, para um fator de carregamento menor do que 45%, a conexão estrela é energeticamente mais vantajosa do que a conexão triângulo.

11.7. FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DE MOTORES

O comportamento da tensão aplicada aos terminais do motor também é um fator importante. Se o motor opera com uma tensão inferior à nominal, a corrente absorvida aumentará para manter o torque necessário, isto irá causar uma elevação das perdas por efeito Joule no estator e no rotor, provocando elevação de temperatura. Se a tensão aplicada é superior à nominal, a corrente de magnetização irá aumentar com, no mínimo, uma proporção quadrática, podendo ocorrer a saturação da máquina. O rendimento e o fator de potência diminuirão porquanto as perdas no ferro aumentarão. A Tabela 11.7 fornece mais dados a esse respeito. [12]

Tabela 11.7 - Desempenho de motores de indução em função da tensão aplicada

Característica	Variação da tensão nominal	
	110%	90%
Torque - De partida, máximo e de operação.	Aumenta 21%	Diminui 19%
Rotação - Síncrona - Plena carga - Escorregamento	Não se altera Aumenta 1% Diminui 17%	Não se altera Diminui 1,5% Aumenta 23%
Rendimento - Plena carga - ¾ de carga - ½ carga	Aumenta 0,5 a 1 ponto Pequena mudança Diminui 1 a 2 pontos	Decresce 2 pontos Pequena mudança Aumenta 1 a 2 pontos
Fator de potência - Plena carga - ¾ de carga - ½ carga	Diminui 3 pontos Diminui 4 pontos Diminui 5 a 6 pontos	Aumenta 1 ponto Aumenta 2 a 3 pontos Aumenta 4 a 5 pontos
Corrente - Partida - Plena carga	Aumenta 10 a 12% Diminui 7%	Diminui 10 a 12% Aumenta 11%
Temperatura	Diminui 3 a 4 °C	Aumenta 6 a 7 °C
Capacidade de sobrecarga	Aumenta 21%	Diminui 19%
Ruído de origem magnética	Pequeno aumento	Pequena redução

A presença de harmônicos e desbalanços de tensão, mesmo que pequenos, provocam grandes desequilíbrios de corrente, que também dependem do carregamento do motor. Na falta de informações adicionais, pode-se dizer que o desequilíbrio de corrente é da ordem de I_p/I_N vezes o desbalanço de tensão. A figura a seguir ilustra o desequilíbrio de corrente em função do carregamento e do desbalanço de tensão. [18]

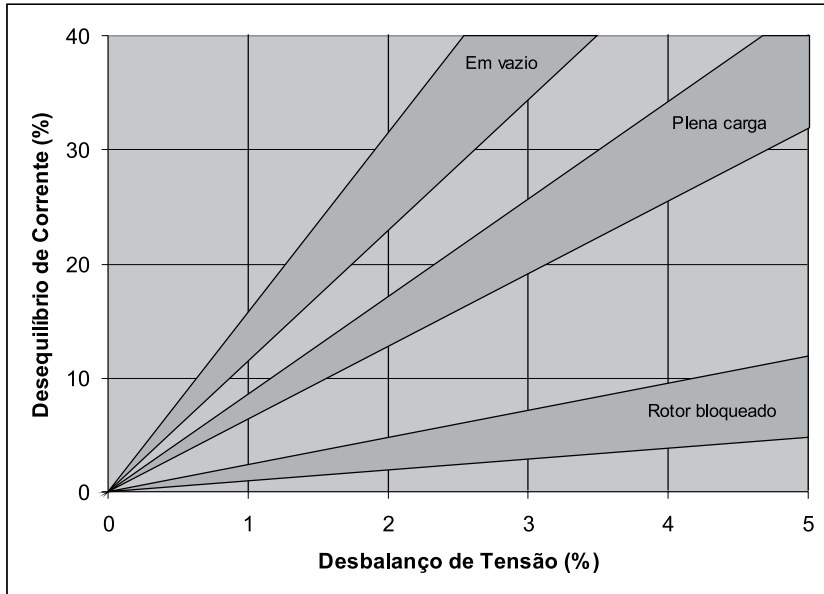


Figura 11.29 – Desequilíbrio de corrente

Desequilíbrios de corrente resultam em componentes de seqüência negativa de corrente e de conjugado desenvolvido, acarretando em perdas adicionais, aumento no aquecimento dos enrolamentos e redução da vida útil dos mancais. É interessante observar, no caso de motores de indução trifásicos, que, em condições de operação extrema, é mais interessante desligar uma de suas fases do que trabalhar com grandes desequilíbrios, desde que a carga no eixo o permita. As Figuras 11.30.a e 11.30.b mostram o efeito dos desbalanço de tensões sobre as perdas e conjugado, respectivamente.

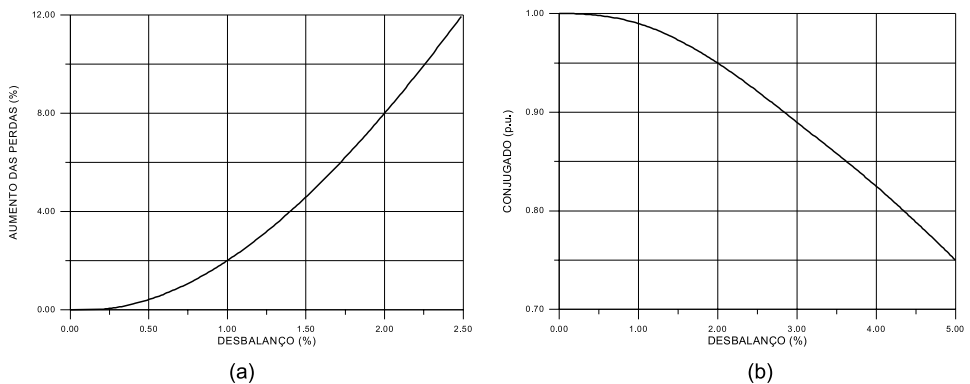


Figura 11.30 - Efeito do desbalanço de tensão sobre as perdas (a) e conjugado (b)

Pelo exposto, deve-se averiguar e controlar a tensão da alimentação, verificando o seu desbalanço, se estão dentro de seus limites e se há a presença de harmônicos, antes de tecer qualquer avaliação técnica e econômica de conservação de energia em motores elétricos. É possível, a partir da medição da tensão nas três fases, determinar o desbalanço de tensão, como sendo o máximo desvio da tensão média, dividido pela tensão média [14].

$$d(\%) = \frac{\max(|V_{AB} - V_{med}|; |V_{BC} - V_{med}|; |V_{CA} - V_{med}|)}{V_{med}} \cdot 100$$

$$V_{med} = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}}{3}$$

11.8. ANÁLISE ECONÔMICA

Dentro de um cenário de conservação de energia, sempre depois de verificada a viabilidade técnica da implantação de uma medida de conservação, a análise econômica aplicada a motores de indução trifásicos pode se apresentar com vários enfoques diferentes, quais sejam: deseja-se analisar a viabilidade da imediata substituição de um motor sobredimensionado por outro mais apropriado ao acionamento; quando da aquisição de um motor novo, deseja-se escolher entre um motor de projeto padronizado e um motor de alto rendimento; ou, ainda, devido à falha em um motor, deseja-se saber se é mais econômico recorrer à manutenção do mesmo ou adquirir um motor novo mais eficiente.

Os enfoques são diferentes, assim como as técnicas de análise a serem aplicadas. Em geral a melhor opção é aquela que oferecer o maior benefício líquido. Em todos os casos, a viabilidade se fará apresentar quando a economia decorrente da redução das perdas for suficiente pagar o investimento em uma dada tecnologia, a uma taxa mínima de atratividade desejada ou em um tempo de retorno aceitável. O custo anual de operação de um motor é dado por:

$$CO = \sum_{k \in K} \frac{P_k \cdot 0,735}{\eta_k} \cdot H_k \cdot TE_k$$

Onde η_k e H_k são o rendimento e o número de horas de trabalho por ano em uma dada potência P_k (cv), TE_k é a tarifa de energia no período especificado (\$/kWh) e K é o conjunto de todas as condições operativas.

Os principais indicadores econômicos da viabilidade de uma medida de conservação de energia são a economia mensal em unidade monetária, a economia mensal em kWh, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno de capital.

Ao substituir um motor sobredimensionado por um mais adequado ao acionamento, obtém-se um relativo aumento na eficiência do processo. Esta eficiência reflete não só na conversão de energia em si, mas também pode trazer outros benefícios que, sempre que possível, devem ser considerados. Um bom exemplo é a elevação do fator de potência. Invariavelmente, com a aplicação de um motor bem dimensionado, ter-se-á um consumo de energia reativa bem menor quando comparado ao do motor ocioso. Por outro lado, observe-se que é muito difícil contabilizar a melhoria do fator de potência global da instalação em função da melhoria agregada ao motor em análise. Nestes casos pode-se lançar mão de um artifício que se baseia no conceito de custo de oportunidade, ou seja, o benefício poderá ser considerado igual ao custo do capacitor que, se fosse instalado, produziria a redução do consumo de reativo equivalente à troca dos motores.

Outro benefício, mais difícil de ser considerado, é a redução das perdas no circuito alimentador em função da redução da corrente absorvida pelo motor. Quanto mais motores ociosos forem substituídos, mais relevante será esta parcela de contribuição, podendo inclusive, aliviar o carregamento dos condutores e transformadores da subestação de entrada, postergando expansões no sistema industrial.

Deve-se também considerar o custo da instalação dos novos motores, pois podem ocorrer casos em que se faz necessário um ajuste da base do mesmo, além de contar com alguns homens-hora. Nestas análises, pode-se desprezar os efeitos da inflação se for considerado que esta atua com a mesma intensidade sobre os dois motores em análise, o que constitui uma aproximação bastante realista. Sendo assim, as principais incertezas nestas avaliações acabam ficando a cargo das vidas úteis, taxas de juros, horas de operação por ano, dentre outras.

Com relação à vida útil, a Figura 11.31 apresenta os resultados de uma estatística norte-americana que poderá ser utilizada na falta de maiores informações [7]. Nesta figura, o traço em cada faixa representa o valor médio da classe.

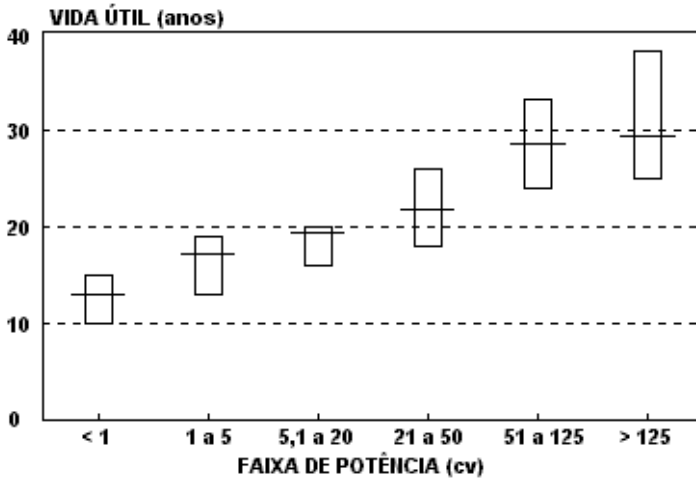


Figura 11.31 - Vidas úteis de motores de indução

Com relação à substituição de motores danificados, uma pesquisa recente [19] mostra que muito dificilmente um motor recuperado apresentará um rendimento maior do que um motor novo de mesma potência. No entanto, dependendo da qualidade da oficina de manutenção encarregada de reparar o motor danificado, este poderá voltar em um condição melhor do que a anterior à falha. Uma regra prática usada na indústria é de que o custo do reparo deve ser inferior a 60% do preço do motor novo e de que o motor deve ser descartado após a terceira falha.

11.9. ECONOMIA DE ENERGIA COM O USO DE CONTROLES DE VELOCIDADE

O controle de fluxo em tubulações industriais era, até bem recentemente, feito através do uso de válvulas de controle que, de fato, cumpriam esta tarefa às custas da inserção ou retirada de perdas de carga no circuito hidráulico. Por outro lado, cargas centrífugas tais como bombas, ventiladores e compressores, são regidas pelas chamadas Leis de Afinidade que estabelecem uma relação linear, quadrática e cúbica da vazão, pressão e potência, respectivamente, em relação à rotação.

Sendo assim, ao invés de controlar-se o fluxo através da ineficiente inserção de perdas, pode-se fazê-lo através do controle da velocidade de motores empregando inversores de frequência. Esta prática se constitui em um grande potencial de economia de energia, já que as cargas centrífugas respondem por mais de 60% das aplicações de motores na indústria. A figura a seguir ilustra o chamado Campo Básico de uma bomba centrífuga, que mostra os rendimentos de operação da bomba no lugar geométrico representado no plano Pressão-Vazão, para cada rotação de trabalho.

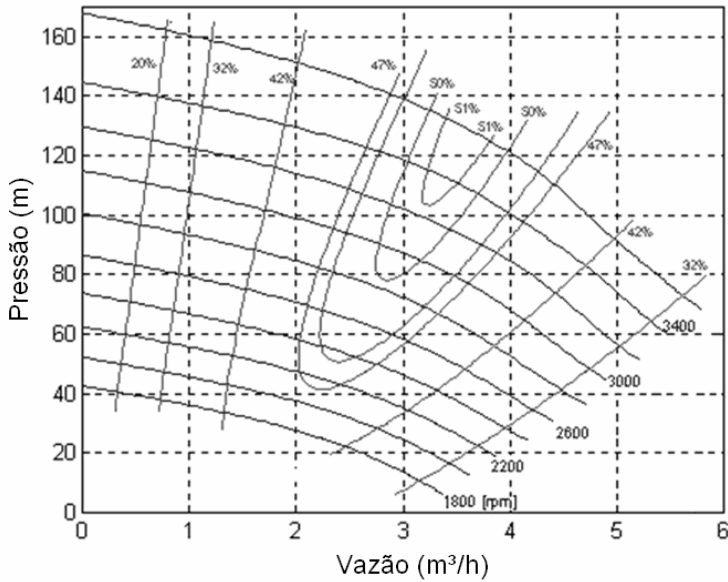


Figura 11.32 – Campo básico de uma bomba centrífuga

A potência elétrica demandada em cada ponto de operação é dada por:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_m \cdot \eta_b}$$

Onde P é a potência elétrica (kW), Q é a vazão (m³/h), H é a pressão (m), ρ é a massa específica do fluido (kg/m³), g é a aceleração da gravidade (m/s²), η_m é o rendimento do motor (pu) e η_b é o rendimento da bomba (pu).

A economia obtida com a operação com rotação variável em lugar do uso de válvulas de restrição pode ser visualizada na Figura 11.33. Para uma determinada vazão Q, ou opera-se com restrição de válvula, conduzindo ao ponto 1, ou opera-se com redução de velocidade, levando ao ponto 2.

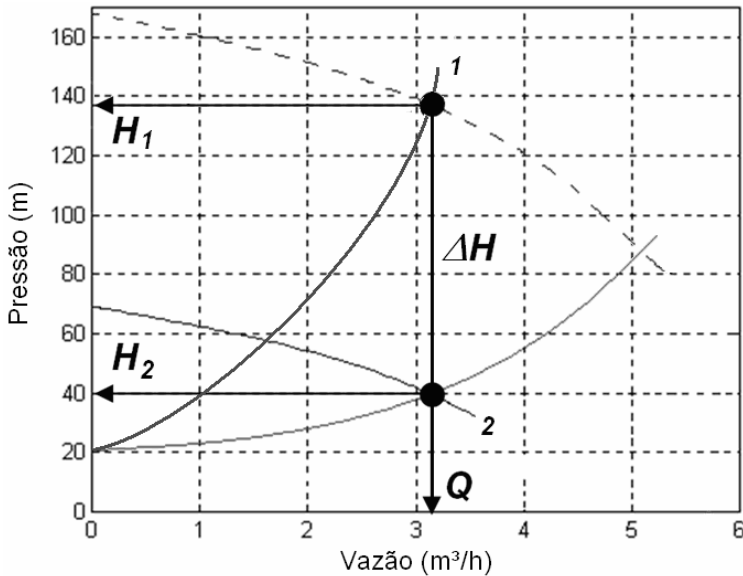


Figura 11.33 – Operação com válvula (1) e com rotação variável (2)

Estes dois pontos correspondem a uma mesma vazão, porém com pressões diferentes, H_1 e H_2 . Por estar a uma pressão maior, ponto 1 resultará em uma maior potência demandada em relação ao ponto 2, e, conseqüentemente, a um maior consumo de energia. A economia com o uso de um controle de velocidade em substituição de uma válvula, ΔE , é dada como uma função da parcela ΔH e do número de horas, t , de operação nesta condição.

$$\Delta E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot t}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_m \cdot \eta_b} \cdot \Delta H$$

Como exemplo, suponha que o sistema motor-bomba representado pelos gráficos das figuras anteriores opere com vazões de 1, 3 e 5 m³/h durante 2000, 4000 e 2000 horas por ano, respectivamente. Considerando o rendimento do motor constante e igual a 88%, a densidade da água igual a 1000 kg/m³ e a aceleração da gravidade de 9,81 m/s², pode-se construir a seguinte tabela extraíndo-se informações dos gráficos anteriores:

Ponto	Q (m ³ /h)	T (h)	ΔH (m)	η_b (%)	η_m (%)	ΔE (kWh)
1	1,0	2000	136	37	88	2276,4
2	3,0	4000	98	43	88	8468,8
3	5,0	2000	0	40	88	0
					Total	10745,2

Neste regime de operação, o uso de um sistema de variação de velocidade para o controle de fluxo, em lugar de uma válvula de restrição, resultaria em uma economia de 10,745 MWh em cada ano. É com esta economia que devem ser cobertos os investimentos na aquisição do equipamento de controle de velocidade e de instalação do sistema.

11.10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BORTONI, E.C.; **“Conservação de energia em motores elétricos”**. REVISTA IPESI-ELETRÔNICA E INFORMÁTICA, jul-ago 1993, pp. 36-41.
- [2] IVANOV, A.V.; **“Máquinas Elétricas - Vol. 2”**. Mir Publishers, Moscou. 1984.
- [3] KREUTZFELD, S.; **“Motor de alto rendimento: Uma economia viável”**. REVISTA ELETRICIDADE MODERNA, out 1988, pp. 30-35.
- [4] ABNT; **“NBR 5383 - Máquinas polifásicas de indução - Métodos de ensaio”**.
- [5] IEC; **“IEC Pub. 34.2 - Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests”**. 1972.
- [6] IEEE; **“IEEE std 112 - Test procedure for polyphase induction motors and generators”**. 1984.
- [7] ANDREAS, J.C.; **“Energy efficient electric motors - Selection and applications”**. Marcel Dekker Inc., NY. 1982.
- [8] FERREIRA NETO, J.L.; SANTOS, A.H.M.; **“Metodologia expedita para avaliação técnica e econômica de substituição de motores”**. Trabalho vencedor do prêmio PIRELLI de conservação de energia. 1988.
- [9] BORTONI, E.C.; **“Método do diagrama circular inverso para avaliação das condições de operação de motores de indução trifásicos”**, Revista Eletricidade Moderna, fev. 1993, pp. 46-51.
- [10] SÁ, J.S.; **“Obtenção do circuito equivalente do motor de indução trifásico a**

partir de dados de fabricantes". IV Seminário interno de pesquisa da EFEI. 1988.

[11] FERREIRA NETO, J.L.; BORTONI, E.C.; **"Avaliação das condições de operação do motor do misturador ZETAMIX - Refinações de Milho Brasil"**. Relatório GENERCO. 1991.

[12] COWERN, E.H.; WALLINGFORD, C.T.; **"Conserving with premium efficient motors"**. Baldor Electronic Catalog. Technical Document.

[13] NAILEN, R.L.; **"Can field tests prove motor efficiency"**. IEEE Trans. on IA-25, N. 3, may/jun 1989, pp. 391-396.

[14] NEMA, "NEMA Standards MG 1 – 14.35". National Electrical Manufacturers Association ou USA.

[15] SANTOS, A.H.M.; BORTONI, E.C.; KUSEVIC, E.D.; **"Parameters identification of a load-motor set for energy conservation: Dynamic Analysis"**. 1995 IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 1707-1714.

[16] ABNT; "NBR 7094 - Máquinas polifásicas de indução", 1996.

[17] HERMETO, A.E.; **"Operação de motores de indução trifásicos com tensões desequilibradas"**. IV Seminário interno de pesquisa da EFEI, 1988.

[18] NADEL, S.; SHEPARD, M.; GREENBERG, S.; KATZ, G.; ALMEIDA, A.T.; **"Energy-Efficient Motor Systems"** – American Council for an Energy-Efficient Economy. 1992.

[19] BORTONI, E.C. et alii; **"Análise do reparo de motores de indução trifásicos"**. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, 1999.

[20] SANTOS, A. L. ; **"Determinação do potencial de economia de energia em motores de indução trifásicos no Brasil"**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia. Unifei. 2005.

[21] FERREIRA, F.; ALMEIDA, A.; BAOMING, G.; FARIA, S.; MARQUES, J. ; **"Automatic change of the stator-winding connection of variable-load three-phase induction motors to improve the efficiency and power factor"**, in Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol., Hong Kong, Dec. 14–17, 2005, pp. 1331–1336.

Capítulo 12

COMPRESSORES E AR COMPRIMIDO

12.1. INTRODUÇÃO

Atualmente o ar comprimido é empregado em quase todos os setores da indústria e encontra aplicações nas mais diversas tarefas. Por essa razão os equipamentos que produzem, distribuem e utilizam o ar comprimido são essenciais. Em muitos casos, o ar comprimido representa uma parcela significativa na composição no consumo da energia elétrica da empresa. Além disso, diversos estudos apontam os sistemas de ar comprimido como sendo um dos pontos onde ocorrem perdas significativas de energia. Ou seja, existem bons potenciais para a economia de energia.

Em vista disso, neste capítulo o assunto ar comprimido será abordado visando principalmente o aumento da eficiência energética e conseqüentemente a redução dos custos envolvidos.

Inicialmente apresenta-se um breve histórico e são resumidas as aplicações do ar comprimido. Na seqüência são mostrados os principais tipos e aspectos construtivos dos compressores. A seguir apresenta-se, de forma sucinta, alguns aspectos básicos de Termodinâmica e são feitas breves considerações sobre Psicrometria. Também são dadas sugestões para o projeto da rede de distribuição, para a operação e para a manutenção do sistema de ar comprimido. Finalmente, usando todo o embasamento visto anteriormente, são demonstradas e analisadas algumas recomendações que podem contribuir para o aumento da eficiência energética do sistema.

12.2. HISTÓRICO

Muitas das diversas aplicações técnicas da atualidade derivam das invenções humanas da pré-história. Por exemplo, a primeira aplicação do ar comprimido certamente foi quando usamos o ar do conjunto de nossos pulmões para avivar as brasas de uma fogueira. Esse compressor natural tem uma capacidade média de 100 l/min e exerce uma pressão de 0,02 a 0,08 bar. E quando as pessoas gozam de boa saúde, é

um equipamento de insuperável resistência e de custo nulo. Ainda hoje, os pulmões são usados como fonte de energia, um bom exemplo são os índios e suas zarabatanas.

No entanto, foi antes de 3.000 A.C. que o nosso compressor mostrou ser inteiramente inadequado para usos mais intensivos. Isso se deu quando nossos ancestrais começaram a fundir os metais. Para alcançar as temperaturas necessárias, muitas vezes, acima de 1000 °C, requeria-se mais potência. Ainda se usou a natureza, o vento era desviado por anteparos e direcionado até a base do fogo e, posteriormente, para uma chaminé rudimentar. Os egípcios e sumérios já usavam tubos rudimentares para avivar as chamas.

O fole, feito com peles e acionado pelas mãos ou pelos pés, foi introduzido por volta de 1.500 A.C. Esses compressores rudimentares, operados manualmente, pelos pés, por animais ou por meio de rodas d'água, permaneceram em uso durante mais de 2000 anos.

Os foles sobreviveram até 1762, quando começaram a ser substituídos pelo invento de John Smeaton. Tratava-se de um equipamento dotado de cilindro de ferro fundido e movido por uma roda d'água. Mas isso só foi possível depois que John Wilkinson aperfeiçoou a máquina operatriz para tornear com precisão o interior de cilindros maiores, usados como canhões de guerra. Os sopradores e, posteriormente, os compressores se desenvolveram rapidamente e com isso impulsionaram, por sua vez, a extração de minérios e o processamento de metais.

A primeira experiência de sucesso usando-se ar comprimido em larga escala para o transporte de energia se deu na construção do túnel Mont Cenis, nos Alpes Suíços. A obra, iniciada em 1857, contava com redes de distribuição de ar com até 7 km de extensão. Os compressores, possuíam um pistão horizontal que trabalhava imerso em água, que servia como um elemento de vedação também para auxiliava o resfriamento. As máquinas eram acionadas por rodas d'água usando conjuntos bie-la-manivela.

Durante o ano de 1888 entrou em operação a planta de produção e distribuição de ar comprimido de Paris. O ar comprimido era usado para o acionamento de pequenos geradores elétricos DC de 35 kW, mover relógios pneumáticos, distribuição de vinho e cerveja, etc. A instalação contava com 7 máquinas a vapor acionando 14 compressores totalizando uma potência de 1,5 MW.

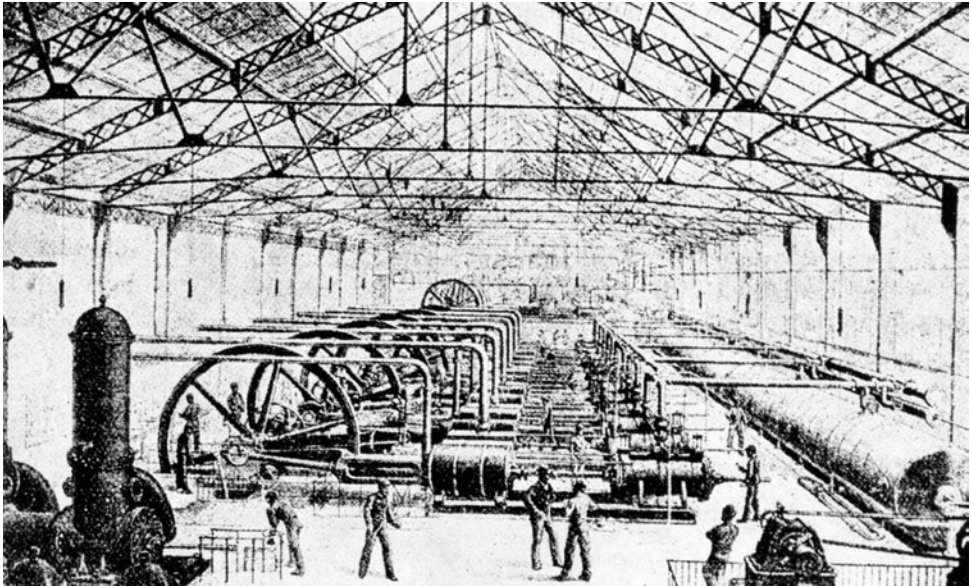


Figura 12.1 – Central de produção de ar comprimido de Paris, no ano de 1888

A evolução dos compressores foi acompanhando a evolução da máquina a vapor e posteriormente dos motores de combustão interna. Foi a fase de domínio dos compressores alternativos a pistão. Os esforços tecnológicos desenvolvidos no período entre as duas grandes guerras mundiais tornaram possível o surgimento dos compressores dinâmicos.

Atualmente, tecnologias mais avançadas de fabricação e de usinagem permitiram o aperfeiçoamento dos compressores rotativos de parafusos. Para aplicações industriais com ar comprimido, esses equipamentos estão ocupando o nicho dos compressores alternativos com sucesso.

Fazendo uma comparação das antigas máquinas com os equipamentos que são usados atualmente, verifica-se uma grande evolução tecnológica. Hoje, os modernos compressores são controlados por meio de microprocessadores e em sua construção são usadas técnicas e materiais especialmente desenvolvidos. Existem máquinas de grande porte para vazões muito elevadas e outras que atingem pressões altíssimas.

12.3. IMPORTÂNCIA DO AR COMPRIMIDO

O ar comprimido é uma forma de transporte de energia de enorme utilidade e com inúmeras aplicações. Em muitos campos chega a competir com a eletricidade e, em alguns casos particulares, somente ele pode ser usado. Por exemplo, no interior das minas, onde podem existir gases explosivos, ou em trabalhos subaquáticos, onde existe o risco de descargas elétricas.

Nas indústrias, o ar comprimido é muito empregado nas máquinas operatrizes, em motores pneumáticos, equipamentos de movimentação e transporte de materiais, ferramentas manuais, em sistemas de comando, controle, regulagem, instrumentação e na automação de processos. O ar comprimido também é usado nas instalações dos aeroportos, portos, hospitais, obras civis, nas minerações, postos de combustível, nos equipamentos de climatização e em diversos outros locais.

Quanto aos usos o ar comprimido pode ser classificado em:

- a) Equipamentos a pressão de ar – para encher pneus e câmaras, acionar embreagens e freios, tem usos no transporte pneumático, comandos à distância, etc.
- b) Equipamentos de jato livre – são os resfriadores e aquecedores, ejetores e aspiradores, veículos a colchão de ar, transporte de pós, jateamento, pulverização em queimadores, bicos de limpeza, sistemas air-lift, entre outros.
- c) Equipamentos de percussão – martelotes, prensas das forjarias, perfuratrizes de rocha, bate-estacas, vibradores, etc.
- d) Motores a ar comprimido – de pistões, de palhetas, de engrenagens, etc.
- e) Máquinas ferramentas fixas e portáteis - empregadas em linhas de produção e oficinas.
- f) Automação de operações industriais – sensores, atuadores, controles e processos.

Essa relação resumida e incompleta das aplicações mostra que entre as instalações industriais as de ar comprimido assumem posição de destaque.

Uma das vantagens do emprego do ar comprimido é que o mesmo pode ser armazenado e conduzido ao local de utilização sem necessitar de isolamento térmico, como é o caso do vapor. Não oferece riscos de incêndio ou de explosão e seu emprego se faz de forma flexível, compacta e potente. Essas características explicam seu uso em escala sempre crescente.

Como a principal desvantagem aponta-se o maior consumo de energia que a energia elétrica na produção de um determinado trabalho útil, o que não impede seu uso face às vantagens que oferece. Em razão disso, a correta utilização do ar comprimido e a operação eficiente e econômica dos compressores, que é o coração desses sistemas, são de extrema importância.

12.4. COMPRESSORES

Os ventiladores, sopradores, compressores e os turbocompressores são os equipamentos que pertencem a classe das máquinas geradoras de fluxo com esco-

amento compressível, pois operam mudanças significativas na massa específica do fluido de trabalho. Essas máquinas podem ser de fluxo contínuo, os turbocompressores, ou intermitente, como é o caso dos compressores alternativos.

Os ventiladores são equipamentos cujo objetivo é promover o escoamento de um gás. Para fins de análise do desempenho de um ventilador, a compressibilidade do fluido é normalmente desprezada, uma vez que as variações da temperatura e da densidade do gás em escoamento são pequenas. As elevações de pressão são da ordem de 0,1 atm, apenas o suficiente para vencer as perdas de carga que estão presentes no sistema de distribuição.

Já os compressores são utilizados para proporcionar a elevação da pressão de um gás ou escoamento gasoso. Nos processos industriais, a elevação de pressão requerida pode variar desde cerca de 1,0 atm até centenas ou milhares de atmosferas.

A denominação "sopradores" é usada para designar os equipamentos que operam com pequena elevação de pressão, porém, superior a elevação usada nos ventiladores.

12.4.1. Classificação dos compressores quanto as suas aplicações

As características físicas dos compressores podem variar profundamente em função dos tipos de aplicações a que se destinam. Dessa forma, convém distinguir:

- Compressores de ar para serviços ordinários
- Compressores de ar para serviços industriais
- Compressores especiais

Os compressores de ar para serviços ordinários são equipamentos de pequeno porte, fabricados em série visando o baixo custo inicial. São usados normalmente para serviços de jateamento, limpeza, pintura, no acionamento de pequenas máquinas pneumáticas, etc.

Os compressores de ar para serviços industriais são equipamentos encarregados pelo suprimento de ar comprimido em unidades industriais. Devem possuir elevada confiabilidade e podem ser máquinas de grande porte, com elevado custo de aquisição e de operação. São oferecidos em padrões básicos pelos fabricantes.

Compressores especiais são aqueles destinados a operar em processos industriais, refrigeração, serviços de vácuo, etc. Devem possuir características específicas de acordo como o tipo e fluido de trabalho.

12.4.2. Classificação dos compressores quanto ao princípio construtivo

Dois são os princípios construtivos no qual se fundamentam todas os compressores de uso industrial: volumétrico e dinâmico.

Nos compressores volumétricos ou de deslocamento positivo, a compressão do ar é feita através da diminuição de um volume que é ocupado pelo gás. Essa operação é feita de forma intermitente em que podem ser identificadas diversas etapas formando um ciclo que repete continuamente. Primeiramente um certo volume de gás é admitido no interior de uma câmara de compressão, que então é fechada. Após isso esse volume sofre uma redução e por conseqüência verifica-se um aumento da pressão. Finalmente a câmara é aberta e o gás liberado para consumo. É um processo em que a etapa de compressão é efetuada em um sistema fechado, ou seja, sem variação da massa contida dentro da câmara.

Os compressores dinâmicos, também denominados de turbocompressores, possuem dois elementos principais: o rotor e o difusor. O primeiro deles é um órgão rotativo munido de pás que transferem para o gás a energia recebida de uma fonte de potência externa. Essa transferência de energia se dá em parte na forma de velocidade e em outra parte na forma de pressão e temperatura. Posteriormente, o escoamento estabelecido pelo rotor é recebido por um conjunto de pás fixas, denominado difusor, cuja função é promover a transformação da energia cinética do gás em aumento da entalpia, com conseqüente ganho de pressão. Os compressores dinâmicos efetuam o processo de compressão de maneira contínua, e, portanto, correspondem ao que se denomina de um volume de controle na Termodinâmica.

Os compressores de maior uso na indústria são os alternativos, os de palhetas, os de parafusos, os de lóbulos, os centrífugos e os axiais. De forma geral, essas espécies podem ser classificadas, de acordo com o princípio construtivo, conforme mostrado na Figura 12.2:

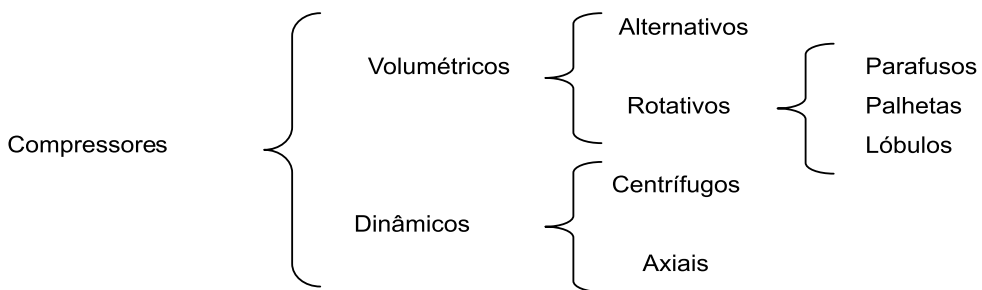


Figura 12.2 – Classificação geral dos compressores

12.4.3. Princípios de funcionamento

a) Compressores alternativos a pistão

Esse tipo de compressor se constitui de um cilindro com um pistão móvel no seu interior. O pistão está conectado a um sistema biela e eixo de manivela. Esse sistema transforma o movimento rotativo do eixo em movimento alternativo do pistão. A cada rotação do eixo de manivelas o pistão percorre o um caminho de ida e volta no dentro do cilindro.

Observando a Figura 12.3, suponha que o pistão está na parte superior e o volume dentro do cilindro é o menor possível. A primeira etapa se dá com o aumento do volume no interior do cilindro, com o movimento do cilindro. Esse aumento de volume causa uma diminuição de pressão no interior do cilindro, e em razão disso, o fluido de trabalho é aspirado pelo compressor. Depois do pistão alcançar o ponto mais baixo e de maior volume o processo agora será invertido. O pistão passa a diminuir o volume dentro do cilindro e a pressão em consequência disso passa a aumentar. Válvulas de retenção especiais controlam o fluxo de gás, um conjunto opera na entrada do fluido aspirado e outro na trabalha saída do fluido pressurizado. O bom funcionamento de um compressor alternativo está associado ao desempenho dessas válvulas.

Os compressores alternativos podem ser construídos nas mais diversas formas: com cilindros de duplo efeito, com vários estágios, com os cilindros montados em linha ou dispostos em "V", etc.

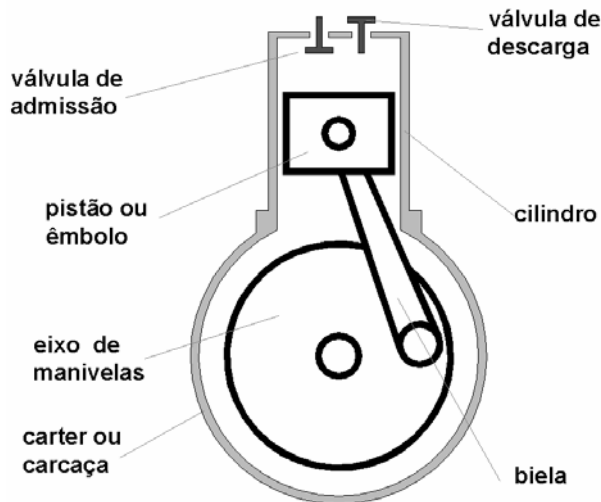


Figura 12.3 – Compressor alternativo de pistão

b) Compressor de palhetas

O compressor de palhetas possui um rotor colocado excentricamente em relação a uma carcaça, esse rotor é provido de rasgos no sentido radial que se estendem por todo o seu comprimento, nesses rasgos são inseridas palhetas retangulares, conforme mostrado na Figura 12.4, adiante.

Quando o rotor está em rotação, as palhetas são forçadas para fora pela ação da força centrífuga e ficam sempre em contato com a carcaça, fazendo a vedação. O fluido de trabalho entra pela abertura de sucção e ocupa os espaços definidos entre as palhetas. Devido à excentricidade do rotor e a posição das aberturas de sucção e descarga, a medida que o rotor gira, os volumes entre as palhetas vão diminuindo e provocando a compressão progressiva do gás. O gás é descarregado pela abertura de saída. A relação dos volumes entre as palhetas, no momento da admissão e da descarga, define uma relação de compressão interna, que é fixa para cada máquina. É recomendável que esse tipo de compressor trabalhe com uma relação de compressão a mais próxima possível desse valor interno.

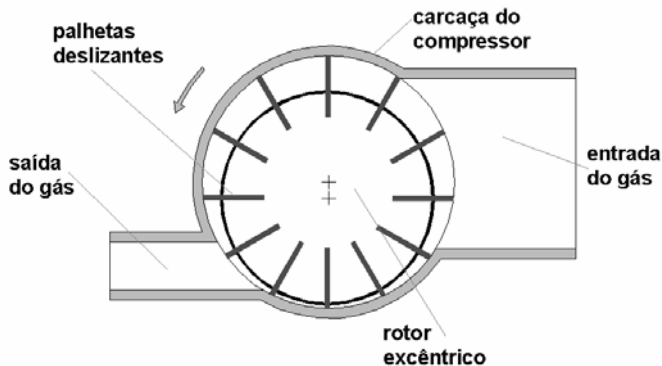


Figura 12.4 – Compressor de palhetas

c) Compressor de parafusos

Esse tipo de compressor possui dois rotores semelhantes a parafusos de rosca sem-fim, um macho e um outro fêmea. Esses rotores giram em sentido contrário, mantendo um engrenamento, conforme mostrado na Figura 12.5. Esse engrenamento se dá através dos próprios parafusos, para o caso dos compressores lubrificados, ou então por meio de rodas dentadas, para os compressores isentos de lubrificação, usados quando necessita-se de ar comprimido sem contaminação de óleo.

O compressor é conectado ao restante do sistema através das aberturas de sucção e de descarga, posicionadas diametralmente opostas. O gás penetra pela abertura de sucção e ocupa os espaços entre os filetes e a carcaça. O movimento de rota-

ção faz com que esses espaços vão se diminuindo e se deslocando para a abertura de descarga onde o gás comprimido vai sendo liberado. A relação de compressão interna do compressor de parafusos depende da geometria da máquina e da natureza do gás, devendo ser a mais próxima possível da relação entre as pressões do sistema.

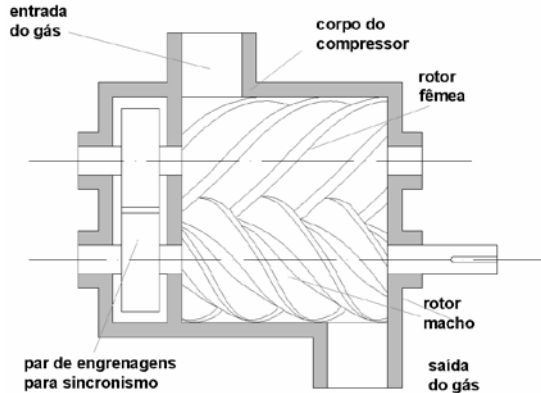


Figura 12.5 – Compressor de parafusos

d) Compressor de lóbulos

Esse compressor possui dois rotores que giram em sentido contrário, mantendo uma folga muito pequena no ponto de tangência entre si e com relação à carcaça. O gás penetra pela abertura de sucção e ocupa a câmara de compressão, sendo conduzido até a abertura de descarga pelos rotores. O compressor de lóbulos, embora sendo classificado como volumétrico, não possui compressão interna. Os rotores apenas deslocam o gás de uma região de baixa pressão para uma região de alta pressão. O compressor de lóbulos é um exemplo típico de um soprador. A Figura 12.6 mostra um desenho esquemático desse compressor.

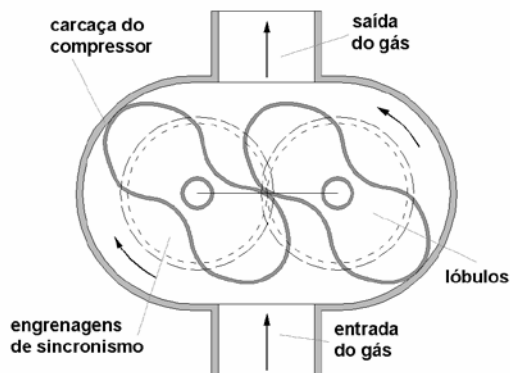


Figura 12.6 – Compressor de lóbulos

e) Compressores centrífugos

O princípio de funcionamento desse tipo de compressor é semelhante àquele das bombas centrífugas. O gás é aspirado pelo centro de um rotor radial e descarregado na periferia do mesmo, num movimento provocado pela força centrífuga induzida ao gás em função da rotação. O gás descarregado pelo rotor então passa por um difusor, formado por um espaço anular em torno do rotor. Nesse difusor há desaceleração do fluido e que resulta em elevação da pressão. Finalmente o gás é recolhido por uma caixa espiral denominada voluta e conduzido à descarga do compressor. Cada conjunto de rotor e difusor forma um estágio. São usados múltiplos estágios para maiores elevações de pressão.

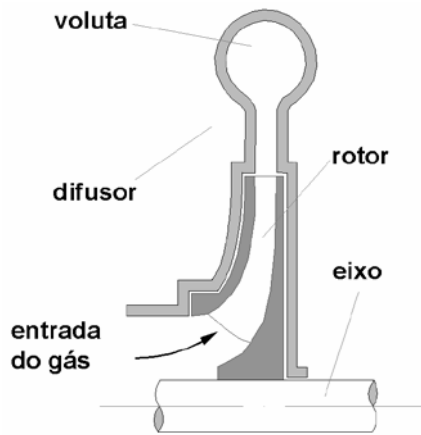


Figura 12.7 – Esquema de um compressor centrífugo

f) Compressores axiais

Os compressores axiais são usados, principalmente para as grandes vazões. São dotados de um rotor com palhetas dispostas em série na periferia. Quando esse rotor é colocado na máquina, essas palhetas são intercaladas por palhetas semelhantes, fixas ao longo da carcaça, conforme o esquema da Figura 12.8. Cada conjunto de palhetas móveis e fixas forma um estágio de compressão. As palhetas móveis são desenhadas de forma a transmitir ao gás a energia entregue pelo acionamento, isso introduz aumentos de velocidade e de entalpia no gás que está escoando. As palhetas fixas, por sua vez, são projetadas de modo a promoverem aumentos de pressão, como nos difusores. Como a elevação de pressão por estágio é pequena os compressores axiais normalmente são de vários estágios.

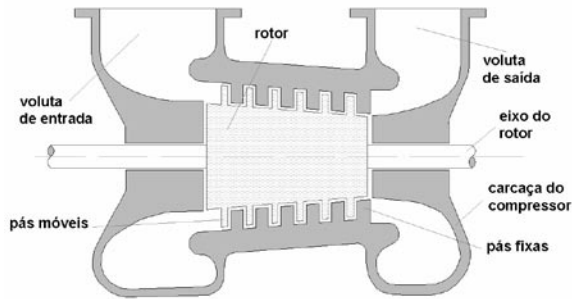


Figura 12.8 - Corte esquemático de um compressor axial

Os compressores centrífugos e os axiais operam com um fluxo contínuo, e sempre há uma igualdade entre a relação de compressão interna do equipamento e a relação de compressão externa.

12.5. TÓPICOS BÁSICOS SOBRE TERMODINÂMICA

Nessa seção serão abordados alguns tópicos básicos sobre Termodinâmica para melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem durante a compressão dos gases. Algumas poucas equações, as mais relevantes serão enumeradas, pois mais a frente será necessário fazer referência a essas expressões.

12.5.1. Transformações termodinâmicas

Inicialmente considera-se uma certa quantidade de um gás encerrado no interior de um cilindro dotado de um êmbolo móvel. Quando o gás é comprimido, o volume diminui e verifica-se um aumento da temperatura e da pressão. O gás então passou por uma transformação termodinâmica, pois pelo menos duas variáveis que representavam o estado inicial desse gás foram alteradas. Algumas dessas transformações termodinâmicas são fundamentais para os compressores, e são as seguintes:

a) Transformação isotérmica

Nesse tipo de transformação o gás é resfriado durante a compressão de modo que a temperatura se mantenha constante. Esse tipo de transformação foi estudado pelo cientista inglês Robert Boyle (1627 – 1691), que formulou o seguinte enunciado, conhecido por Lei de Boyle: “Mantendo-se constante a temperatura de um determinado gás, o seu volume e pressão variam inversamente”.

Isso significa que, se diminuirmos o volume a pressão aumentará e, se aumentarmos o volume, a pressão diminuirá, de modo que o produto da pressão pelo volume se mantém constante. Esse comportamento em um diagrama $P \times V$ resulta em uma hipérbole denominada isoterma.

$$pV = \text{constante}$$

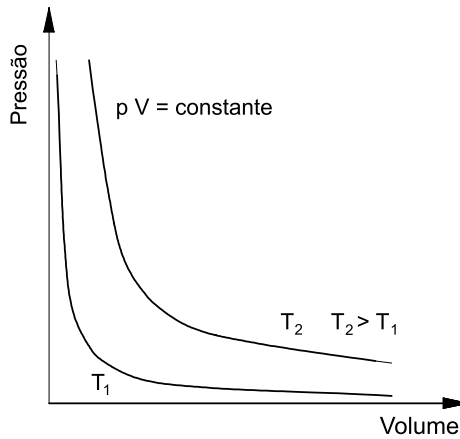


Figura 12.9 – Processo isotérmico de compressão em um diagrama P x V

b) Transformação isobárica

Para se manter a pressão invariável com a temperatura, o volume do recipiente deverá se ajustar com as mudanças de temperatura. Essa é a transformação chamada de isobárica. O raciocínio acima foi confirmado pelo cientista Gay-Lussac (1770 – 1840), que enunciou a seguinte lei “Mantendo-se constante a pressão de uma determinada massa de gás, o seu volume varia diretamente com a temperatura absoluta”, dada pela expressão seguinte. Em um gráfico V x T, a transformação isobárica é representada por uma reta, que extrapolada pode determinar a temperatura do “zero absoluto”.

$$\frac{V}{T} = \text{constante}$$

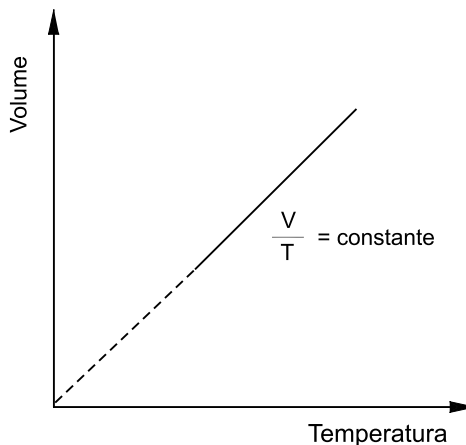


Figura 12.10 – Processo isobárico de compressão em um diagrama V x T

c) Transformação isométrica

Nos dois casos anteriores a temperatura e a pressão foram mantidas constantes. Na transformação isométrica o volume é mantido constante. Não é difícil raciocinar que, para um recipiente de volume constante, quando existe um aumento da temperatura verifica-se também um aumento da pressão. A confirmação experimental desse fato foi feita pelo físico Charles (1678 – 1740), que formulou a lei: “Mantendo-se constante o volume de uma determinada massa de gás, sua pressão varia diretamente com a temperatura”. Essa lei pode ser representada pela expressão a seguir, a representação gráfica dessa transformação em um diagrama $V \times T$ é uma reta horizontal.

$$\frac{p}{T} = \text{constante}$$

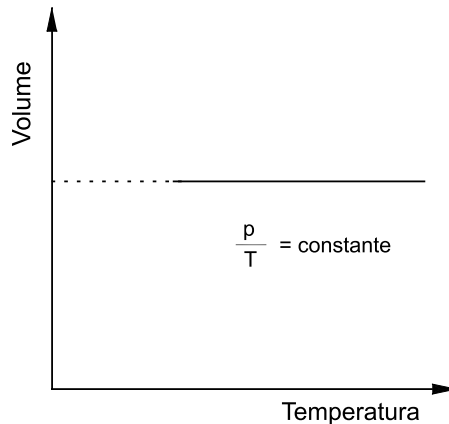


Figura 12.11 – Processo isobárico de compressão em um diagrama $V \times T$

d) Transformação Adiabática

Transformação adiabática é aquela que é realizada sem trocas de calor entre o processo e as suas vizinhanças, ou seja, só estão envolvidas transferências de trabalho para o sistema. É dada por:

$$pv^k = \text{constante}$$

Onde o expoente k é suposto constante, sendo calculado como a relação entre os calores específicos do gás, determinados a uma pressão constante e a um volume constante. O aspecto típico dessa transformação em um diagrama $P \times V$ está mostrado na Figura 12.12.

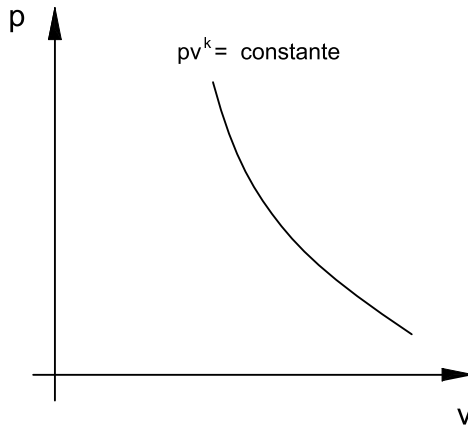


Figura 12.12 – Representações da curva $pv^k = \text{constante}$

e) Transformação Politrópica

Admitindo-se que exista uma proporcionalidade entre o calor e o trabalho que foram trocados ao longo de uma transformação em um gás, é possível demonstrar que o processo assim efetuado obedecerá a uma equação do tipo:

$$pv^n = \text{constante}$$

Transformações desse tipo são denominadas de transformações politrópicas e podem ser comparadas as transformações adiabáticas: tratando-se de um processo de compressão com resfriamento, $n < k$; para um caso de compressão com aquecimento $n > k$; para o caso da compressão adiabática, $n = k$ e quando a transformação é isotérmica $n = 1$.

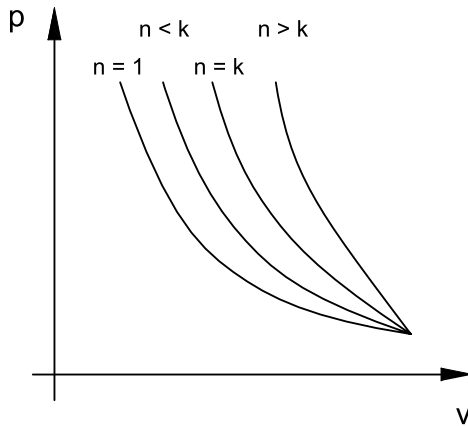


Figura 12.13 – Representação de curvas $pv^n = \text{constante}$

12.5.2. Gases perfeitos

Um gás que obedece rigorosamente às transformações que foram citadas anteriormente, sob quaisquer condições de pressão e temperatura, é denominado de gás perfeito ou gás ideal.

Usando as três primeiras transformações mostradas anteriormente é possível deduzir uma equação que englobe todas variáveis de estado, ou seja, pressão, volume e temperatura.

$$\frac{pV}{T} = \text{constante}$$

Essa expressão foi proposta inicialmente por Clapeyron e recebeu a denominação de Equação dos Gases Perfeitos. Com essa equação e mais as experiências de Avogadro, determina-se finalmente:

$$p \cdot V = n \cdot \bar{R} \cdot T$$

Onde: n - número de moles da substância

\bar{R} - constante universal dos gases perfeitos

Essa equação de estado também pode ser escrita em termos específicos, sendo igual a:

$$p \cdot V = R \cdot T$$

sendo $R = \frac{\bar{R}}{M_w}$

onde: R - constante particular do gás

M_w - massa molecular do gás

12.5.3. Gases reais

Em certas situações o comportamento dos gases reais não deve ser aproximado usando a equação dos gases perfeitos, a precisão não é satisfatória. Isso ocorre em pressões mais elevadas ou para baixas temperaturas. Usa solução para esses casos é o emprego do fator de compressibilidade (Z), definido como sendo a razão entre o volume ocupado por um gás real e o volume ocupado por um gás perfeito de mesma natureza molecular, nas mesmas condições de pressão e temperatura:

$$Z = \frac{V}{V_{\text{ideal}}}$$

Levando essa definição a equação dos gases perfeitos resulta:

$$p \cdot V = Z \cdot R \cdot T$$

Que pode ser considerada uma forma de equação de estado para gases reais. Um gás perfeito tem um fator de compressibilidade igual a unidade. O afastamento desse valor fornece uma medida do desvio do comportamento apresentado por um gás real quando comparado a um gás perfeito.

Existem diversas outras equações representativas da relação funcional $f = (p, V, T)$, que são usadas principalmente em cálculos computadorizados, são equações complexas que representam com grande precisão o comportamento dos gases reais. Algumas dessas equações tem mais de trinta constantes experimentais. Um exemplo é a equação a seguir, que dá o comportamento do ar:

$$P = \rho R T + \rho^2 \sum A_i T^{2-i} + \dots + \rho^{13} e^{-\gamma p^2} \sum_{i=30}^{32} A_i / T^{(i-32)}$$

12.5.4. Determinação do Trabalho na compressão

Para o cálculo do trabalho de compressão considera-se um gás ideal no interior de um cilindro. O gás é comprimido pela aplicação de uma força F sobre um êmbolo móvel. Em Termodinâmica isso pode ser analisado considerando o cilindro como um Sistema, isto é, uma certa quantidade de massa no interior de um volume fechado cujas fronteiras são permeáveis à passagem de trabalho e de calor, mas são impermeáveis ao gás. O trabalho ideal desenvolvido pela força nesse processo é dado por:

$$W = \int_1^2 F dl$$

Onde dl representa o deslocamento infinitesimal do êmbolo. Assumindo a hipótese de uma compressão perfeita, a força seria a cada instante equivalente ao produto da pressão interna do gás pela área do êmbolo, sendo então permitindo escrever que:

$$W = \int_1^2 p A dl$$

Ou seja:

$$W = \int_1^2 p \, dV$$

Que pode ser reescrita em termos específicos:

$$w = \int_1^2 p \, dv$$

Esse resultado, denominado trabalho específico de compressão ideal, equivale numericamente à área sob uma curva que representa o processo de compressão, quando representado em um diagrama P x V, como está indicado na Figura 12.14, apresentada a seguir:

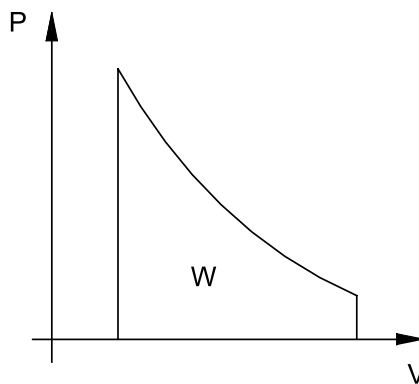


Figura 12.14 – Trabalho de compressão em um sistema no diagrama P x V

O conceito da compressão de um gás em um sistema é muito importante, no entanto, não é adequado para a análise dos compressores, pois não existe um fluxo de massa. Para essa situação a abordagem mais indicada é a que estuda os processos ao longo de um *Volume de Controle*. Definido como uma certa região no espaço delimitada por uma superfície permeável aos fluxos de massa, calor e de trabalho. As alterações das propriedades dos fluxos são observadas nos pontos de passagem dessa superfície.

Pode ser demonstrado, de forma análoga ao que se fez para os Sistemas, que o trabalho específico para se realizar a compressão de um gás em Volume de Controle é dado pela integral dada a seguir:

$$w = \int_1^2 v \, dp$$

Verifica-se uma semelhança com a integral anterior. Também pode ser demonstrado que o trabalho específico de compressão, em iguais condições de pres-

são, em um Volume de Controle sempre é maior que o aquele desenvolvido sobre um Sistema. Pois o primeiro engloba, além da parcela responsável pela compressão do gás, uma parcela de trabalho necessária ao transporte de massa.

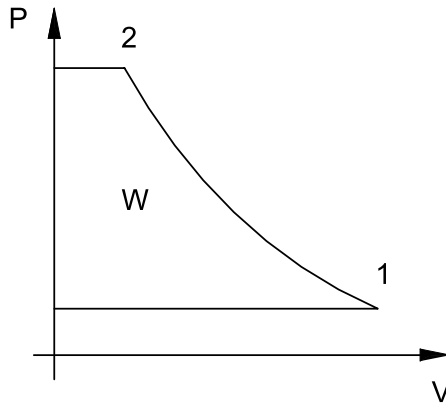


Figura 12.15 – Trabalho de compressão ideal em um volume de controle no diagrama P x V

Sabendo-se de que maneira a compressão é realizada, as integrais apresentadas anteriormente podem ser resolvidas. Então o trabalho específico de compressão sobre um fluxo de gás em um volume de controle pode ser determinado:

$$w = \int_1^2 v \, dp = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (12.1)$$

Na equação mostrada acima o expoente adiabático pode ser substituído pelo expoente politrópico, de acordo com tipo de compressão que foi realizado.

12.5.5. Compressão em vários estágios

Empregam-se normalmente compressores de um estágio apenas quando a pressão desejada na descarga não for muito grande. Podem ser obtidos rendimentos razoáveis e as temperaturas de descarga do gás não são tão elevadas. No entanto, se a pressão pretendida na descarga for mais elevada, com apenas um estágio de compressão, o rendimento obtido será mais baixo e as temperaturas na descarga serão muito mais altas.

A solução normalmente utilizada para esse caso é utilizar a compressão em estágios. Entre dois estágios de compressão esfria-se o gás que está sendo comprimido. Desse modo estamos nos aproximando de uma compressão isotérmica e o

consumo será menor, como demonstrado mais à frente. O valor usado para as pressões intermediárias que apresenta o menor consumo de potência pode ser determinado pela expressão a seguir.

$$r_p = p_D / p_s$$

Onde:

$$r_p - \text{relação de compressão do sistema} \quad (//)$$

$$p_D - \text{pressão absoluta de descarga no último estágio} \quad (\text{bar})$$

$$p_s - \text{pressão absoluta de sucção no primeiro estágio} \quad (\text{bar})$$

$$r' = \varphi \sqrt[E]{r_p}$$

$$\text{Sendo: } r' - \text{relação de compressão por estágio} \quad (//)$$

$$\varphi - \text{coeficiente de correção} \quad (//)$$

$$E \text{ número de estágios} \quad (//)$$

O coeficiente φ , cujo valor está usualmente abaixo de 1,05, é usado para compensar as perdas de carga que ocorrem durante a passagem do gás pelos resfriadores intermediários.

O trabalho para a compressão de um gás realizado em vários estágios pode ser dado pela expressão mostrada adiante. Nessa considera-se que relação de compressão é constante entre os estágios e temperatura no início da compressão de cada estágio também é constante e igual a temperatura no início do primeiro estágio, ou seja, supõe-se que os resfriamentos intermediários sejam perfeitos. Caso as pressões intermediárias não sejam constantes, essa expressão não poderá ser utilizada, o cálculo deverá ser efetuado separadamente para cada estágio, tomando-se o devido cuidado em se utilizar valores adequados para as temperaturas iniciais em cada compressão. Essa equação também é utilizada para o caso de compressão em apenas um estágio, bastando fazer E igual 1.

$$w_k = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot E \cdot \left[\left(\sqrt[E]{r_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (12.2)$$

$$\text{Onde: } w_k \text{ trabalho por unidade de massa} \quad (\text{kJ / kg})$$

A Figura 12.16 mostra um esquema de compressão politrópica quando ela é realizada em dois estágios. A área hachurada representa uma redução do trabalho de compressão.

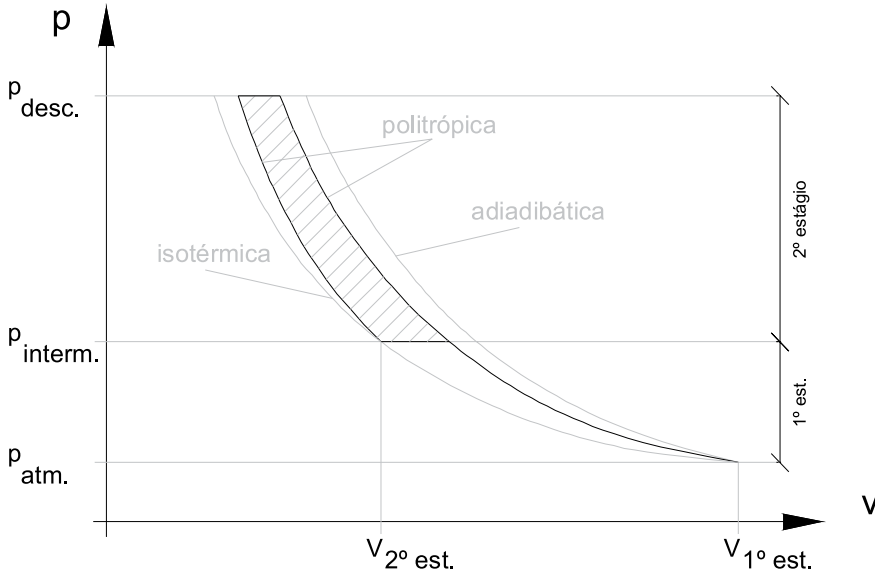


Figura 12.16 – Compressão em dois estágios

12.5.6. Compressão de um gás real

A análise termodinâmica dos processos reais de compressão depende do conhecimento do rendimento termodinâmico. Um valor que é avaliado experimentalmente e que traduz os efeitos relativos aos desvios dos processos reais da condição ideal. Define-se rendimento termodinâmico (η_{th}) de um processo real de compressão como a relação entre o trabalho que se consome teoricamente para comprimir um gás e aquele efetivamente utilizado na compressão:

$$\eta_{th} = \frac{W_{th}}{W}$$

O processo ideal a ser considerado para esse propósito deve se iniciar e finalizar no mesmo nível de pressão que o processo real. A Figura 12.17 mostra, em um diagrama $P \times V$, um processo real de compressão e três alternativas para o processo ideal.

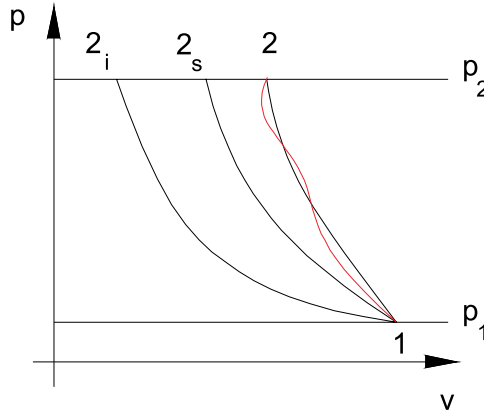


Figura 12.17 – Alternativas para o processo ideal

Os três tipos de processos ideais dão origem a três versões para o rendimento termodinâmico: o rendimento isotérmico, o adiabático e o rendimento politrópico.

12.5.7. Rendimento mecânico

Durante o processo da transmissão da energia do acionador para o compressor ocorrem inevitáveis dissipações de energia provocadas pelo atrito mecânico. Dessa forma, como indica o esquema da Figura 12.18, apenas uma parte do trabalho recebido pelo compressor é fornecida ao gás.

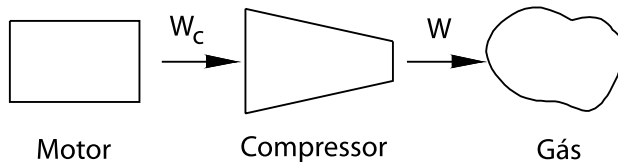


Figura 12.18 – Esquema de transferência de energia ao gás

Para que esse efeito seja computado nos cálculos da compressão utilizamos o rendimento mecânico η_{mec} , com valores típicos entre 0,92 e 0,98, cuja definição é dada por:

$$\eta_{mec} = \frac{W}{W_c}$$

Sendo W o trabalho efetivamente fornecido ao gás para um suprimento W_c de trabalho ao compressor. A mesma definição poderia ser apresentada em termos das potências consumidas.

12.5.8. Rendimento volumétrico

Existe uma outra característica da operação dos compressores volumétricos e que tem extraordinária importância na análise de seu desempenho. Trata-se do rendimento volumétrico, η_{vol} , que serve de base aos cálculos de vazão. Examinando o ciclo representado na Figura 12.19, a seguir, consta-se que durante o processo 1 – 2 ocorre a compressão de uma quantidade de gás bem maior que aquela que é efetivamente transportada da sucção para a descarga do equipamento. De fato, do volume V_2 ocupado ao final dessa fase, apenas a parcela correspondente a $(V_2 - V_3)$ é descarregada, o volume V_3 fica retido no interior do compressor em espaços internos denominados “volume morto”.

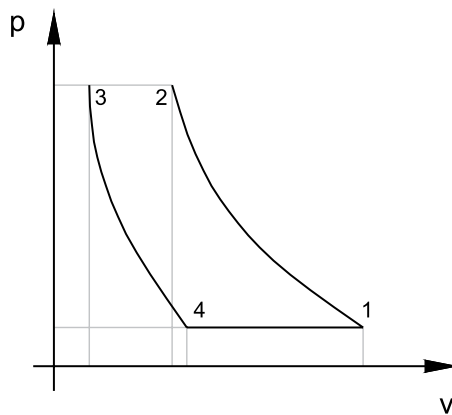


Figura 12.19 – Esquema para determinação do volume morto

Pode-se determinar o rendimento volumétrico através das equações a seguir, esse valor é função da relação de pressão, das características do gás e da qualidade de construção do compressor.

$$C = \frac{V_3}{V_1 - V_3}$$

Sendo: C - fração de volume morto

V_3 - volume morto da câmara de compressão (m³)

V_1 - volume total da câmara de compressão (m³)

O rendimento volumétrico é dado então pela expressão que segue:

$$\eta_{vol} = 1 - C (r_p^{(1/k)} - 1)$$

Observa-se que o rendimento volumétrico varia inversamente a fração de volume morto, varia no mesmo sentido do expoente adiabático e também varia inversamente a relação de pressão.

Para um determinado equipamento, a fração de volume morto é fixa, dessa forma, existe um valor máximo para a relação de pressão, para esse valor o rendimento volumétrico se iguala a zero. A relação de pressão máxima é dada pela expressão seguinte:

$$r_{\max} = (1 / C + 1)^k$$

12.5.9. Potência de compressão

Compressores são equipamentos caracterizados termodinamicamente como volumes de controle, cujo desempenho deve ser analisado através da identificação de fluxos de energia, ou seja, potências envolvidas no processo.

A potência elétrica exigida pelo acionamento de um compressor é dada por:

$$\dot{W}_C = \frac{\dot{m} \eta_{\text{vol}} w_{\text{th}}}{\eta_{\text{th}} \eta_{\text{mec}} \eta_{\text{ele}}} \quad (12.2)$$

Sendo: \dot{W}_C - Potência de compressão (kW)

\dot{m} - Vazão mássica teórica do gás (m³/s)

η_{vol} - Rendimento volumétrico (/)

w_{th} - Trabalho de compressão ideal por unidade de massa (kJ/kg)

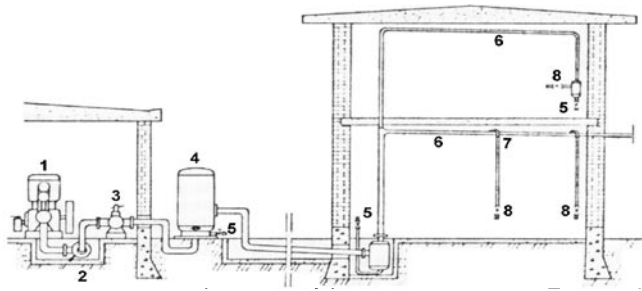
η_{th} - Rendimento termodinâmico (/)

η_{mec} - Rendimento mecânico (/)

η_{ele} - Rendimento elétrico do motor (/)

12.6. INSTALAÇÕES DE AR COMPRIMIDO

As instalações de ar comprimido podem ser divididas em dois elementos principais: a sala de compressores e as redes para a distribuição. Na sala de compressores existem, obviamente, além dos compressores, diversos equipamentos e acessórios necessários ao bom funcionamento do sistema. A Figura 12.20 mostra alguns desses equipamentos:



- | | | |
|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| 1 compressor | 4 reservatório | 7 conexão dos ramais |
| 2 amortecedor de pulsação | 5 drenagem de condensado | 8 pontos de uso |
| 3 resfriador posterior | 6 rede com inclinação | |

Figura 12.20 – Esquema de uma instalação típica de ar comprimido

O compressor é o equipamento responsável pela produção do ar comprimido. O amortecedor de pulsações, normalmente usado apenas com compressores alternativos, reduz as variações instantâneas de pressão. O resfriador posterior é responsável pela condensação e retirada da maior parte da umidade contida no ar comprimido. O reservatório ou pulmão tem como objetivo principal a redução das variações de pressão em função das variações do consumo. Por fim a rede de distribuição leva o ar comprimido até os pontos de consumo. Nessa rede também existem pontos de drenagem de condensado.

Nas indústrias, em algumas situações é necessário o uso de filtros especiais e do controle da umidade do ar, usando-se secadores frigoríficos ou químicos.

12.6.1. Distribuição do ar comprimido

Os três pontos seguintes são os mais importantes para a eficiência, segurança e economia de um sistema de distribuição de ar comprimido:

- Queda de pressão adequada
- Vazamento mínimo
- Alto grau de separação de condensado

A queda de pressão no sistema de distribuição implica pressões, nos pontos de consumo de ar, mais baixas do que na descarga do compressor e, conseqüentemente, também decréscimo na potência disponibilizada para as ferramentas, máquinas ou outros consumidores de ar comprimido.

Se a queda de pressão, ou perda de carga, é tão alta que a pressão de trabalho é menor que a pressão prescrita, a perda de potência é proporcionalmente muito maior do que a queda de pressão. A potência desenvolvida por uma ferramenta a 5,0

bar, por exemplo, é de somente 45 a 50% da potência fornecida com a pressão de 7,0 bar. Por esse motivo as redes de distribuição devem ser corretamente dimensionadas, já se considerando ampliações futuras, de modo que um acréscimo no consumo não prejudique todo o sistema e torne necessária a substituição de uma rede inteira. Isso se aplica, acima de tudo, para o ramal principal. O custo inicial é largamente compensado pelos ganhos operacionais.

Às vezes, uma grande queda de pressão na rede tem que ser compensada pelo aumento da pressão de trabalho do compressor. No caso da diminuição do consumo a pressão ficará acima do desejado, aumentando as perdas por vazamentos e a potência consumida. Além disso, nem todas ferramentas e acessórios são projetados para trabalhar e resistir tais aumentos de pressão.

As redes de distribuição de ar comprimido devem ser projetadas de modo que a queda de pressão total, do compressor até o ponto de consumo mais distante, não exceda 0,3 bar. Para o caso de instalações que cobrem grandes áreas, tais como minas, pedreiras, etc., uma queda de pressão maior no sistema de tubos pode ser aceita, mas não deve ser superior a 0,5 bar. Nesse valor já deve ser incluída a queda de pressão causada pelas mangueiras de borracha, luvas de acoplamento, engates rápidos e conexões. Especial atenção deve ser dada ao dimensionamento e especificação dessas peças, pois as perdas mais sérias, geralmente, ocorrem nesses trechos finais.

Embora seja recomendada a utilização do alimentador em anel, isto é, em circuito fechado, a linha aberta é muito usada devido a menor investimento inicial. O dimensionamento pode ser feito por dois critérios: o da velocidade e o da perda de carga.

O primeiro deles é usado apenas para trechos curtos, usando-se usar as seguintes velocidades: tubulações principais 6 a 8 m/s, ramais secundários 8 a 10 m/s e mangueiras de 15 até 30 m/s. O procedimento é bastante simples, consiste em determinar a vazão normal (isto é, ar livre) e calcular a velocidade para o escoamento na pressão de trabalho fixando um diâmetro adequado.

O método da perda de carga é mais recomendado para o uso geral. A perda de carga depende do comprimento do tubo e das grandezas que aparecem na fórmula clássica:

$$h_f = \frac{2}{d} l \cdot \rho \cdot \alpha \cdot v^2 \cdot 10^{-5}$$

Onde: h_f - perda de carga no tubo reto (bar)

d - diâmetro interno do tubo (m)

l - comprimento equivalente total do tubo (m)

ρ - massa do ar na pressão de trabalho (kg/m³)

α - coeficiente que depende do diâmetro (/)

v - velocidade do escoamento (m/s)

O valor de α é uma função do diâmetro e é dado pela expressão:

$$\alpha = 0,00497 + \frac{0,0001296}{d}$$

A expressão acima pode ser simplificada e assume a forma:

$$h_f = 3,25 \cdot \alpha \cdot \frac{Q^2 \cdot l \cdot r}{d^5} \cdot 10^5$$

Onde: Q - vazão na pressão de trabalho (m³/s)

Ao comprimento da linha deverão ser somados os comprimentos equivalentes das conexões encontradas na rede. Esses valores podem ser retirados de ábacos ou de tabelas.

12.6.2. Separação da umidade do ar comprimido

O ar atmosférico nunca está completamente seco. Sempre contém alguma umidade, e quando se diz que está seco é porque está menos úmido em comparação a outro que se tomou como referência.

A umidade é a água contida no ar, no estado de vapor. Quando o ar contém a quantidade máxima possível de água sob a forma de vapor se diz que está saturado: a umidade é de 100%.

O ponto de saturação depende da pressão e da temperatura, principalmente da temperatura: Se a temperatura aumenta o ar pode absorver mais umidade, caso contrário, esse ar perde umidade por condensação. Para a pressão ocorre o inverso, quanto maior a pressão menor é a capacidade do ar comprimido reter a umidade.

Por exemplo, o ar à pressão atmosférica com 50% de umidade passa a ter 100% de umidade; à pressão de 2,0 bar, 150% de umidade à 3,0 bar; e 300% de umidade à pressão de 6,0 bar, comum em todas aplicações. Ressalta-se que acima de 100% de umidade sempre vai haver condensação de água. Já para a temperatura, o aumento é calculado duplicando-se cada 11% da capacidade de retenção a cada aumento de 10°C.

Com o resfriamento, artificial ou natural, do ar comprimido a umidade excedente vai se depositando nas paredes dos cilindros dos compressores alternativos, no resfriadores intermediário e posterior, no reservatório e tubos da rede principal e secundária. É vital que essa umidade seja retirada antes de chegar até o equipamento de uso final. Para isso são instalados separadores de umidade e em casos mais críticos secadores de ar por refrigeração ou colunas de absorção.

Durante a instalação da rede devem ser tomadas precauções para que a drenagem do condensado seja feita de maneira eficiente: a rede deve ser instalada com uma inclinação de 0,5 m a cada 100 m, deve ser providenciada a colocação de poços de drenagem nos pontos mais baixos, instalar drenagem no reservatório. É fundamental a manutenção cuidadosa dos dispositivos de drenagem manual e automática.

Os fenômenos físicos que ocorrem com a mistura de ar e de vapor d'água podem ser estudados usando-se as Cartas Psicrométricas ou métodos analíticos. A Figura 12.21, mostra uma dessas cartas.

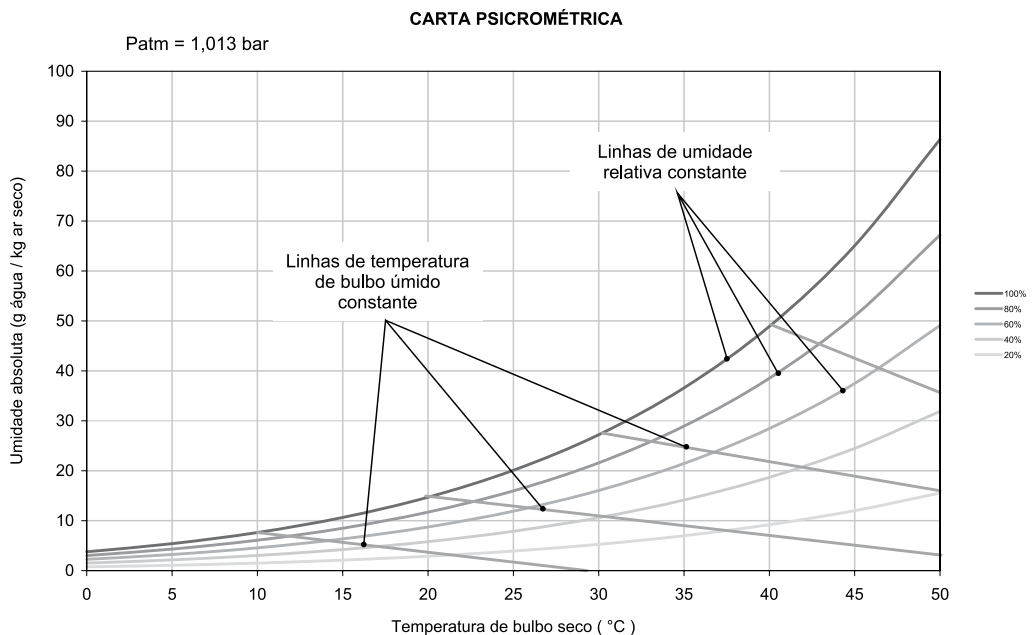


Figura 12.21 – Carta psicrométrica calculada para pressões próximas da atmosférica

O estudo analítico da psicrometria é feito usando-se o conceito das pressões parciais, que são exercidas, separadamente, pelo ar seco e pelo vapor d'água. São utilizadas para o traçado das cartas as seguintes propriedades, além das temperaturas de bulbo úmido e seco:

a) Umidade absoluta:

$$w = \frac{\text{massa de vapor d' água} / \text{m}^3}{\text{massa de ar seco} / \text{m}^3}$$

$$w = \frac{p_s V / R_s T}{p_A V / R_A T}$$

$$w = \frac{p_s / R_s}{p_A / R_A}$$

Introduzindo os valores das constantes $R_s=0,4615 \text{ kJ/kg K}$ e $R_A=0,2870 \text{ kJ/kg K}$ e considerando-se que $p_A = p_B - p_s$ resulta então:

$$w = 0,6221885 \frac{p_s}{p_B - p_s}$$

Onde: w - umidade absoluta (kg água / kg ar seco),

p_s - pressão parcial do vapor d' água na temperatura da mistura (bar),

p_B - pressão atmosférica na temperatura da mistura (bar)

b) Umidade relativa:

$$\phi = \frac{\text{pressão parcial do vapor d' água}}{\text{pressão de saturação da água na mesma temperatura}} \cdot 100 \%$$

$$\phi = \frac{p_s}{p_{SAT}} \cdot 100 \%$$

Onde: ϕ - umidade relativa (%),

p_s - pressão parcial do vapor d' água na temperatura da mistura (bar),

p_{SAT} - pressão de saturação da água na temperatura da mistura (bar)

A pressão de saturação da água é dada por tabelas termodinâmicas ou equações apropriadas.

12.7. AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética nas instalações que envolvem o ar comprimido pode ser alcançada adotando-se medidas que se iniciam no projeto da planta, com a especificação correta dos compressores e do seu sistema de controle, dos acessórios e periféricos, que devem ser adequados aos níveis de pressão e vazão e qualidade do ar comprimido que são requeridos pela unidade, além do seu comportamento em face das variações desses parâmetros.

Com essas precauções podemos garantir que os rendimentos elétricos, mecânicos, volumétricos e termodinâmicos sejam os mais elevados, pois são parâmetros que dependem das características construtivas e do esmero usado na fabricação de cada equipamento.

A operação e a manutenção deverão estar a cargo de pessoal especialmente treinado para essas tarefas. Todos os parâmetros de funcionamento devem ser monitorados. Perdas de carga, acréscimos de temperatura, etc. são facilmente percebidos. Atualmente com as facilidades e recursos oferecidos pela instrumentação e pelos microprocessadores é não é difícil acompanhar em tempo real, por exemplo, as variações do expoente da politrópica em um compressor. A análise desse parâmetro fornece indicações importantes sobre a qualidade do resfriamento do equipamento.

Para que isso possa ser feito é importante quantificar os benefícios de cada melhoria possam trazer e comparar com os investimentos que são necessários para a sua implementação. Quando essa relação custo-benefício for economicamente atrativa, as medidas de melhoria devem ser implementadas.

Para minimizar a energia consumida pode-se ainda reduzir o valor do trabalho específico de compressão e da vazão mássica de ar comprimido.

Após uma rápida inspeção da equação 12.1, que nos dá o trabalho específico de compressão, observa-se que o valor desse trabalho é função dos seguintes parâmetros:

12.7.1. Temperatura de admissão do ar

A influência das condições de admissão do ar no equipamento de compressão pode ser quantificada comparando-se o trabalho específico de compressão a uma certa temperatura com o trabalho realizado a uma temperatura mais baixa.

A expressão seguinte apresenta o benefício percentual no consumo de energia em um sistema de ar comprimido devido a uma redução na temperatura de admissão do ar. Para esse cálculo todas as outras variáveis devem permanecer inaltera-

das e as temperaturas devem ser expressas em Kelvin.

$$B_1 = \left(1 - \frac{T'_0}{T_0} \right) \cdot 100\%$$

Onde: B_1 - benefício pela redução da temperatura de admissão (%)

T_0 - temperatura de entrada do ar antes da redução (K)

T'_0 - temperatura de entrada do ar depois da redução (K)

12.7.2. Relação de pressão

Quanto menor a pressão de trabalho, menor será a relação de pressão e, conseqüentemente, menor o trabalho específico de compressão. Por esse motivo é de suma importância operar na pressão adequada para os equipamentos e controlar rigorosamente as perdas de carga. Pois muitas vezes, para compensar os aumentos nas perdas de carga, aumenta-se a pressão de trabalho do sistema. É importante ressaltar que a redução do custo operacional dos compressores normalmente compensa o investimento no projeto e na melhoria das redes de distribuição de ar comprimido. Uma outra forma de reduzir a relação de pressão do sistema de compressão de ar é manter os filtros de admissão sempre em bom estado. As perdas de carga nesses elementos fazem com que a pressão de admissão nos compressores seja reduzida e como resultado a relação de pressão aumenta.

Partindo-se da equação 12.2, pode-se também deduzir uma expressão que dê valor do benefício da redução da pressão e o para a variação da relação de pressão. Essa expressão também considera que todas as demais variáveis foram mantidas constantes.

$$B_2 = \frac{\left(\sqrt[n]{\frac{(P_2' + P_{atm})}{(P_1' + P_{atm})}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1}{\left(\sqrt[n]{\frac{(P_2 + P_{atm})}{(P_1 + P_{atm})}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1} \cdot 100\%$$

Sendo: B_2 - benefício da redução da relação de pressão (%)

P_{atm} - pressão atmosférica no local da instalação (bar)

P_1 - pressão na entrada do compressor antes das melhorias (bar)

P_2 - pressão na saída do compressor antes das melhorias	(bar)
P'_1 - pressão na entrada do compressor depois das melhorias	(bar)
P'_2 - pressão na saída do compressor depois das melhorias	(bar)
E - número de estágios do compressor	(/)
n - expoente politrópico da compressão	(/)

12.7.3. Compressão em estágios

O uso de equipamentos com mais estágios é uma outra alternativa para a redução do trabalho de compressão. O benefício dessa medida também pode ser quantificado com base na equação 12.2. Conforme mostra a expressão que segue. Os demais parâmetros são mantidos constantes.

$$B_3 = \frac{\left(\sqrt[E']{\frac{(P_2 + P_{atm})}{(P_1 + P_{atm})}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1}{\left(\sqrt[E_0]{\frac{(P_2 + P_{atm})}{(P_1 + P_{atm})}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1} \cdot 100\%$$

Onde: B_3 - benefício pelo uso de equipamentos com mais estágios	(%)
P_{atm} - pressão atmosférica no local da instalação	(bar)
P_1 - pressão na entrada do compressor	(bar)
P_2 - pressão na saída do compressor	(bar)
E_0 - número de estágios do compressor antes das melhorias	(/)
E' - número de estágios do compressor depois das melhorias	(/)
n - expoente politrópico da compressão	(/)

12.7.4. Vazamentos

Os vazamentos estão presentes em qualquer sistema de ar comprimido. Uma instalação apresenta vazamentos ao longo do seu funcionamento em maior ou menor escala. Com 6 meses de uso, podem apresentar índices de vazamentos de 10% ou mais.

A redução da vazão mássica em um sistema de ar comprimido implica diretamente em redução da potência consumida, como pode ser visto na equação 12.3. Essa redução dessa vazão pode ser alcançada diminuindo-se a vazão perdida pelos vazamentos. Essa medida traz bons resultados e exige, na maioria das vezes, medidas de caráter operacional e pequenos investimentos.

Não somente ocorrem vazamentos na rede de ar comprimido propriamente dita, como nos próprios equipamentos consumidores. Uma manutenção regular faz-se necessária em todo sistema, devido à deterioração natural de vedações, mangueiras, tubos, etc.

A seguir estão listadas algumas recomendações, com as quais estes vazamentos podem ser minimizados:

- Instalação de válvulas solenóides nas entradas de ar comprimido dos equipamentos. Desligando-se o equipamento, a válvula solenóide é fechada, eliminando uma fonte de vazamentos. É claro que essa medida não exclui a necessidade de manutenção do equipamento, necessária para reduzir os vazamentos durante a operação do mesmo.
- Operar sempre com a pressão mais baixa possível. Os vazamentos aumentam com o aumento da pressão de trabalho.
- Desligar o compressor de ar à noite, quando não há produção, pois nesse período o compressor trabalha somente para cobrir perdas por vazamento. Esse ponto parece óbvio, mas a experiência mostra que muitas vezes o compressor não é desligado.
- Os vazamentos de ar comprimido podem ser detectados usando técnicas simples com o uso de espuma de sabão ao longo ou com detectores ultrassônicos, marcando os pontos de formação de bolhas, para posterior correção pela manutenção.
- Por meio de campanhas internas pode ser institucionalizado o uso de marcadores fixados pontos em vazamentos que foram detectados pelos operadores.

A quantificação do ar comprimido que escapa pelos vazamentos deve ser comparada com a vazão que é realmente utilizada pelos equipamentos. Em instalações novas percentuais de vazamento de até 5% são toleráveis.

As medições para quantificação de vazamentos de ar comprimido devem ser realizadas com todos equipamentos que utilizam essa forma de energia, fora de serviço, evitando-se que ocasionais usos desses equipamentos possam introduzir erros nos resultados. Por esse motivo, as medições geralmente são realizadas em finais de semana, durante férias coletivas ou em outros períodos com a produção desativada.

Devem ser realizadas, no mínimo, três medições do mesmo tipo, trabalhan-

do-se com a média dos valores calculados de acordo com os dois métodos apresentados adiante, após expurgo de valores discrepantes.

Nos dois métodos a seguir, a medição deve ser iniciada após o reservatório ter sido enchido até a pressão de normal de trabalho, quando o compressor iniciar o trabalho em vazio ou se desligar, dependendo do controle utilizado. Em sistemas com vários compressores de ar em paralelo, convém manter todos desligados e isolados da rede de distribuição, exceto o compressor utilizado nas medições.

a) Medição por diferencial de pressão no reservatório

Este método é aplicado no caso da utilização de compressores que operam com modulação. Para fornecer resultados confiáveis, além do volume do reservatório é necessário conhecer o volume total da tubulação de ar comprimido. O teste consiste nos seguintes passos:

- Determinar o volume total do reservatório e da tubulação (m^3);
- Desligar todos os consumidores de ar comprimido;
- Elevar a pressão no reservatório até a pressão de operação (p_0);
- Fechar a válvula entre o compressor e o reservatório;
- Medir o tempo até que a pressão caia até um ponto arbitrário (p_1);

A vazão de ar comprimido que se perde nos vazamentos pode ser estimada pela expressão a seguir:

$$V_p = \frac{V}{t} \left(\frac{p_0 - p_1}{p_{atm}} \right)$$

Onde: V_p - vazão de ar comprimido perdida pelos vazamentos (m^3/s)

V - volume do reservatório e da tubulação (m^3)

p_0 - pressão no reservatório no início do teste (bar)

p_1 - pressão no reservatório no final do teste (bar)

p_{atm} - pressão atmosférica (bar)

t - tempo de medição total (s)

b) Medição do tempo em carga

Este método pode ser aplicado sem que o volume da tubulação seja conhecido, no entanto, a vazão do compressor tem de ser conhecida. Consiste em:

- Desligar todos os consumidores de ar comprimido;
- Ligar o compressor a ser utilizado para o teste e esperar que o mesmo coloque o reservatório de ar comprimido em sua pressão de trabalho normal;
- Com os consumidores desligados, mas com todas as saídas abertas, medir os tempos em carga do compressor durante pelo menos 5 ciclos da compressão (carga/alívio)
- Medir o tempo total necessário para completar os ciclos de compressão do teste.

A vazão de ar comprimido que é perdida pelos vazamentos pode ser avaliada pela equação seguinte:

$$V_p = V_c \cdot \frac{\sum_{i=1}^m t_{c_i}}{t_t}$$

Onde: V_p - vazão perdida pelos vazamentos (m³/s)

V_c - vazão do compressor (m³/s)

$\sum t_{c_i}$ - tempo em carga, durante a medição (s)

t_t - tempo total de medição (s)

m - número de ciclos de carga/alívio na medição (/)

O benefício energético que essas medidas podem trazer pode ser avaliado comparando-se a vazão média do sistema de ar comprimido com o valor da vazão perdida pelos vazamentos.

12.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Caso sejam necessárias informações mais completas e detalhadas sobre equipamentos, produção e uso do ar comprimido podem ser encontradas nas seguintes referências bibliográficas:

ATLAS COPCO. Compressed air engineering. Suécia: Atlas Copco Literature Department, 1971. 1 volume, 360 páginas.

COSTA, E. C. **Compressores**. 1a Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1988. 1 volume, 368 páginas

HAHN, A, **Programa de Eficientização Industrial - Compressores**. Rio de Janeiro: Eletrobrás / PROCEL, 2003. 1 volume, 88 páginas.

MACINTYRE A.J, **Instalações hidráulicas prediais e industriais**. 2a Edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara SA, 1988. 1 volume, 798 páginas.

NADEL, S.; SHEPARD, M. et al. **ENERGY-EFFICIENT MOTOR SYSTEMS: A Handbook on Tecnology, Programs and Policy Oppotunities**. USA: ACE3, [2000].

RODRIGUES, P.S.B. **Compressores industriais**. 1a Edição. Rio de Janeiro: EDC – Ed. Didática e Científica, 1991. 1 volume, 515 páginas.

SPIRAX SARCO, Manual de produtos para seu sistema de ar comprimido. 1a Edição. São Paulo: 1996. 1 volume, 120 páginas.

STREETER, V.L, WYLIE, E.B, **Mecânica dos fluidos**. 7a Edição. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1988. 1 volume, 583 páginas.

VAN WYLEN, J.G., SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica clássica**. 2a Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1991 . 1 volume, 565 páginas.

Capítulo 13

TRANSFORMADORES

Atualmente, a maior parte da energia elétrica gerada se dá em média tensão, na faixa entre 1 e 25 kV. No entanto, sabe-se que grandes blocos de energia são mais eficientemente transmitidos a longas distâncias utilizando-se tensões superiores a 138 kV. Por outro lado, a utilização segura desta energia em residências e em algumas indústrias implica que esta seja inferior a mil volts.

A compatibilização destes níveis de tensão é feita através do uso de transformadores que, baseado em fenômenos eletromagnéticos, permite que um bloco de energia possa ser transferido de um enrolamento denominado primário para um outro denominado secundário, com uma conveniente alteração no valor de tensão, resultando em uma alteração no valor da corrente na proporcão inversa.

Os transformadores, em geral, são máquinas muito eficientes. A ausência de partes em movimento, tais quais as de um motor de indução, permitem que eficiências da ordem de 96 a 99% sejam alcançadas nesta transferência de energia.

Sendo assim, os transformadores são equipamentos empregados em todas as fases do processo de produção e uso de energia elétrica, incluindo a sua transmissão e distribuição. Praticamente toda a energia elétrica gerada no país passa necessariamente por um ou mais transformadores, de modo que, mesmo sendo alta a eficiência destes equipamentos, o repetido processo de compatibilização de níveis de tensões através do seu uso, resulta em perdas significativas que devem ser devidamente consideradas e esforços devem ser envidados para que sejam reduzidas.

Observe-se porém que ao considerar-se somente a questão da eficiência, pode-se incorrer em uma visão distorcida do que realmente ocorre com as perdas. Em outras palavras, sendo a eficiência simplesmente uma relação entre a potência de saída e a potência de entrada, perde-se o sentimento de como se comportam as perdas e de sua magnitude. Embora as perdas possam ser pequenas em termos relativos, podem ser bastante significativas em termos absolutos.

Estima-se que cerca de 14% de toda energia elétrica gerada no Brasil são considerados perdas globais (técnicas e comerciais) em transmissão e distribuição, e que aproximadamente 30% das perdas técnicas concentram-se nos núcleos dos transformadores de distribuição.

As figuras a seguir apresentam os resultados de um levantamento realizado nos Estados Unidos, mostrando a contribuição de alguns elementos sobre as perdas totais do sistema de concessionárias privadas e públicas.

Em ambos os casos, cerca de 20% a 40% das perdas se dão em transformadores. É baseado neste índice que este capítulo procura trabalhar a eficiência energética em transformadores, abordando aspectos de projetos, materiais e operação eficientes.

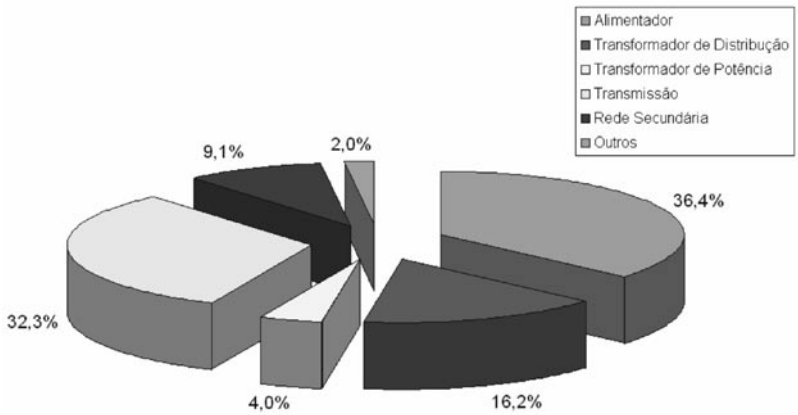


Figura 13.1 – Perdas na concessionária privada (Kennedy, 1998)

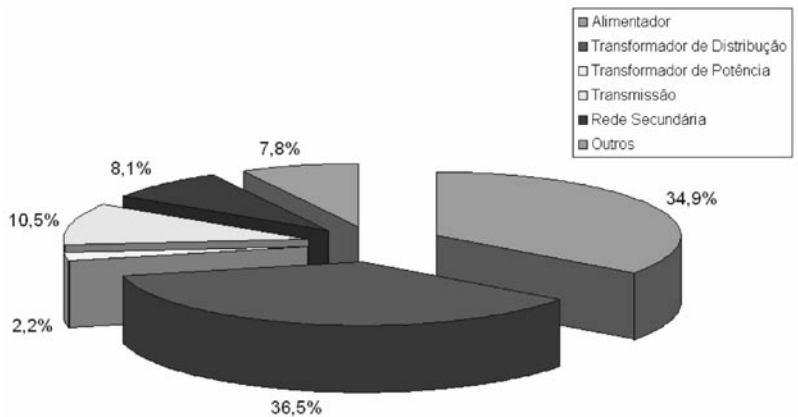


Figura 13.2 – Perdas na concessionária pública (Kennedy, 1998)

13.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

O transformador é um dispositivo sem partes móveis que transfere energia de um sistema elétrico em corrente alternada para outro. A energia é sempre transferida sem alteração de frequência, mas, normalmente, com mudança no valor da tensão e da corrente.

Os transformadores são peças indispensáveis dentro do campo do aproveitamento de energia elétrica, pois o fato de permitir elevar e reduzir tensões, com simplicidade e elevado eficiência tornou-se economicamente possível o uso da energia elétrica. Como o transformador não possui peças rotativas, este equipamento requer poucos cuidados e a despesa de sua manutenção é mínima.

O transformador típico consiste em um núcleo de aço-silício onde são bobinados dois enrolamentos isolados eletricamente do núcleo e entre si. O seu princípio de funcionamento é através de indução eletromagnética. Ao se aplicar uma tensão a um desses enrolamentos (denominado primário), com conseqüente circulação de corrente, será estabelecido um fluxo magnético. Este fluxo magnético irá entrelaçar com o outro enrolamento (secundário), produzindo no mesmo uma força eletromotriz (tensão) que depende, dentre outros fatores, do número de espiras dos enrolamentos. O núcleo tem a função de providenciar um melhor caminho para o fluxo magnético. Chama-se de primário o enrolamento que recebe a energia e secundário o enrolamento que entrega a energia. Qualquer dos enrolamentos do transformador poderá ser o primário ou secundário.

O transformador pode ser basicamente dividido nos seguintes componentes:

- Enrolamentos;
- Núcleo;
- Tanque e meio refrigerante;
- Acessórios.

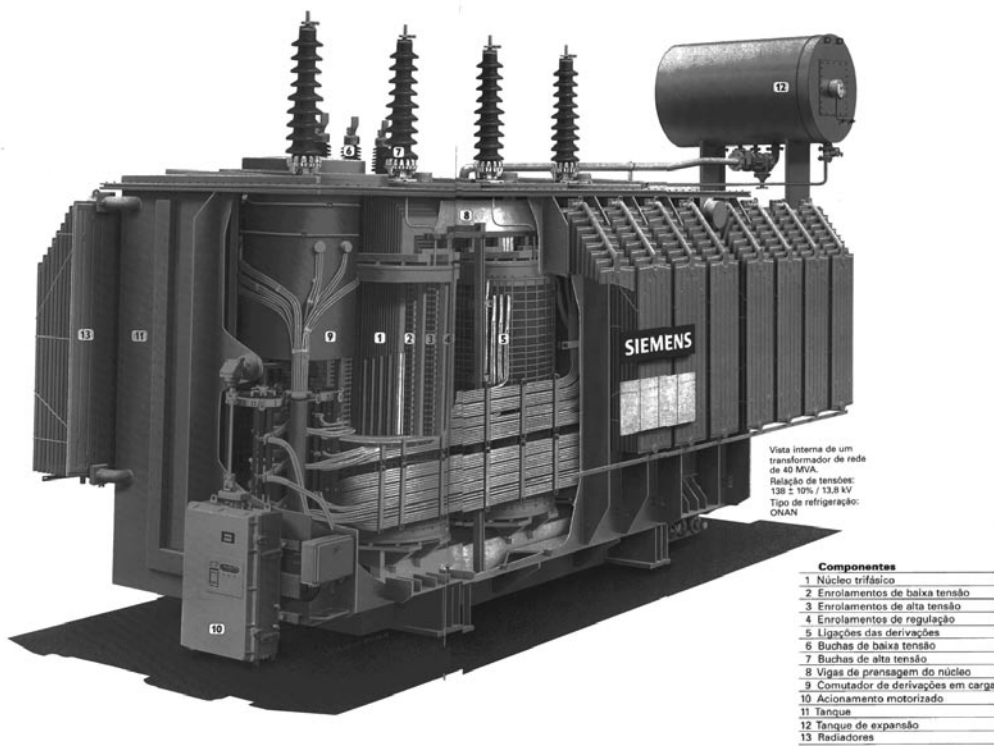


Figura 13.3 – Desenho esquemático de um transformador (Siemens)

Os enrolamentos são constituídos de fios de cobre, isolados com esmalte ou papel, de seção retangular ou circular.

O núcleo é constituído por um material ferromagnético, em chapas finas, isoladas entre si, contendo em sua composição o silício, que lhe proporciona características excelentes de magnetização e perdas reduzidas.

O conjunto formado pelos enrolamentos e pelo núcleo é denominado de parte ativa do transformador.

O tanque é destinado a servir de invólucro da parte ativa e de recipiente para o óleo isolante. O óleo isolante tem a finalidade de propiciar isolamento elétrico entre os componentes do transformador e dissipar para o exterior o calor gerado nos enrolamentos e no núcleo. Este óleo pode ser óleo mineral (parafínico ou naftênico) ou fluídos isolantes a base de silicone. Antigamente eram usados askarel e piranol que hoje estão proibidos por serem nocivos a saúde. Transformadores de pequena potência podem ter sua parte ativa envolta pelo ar ambiente, que são denominados transformadores a seco.

Os acessórios constituem os terminais, buchas, parafusos, tampas, sensores, relés, reguladores, ventiladores, radiadores, etc, destinados a auxiliar o funcionamento do transformador.

As buchas são dispositivos que permitem a passagem dos condutores dos enrolamentos ao meio externo, e são constituídas por um corpo isolante, terminal e vedações.

Toda a energia consumida em um transformador precisa dissipar-se na forma de calor. O calor gerado na parte ativa se propaga através do óleo e é dissipado no tanque. As elevações de temperatura de óleo e dos enrolamentos são normalizadas e devem ser limitadas para evitar a deterioração do isolamento e do óleo. Quanto maior a potência do transformador mais difícil se torna a dissipação deste calor, pois a potência do transformador e conseqüentemente suas perdas crescem com mais rapidez que a superfície disponível para a emissão de calor. Dependendo da potência do transformador a área da superfície externa poderá ser insuficiente para dissipar este calor e neste caso, é necessário aumentar a área de dissipação. Para tal, usam-se radiadores que poderão ser de tubos ou chapa estampada. Utilizam-se também ventiladores instalados do lado de fora do transformador, para auxiliar esta dissipação (ventilação forçada).

Para adequar a tensão primária do transformador à tensão de alimentação, ou para controlar e regular a tensão na saída do mesmo, os enrolamentos primário e/ou secundário podem ser dotados de derivações (taps). Estes taps podem ser escolhidos mediante a utilização de um comutador instalado junto à parte ativa, dentro do tanque. O comutador, conforme projeto e tipo construtivo, pode ser operado com o transformador em funcionamento (sob carga) ou com o transformador desligado da rede.

Os transformadores das subestações de alta tensão podem ser classificados de acordo com suas funções:

- Transformadores elevadores, cuja função é elevar a tensão de geração para tensão de transmissão;
- Transformadores de interligação, cuja função é interligar partes do sistema de transmissão;
- Transformadores abaixadores, cuja função é reduzir a tensão de transmissão para a tensão da subtransmissão ou de distribuição.

Os transformadores podem ainda ser classificados de outras maneiras, por exemplo, quanto à finalidade, material e forma do núcleo, número de fases, disposição dos enrolamentos, maneira de dissipar o calor, etc.

Os transformadores podem ser construídos em unidades monofásicas e conectados em número de três para constituir um banco, ou então ser uma única peça constituída de três transformadores montados num mesmo núcleo, denominado transformador trifásico. Os transformadores trifásicos têm a vantagem de possuírem um peso menor e ocupam um espaço inferior ao requerido pelo banco de capacidade equivalente, além de ter um custo mais baixo. O inconveniente é a necessidade de desligar todo o transformador quando ocorrer um problema em uma das fases.

Um tipo usual de transformador é o de múltiplos enrolamentos, que permite a operação com diversas tensões em seus terminais. O mais utilizado é o transformador de três enrolamentos, nos quais dois dos enrolamentos interligam sistemas de tensões diferentes e o terceiro serve para alimentar serviços auxiliares e cargas. A maioria dos transformadores utilizados no Sistema Interligado Nacional é deste tipo. O transformador de três enrolamentos também é usado em subestações de usinas, conectando dois geradores ao barramento elevador. Neste caso os dois enrolamentos primários são de mesma tensão e o secundário de outra tensão.

Um outro tipo muito utilizado é o autotransformador no qual uma porção de seu enrolamento serve em comum tanto para o circuito primário como secundário. O autotransformador também pode ser de três enrolamentos.

Os transformadores instalados em sistemas de distribuição têm, basicamente, a função de reduzir a tensão de um nível mais elevado, de transmissão ou de subtransmissão, para um nível mais baixo de distribuição. Na própria distribuição podem existir diversos estágios de transformação como, por exemplo, redução da tensão de 69 kV para 34,5 kV e posteriormente para 13,8 kV, na rede de distribuição primária, e ainda com redução de 13,8 kV para 220/127 V, na rede de distribuição secundária.

A figura a seguir apresenta uma vista explodida de um transformador de distribuição, mostrando suas principais partes componentes.

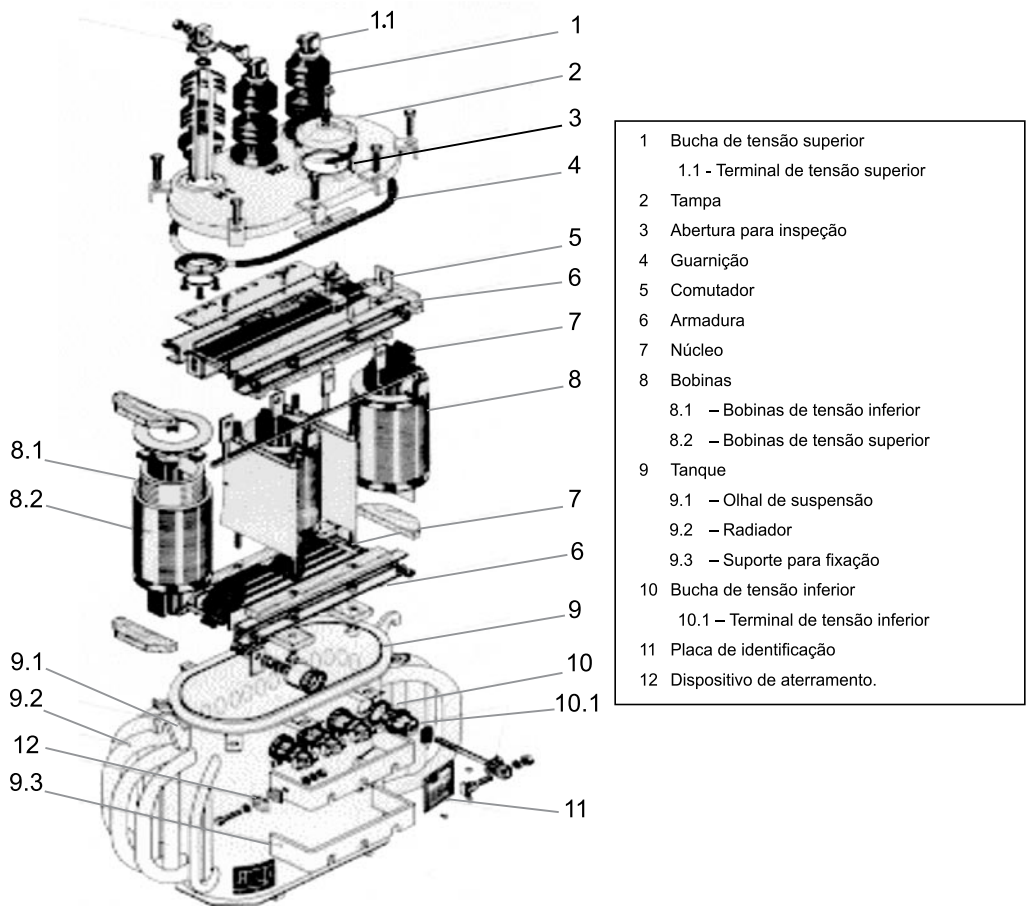


Figura 13.4 – Transformador em corte

Existem situações onde os transformadores podem ser utilizados para converter a tensão de um nível mais baixo para um nível mais elevado, em redes de distribuição. Estas condições ocorrem quando estão presentes unidades geradoras, nestes sistemas, operando como cogeração, ou como geração distribuída (GD).

Em função da intensa aplicação observada para os transformadores em sistemas de distribuição, é de fundamental importância que se conheça a influência dos mesmos em termos de perdas elétricas. Para tanto, os itens seguintes descrevem, sucintamente, as principais características representativas destes elementos.

13.2. PERDAS ELÉTRICAS EM TRANSFORMADORES

Em um transformador há três circuitos distintos que devem ser considerados, o elétrico, o magnético e o circuito dielétrico. Em cada um desses circuitos ocorrem

perdas que podem ser subdivididas da seguinte forma:

a) Perdas no circuito elétrico:

- Perdas por $R \cdot I^2$ devido à corrente de carga;
- Perdas por $R \cdot I^2$ devido à corrente de excitação;
- Perdas por correntes parasitas nos condutores devido ao fluxo de dispersão.

b) Perdas no circuito magnético:

- Perdas por histerese no núcleo;
- Perdas por correntes parasitas, ou de Foucault, no núcleo;
- Perdas por dispersão das correntes parasitas no núcleo através dos grampos, parafusos, etc.

c) Perdas no circuito dielétrico:

Essas perdas são normalmente incluídas nas perdas no ferro.

Quando são medidas as várias perdas, em um transformador, estas são automaticamente agrupadas em duas:

1) Perdas sem carga (conhecidas como perdas no ferro):

- Perdas por $R \cdot I^2$ devido à corrente de excitação;
- Perdas por histerese no núcleo;
- Perdas por correntes parasitas, ou de Foucault, no núcleo;
- Perdas por fuga de correntes parasitas no núcleo através dos grampos, parafusos, etc.

2) Perdas com carga (conhecidas como perdas no cobre):

- Perdas por $R \cdot I^2$ devido à corrente de carga;
- Perdas por correntes parasitas nos condutores devido ao fluxo de dispersão.

Para que um transformador possa ter uma eficiência alta todas essas perdas devem ser reduzidas ao mínimo. Entretanto é interessante considerar primeiramente as características que determinam suas magnitudes e posteriormente as providências que devem ser tomadas para que elas sejam reduzidas.

13.2.1. Perdas no Circuito Elétrico

a) Perdas por $R \cdot I^2$ devido à corrente de carga

Como o próprio nome diz essas perdas são iguais à soma dos quadrados das correntes, multiplicados pelas resistências dos vários enrolamentos. Como as correntes são determinadas por uma carga, não é possível reduzir seu valor com o intuito de diminuir as perdas. O único fator, entretanto, que pode ser modificado para reduzir as perdas ao mínimo, é o valor das resistências dos enrolamentos. Para que isto seja obtido, é necessário que a seção dos condutores deva aumentar o máximo possível e seu comprimento ser reduzido ao máximo. Aumentar a seção dos condutores, certamente reduz a resistência e conseqüentemente as perdas por $R \cdot I^2$. Isto, porém, tende a aumentar o tamanho do transformador, com conseqüente elevação das perdas no circuito magnético. Outro fator que pode ser razoavelmente variado é o comprimento dos condutores.

b) Perdas por $R \cdot I^2$ devido à corrente de excitação

Essas perdas são muito pequenas, pois as correntes de excitação dos transformadores não excedem a 5% da corrente nominal, sendo que em grandes transformadores estão na ordem de 1 a 2%. Como as perdas são dadas pelo quadrado da corrente, para uma corrente de 5% da nominal as perdas são de 0,25% das perdas que o transformador teria em plena carga. Portanto essas perdas podem ser desprezadas.

c) Perdas por correntes parasitas nos condutores devido ao fluxo de dispersão

Essas perdas são causadas por correntes parasitas em cada condutor que é atravessado pelo campo magnético de dispersão, essas perdas são muito difíceis de serem calculadas com um bom grau de precisão, no entanto sua magnitude pode ser estimada. Várias expressões têm sido propostas para o cálculo dessas perdas, porém há muitos fatores que contribuem nesse cálculo. Assim sendo é mais prático, e usual, adicionar um percentual, correspondente a essas perdas, nas perdas do tipo $R \cdot I^2$ devido à corrente de carga, ao invés de tentar calculá-la por meio de fórmulas. A percentagem que é adicionada se baseia em experimentos com um particular tipo de transformador, mediante considerações. Para que essas perdas sejam reduzidas ao máximo, primeiramente devem ser considerados os fatores que tendem a aumentá-la e diminuí-la. Em geral as referidas perdas são aproximadamente proporcionais ao quadrado da densidade do fluxo de dispersão, a massa total de cobre do transformador, e ao quadrado da dimensão de cada condutor pelos quais passam o fluxo de dispersão. Como o fluxo de dispersão e a massa total de cobre são usualmente fixos, por outras considerações, o único fator que se pode variar é a dimensão individual de cada condutor por onde passa o fluxo de dispersão, e essa dimensão deve ser a menor possível subdividindo os condutores e isolando-os uns dos outros.

13.2.2. Perdas no Circuito Magnético

a) Perdas por histerese no núcleo

Essas perdas dependem, sobretudo, da qualidade do núcleo usado e é calculada através de curvas fornecidas pelos fabricantes do núcleo magnético. Elas são proporcionais ao peso do material usado, e variam de acordo com a densidade do fluxo. Para minimizar essas perdas deve-se diminuir o peso do material o máximo possível e não ter uma densidade de fluxo excessiva. No entanto, deve-se observar que, diminuir a densidade de fluxo, tendo como objetivo diminuir as perdas por histerese, acarreta o uso de maior quantidade de material ferromagnético, o que produz aumento no comprimento dos fios de cobre nos enrolamentos, aumentando assim as perdas por $R.I^2$.

b) Perdas por correntes parasitas de Foucault no núcleo

Essas perdas dependem da densidade de fluxo empregada, da qualidade do material do núcleo, da espessura das lâminas do núcleo e da eficiência da isolamento entre as placas do núcleo.

A maioria das observações considerando as perdas por histerese também se aplica às perdas por correntes parasitas no núcleo. Usualmente estas duas perdas são calculadas juntas por curvas fornecidas pelo fabricante do núcleo. As perdas para uma dada quantidade de material podem ser reduzidas diminuindo a espessura das lâminas do núcleo.

No entanto, a redução da espessura dessas lâminas, de forma indevida apresenta as seguintes desvantagens:

- Se a espessura das lâminas é muito reduzida, a soma total das camadas isolantes entre elas torna-se muito grande, com conseqüente incremento nas dimensões do equipamento;
- Quanto mais finas forem as lâminas, maior é a dificuldade para agrupá-las no núcleo do transformador, e se a espessura for muito reduzida a sua vantagem na tentativa de obter ganhos quanto às perdas no ferro pode ser inútil, por causa de junções ruins das lâminas. Também, a construção do núcleo com lâminas finas não é tão resistente mecanicamente como uma com lâminas mais espessas.

As características de excitação de um transformador são determinadas exclusivamente pelo projeto e pelos materiais que compõem o núcleo magnético. Desta forma, sendo conhecidos o peso, o tipo de material, a estrutura, e a densidade de fluxo do núcleo, as características de excitação podem ser calculadas, incluindo até mesmo os harmônicos. Ainda mais, desde que diferenças na qualidade, estrutura, e densidade de fluxo entre diferentes tamanhos de transformadores são relativamen-

te pequenas, em comparação com a diferença em seus pesos, é possível fazer uma estimativa das perdas no núcleo de um dado transformador, com base nos dados de outros, fazendo relação em termos dos pesos correspondentes.

13.2.3. Perdas por Fuga de Correntes Parasitas no Núcleo

Essa perda é muito difícil de ser determinada e como no caso das correntes parasitas nos condutores é usualmente admitido adicionar uma porcentagem, que é determinada por experiências, às perdas no núcleo magnético, as quais são calculadas por curvas fornecidas pelos fabricantes do material ferromagnético. Para minimizar essas perdas deve-se ter cuidado com a disposição dos grampos.

13.2.4. Perda por Fuga de Correntes Parasita no Tanque

Estas perdas são similares à anterior, exceto que elas aumentam as perdas no cobre e é usualmente admitida da mesma forma (adicionando uma porcentagem ao invés de ser calculada através de fórmulas). Mediante as condições de carga elas podem perfeitamente alcançar grandes proporções, principalmente se as correntes do secundário forem altas.

13.2.5. Dissipação de Calor

O problema de se manter a temperatura de um transformador em limites seguros não tem grande significância para pequenos transformadores. Contudo, a lei natural de que o calor para ser dissipado aumenta com o cubo da dimensão linear e a área pela qual o calor deve passar aumenta apenas com o quadrado da dimensão linear, adicionado ao fato de que, em grandes unidades, o calor tem que viajar por uma longa distância para alcançar o lado de fora, tem dado razão para inúmeros problemas térmicos, verificados em grandes unidades. Naturalmente, tem-se focado no design de tanques para uma eficiente dissipação de calor, e isto tem resultado no desenvolvimento de uma variedade de métodos de resfriamento de grandes transformadores. Os equipamentos acessórios de grandes transformadores, que mais chamam a atenção, são os vários dispositivos de resfriamento, ou seja, tubos de resfriamento e radiadores, localizados na superfície dos tanques, em muitos casos suplementados por uma bateria de ventiladores, ou sistemas de resfriamento consistindo de coolers e dutos.

13.3. CÁLCULO DAS PERDAS EM UM TRANSFORMADOR

As perdas em um transformador, conforme discutido anteriormente, são calculadas basicamente através de duas parcelas: perdas no cobre e perdas no ferro. A

forma de cálculo das mesmas é mostrada a seguir.

Cálculo das perdas no cobre

As perdas ôhmicas de um enrolamento “i” qualquer de um transformador podem ser calculadas através da seguinte expressão:

$$P_i = R_i \cdot I_i^2$$

Portanto, para o cálculo da perda ôhmica total no transformador (P_c) deve-se considerar:

$$P_c = \sum_i^n R_i \cdot I_i^2$$

Onde “n” corresponde ao número total de enrolamentos existentes no equipamento.

Cálculo das perdas no ferro

As perdas no ferro, ou no núcleo, de um transformador, podem ser calculadas através de expressões empíricas, como as descritas a seguir:

- Perdas por histerese:

$$P_h = K_h \cdot v \cdot f \cdot (B_{\max})^n$$

Onde: P_h - Perda por histerese (W);

K_h - coeficiente amplamente variável;

n - expoente variando entre 1,5 e 2,5;

v - volume do núcleo magnético;

f - frequência da fonte em Hz;

B_{\max} - densidade máxima de fluxo magnético.

Os valores K_h e n dependem do tipo de material considerado.

- Perdas por Foucault (correntes parasitas):

$$P_f = K_f \cdot v \cdot \tau^2 \cdot f^2 \cdot (B_{\max})^2$$

Onde: P_f - Perdas por Foucault (W)

K_f - coeficiente de Foucault (amplamente variável e dependente do tipo de material)

- v - volume do núcleo magnético;
- τ - espessura das chapas;
- f - frequência da fonte em Hz;
- B_{\max} - densidade máxima de fluxo magnético.

- Perdas totais no núcleo:

As perdas totais no núcleo, por efeito Joule, correspondem às perdas por histerese mais Foucault.

Portanto,

$$P_c = P_h + P_f$$

Onde: P_c - perdas totais no núcleo.

Através das expressões empíricas de cálculo das perdas por histerese e Foucault tem-se para a perda total no ferro:

$$P_c = K_h \cdot v \cdot f \cdot (B_{\max})^n + K_f \cdot v \cdot \tau^2 \cdot f^2 \cdot (B_{\max})^2$$

Em geral, as perdas no cobre e no ferro de um transformador são obtidas, ou através da forma apresentada, que é muito utilizada no projeto do equipamento, ou através de ensaios de campo, como os ensaios em vazio e em curto-circuito.

13.4. CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE UM TRANSFORMADOR

A eficiência de um transformador, para qualquer condição de carga e qualquer fator de potência (FP), corresponde a:

$$\eta = \left\{ 1 - \frac{\text{percentagem de perdas no ferro} + \text{percentagem de perdas no cobre}}{(\text{FP} \cdot 100) + \text{percentagem de perdas no ferro} + \text{percentagem de perdas no cobre}} \right\} \cdot 100$$

A porcentagem de perdas a serem inseridas na expressão anterior é determinada para a carga em consideração, assumindo que para um dado fator de carregamento, f_c , a parcela de perdas no ferro é $1/f_c \cdot P_f$ e a parcela de perdas no cobre é $f_c \cdot P_c$, como indicado na tabela a seguir.

Carga	5/4	1/1	3/4	1/2	1/4
Percentagem de perda no ferro	$4/5P_f$	P_f	$4/3P_f$	$2P_f$	$4P_f$
Percentagem de perda no cobre	$5/4P_c$	P_c	$3/4P_c$	$1/2P_c$	$1/4P_c$

Onde: P_f - percentagem de perda no ferro com tensão normal

P_c - percentagem de perda no cobre com carga total

Exemplo

Considere um transformador trifásico de 1000 kVA, 60 Hz, 6600/433 V, operando com carga total, onde são observadas as seguintes perdas:

(a) perdas no ferro = 1770 W;

(b) perdas no cobre = 11640 W.

a) Com carga total e fator de potência unitário tem-se:

$$\text{Porcentagem de perda no ferro} = \frac{1770 \cdot 100}{1000 \cdot 1000} = 0,177\%$$

$$\text{Porcentagem de perda no cobre} = \frac{11640 \cdot 100}{1000 \cdot 1000} = 1,164\%$$

$$FP = 1,0$$

$$\text{Porcentagem de eficiência} = \left\{ 1 - \frac{0,177 + 1,164}{(1100) + 0,177 + 1,164} \right\} \cdot 100 = 98,67\%$$

b) Com 5/4 de carga com fator de potência unitário:

$$\text{Porcentagem de perda no ferro} = \frac{4}{5} \cdot 0,177 = 0,142\%$$

$$\text{Porcentagem de perda no cobre} = \frac{5}{4} \cdot 1,164 = 1,455\%$$

$$FP = 1,0$$

$$\text{Porcentagem de eficiência} = \left\{ 1 - \frac{0,142 + 1,455}{(1100) + 0,142 + 1,455} \right\} \cdot 100 = 98,43\%$$

c) Com 3/4 de carga e $FP = 0,8$

$$\text{Porcentagem de perda no ferro} = \frac{4}{3} \cdot 0,177 = 0,236\%$$

$$\text{Porcentagem de perda no cobre} = \frac{3}{4} \cdot 1,164 = 0,874\%$$

$$\text{Porcentagem de eficiência} = \left\{ 1 - \frac{0,236 + 0,874}{(0,8 \cdot 1000) + 0,236 + 0,874} \right\} \cdot 100 = 98,90\%$$

13.5. OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES EM PARALELO

Uma das mais importantes operações com transformadores é a conexão de unidades em paralelo. Este procedimento, quando bem efetuado, traz consigo muitas vantagens, tais como um aumento tanto na confiabilidade do sistema, como também na capacidade de fornecimento de energia.

No entanto, para que dois ou mais transformadores possam operar em paralelo, algumas condições devem ser observadas, visando eliminar ou reduzir ao máximo, as possíveis correntes de circulação que possam existir. Estas condições se resumem em duas fundamentais (F) e outras duas preferenciais (P):

- Mesma relação de transformação (F);
- Mesmo grupo de defasamento angular (F);
- Mesma impedância percentual (P); e,
- Mesma relação R/X (P).

Depois de efetuado o paralelismo, a repartição de carga entre os transformadores se dá automaticamente em função das suas impedâncias percentuais, regida pelas duas leis de Kirchhoff, ou seja, a lei dos nós e a lei dos laços. A distribuição de potência entre transformadores em paralelo é regida pela seguinte expressão:

$$S_i = \frac{S_c}{\sum_{k=1}^n \frac{S_{Nk}}{S_{Ni}} \cdot \frac{Z_i}{Z_k}}$$

Onde: n - número de unidades transformadoras em paralelo;

S_c - potência da carga (kVA);

S_i - potência que flui pelo i-ésimo transformador (kVA);

S_{Nk} - potência nominal do k-ésimo transformador (kVA);

S_{Ni} - potência nominal do i-ésimo transformador (kVA);

z_k - impedância percentual do k-ésimo transformador (%);

z_i - impedância percentual do i-ésimo transformador (%).

13.6. NOVAS TECNOLOGIAS

Transformadores com eficiência elevada já estão disponíveis comercialmente. Atualmente, já existe tecnologia disponível para que fabricantes possam fornecer transformadores com diferentes índices de perdas. A escolha da tecnologia a ser utilizada dependerá do nível de importância dada às perdas e à sua consideração no cálculo dos custos de investimento e operacionais. A busca de transformadores de alta eficiência tem levado os fabricantes a pesquisarem novos materiais com o objetivo de produzir transformadores com índices cada vez menores de perdas.

A redução dessas perdas ao longo dos anos se deve principalmente ao desenvolvimento de novos materiais empregados na construção dos núcleos e enrolamentos dos transformadores. Com o advento do transformador com núcleo de aço amorfo de baixas perdas na década de 1980 e com a larga utilização de metodologias de avaliação, a indústria de transformadores alcançou uma redução das perdas em vazio e em carga.

A seguir apresentam-se os principais desenvolvimentos relacionados à aplicação de novas tecnologias em projetos de transformadores mais eficientes.

13.6.1. Formato de condutores avançados

Nos últimos 20 anos a indústria de transformadores vem procurando formatos diferentes para os condutores visando melhorar a eficiência dos transformadores. Os condutores de alumínio vêm sendo substituídos por condutores de cobre devido à sua baixa resistência elétrica e alta resistência mecânica à tração.

Um dos últimos desenvolvimentos na forma dos condutores foi a utilização de condutores planos na forma de tiras. Os condutores planos reduzem as perdas por correntes parasitas e permitem que uma quantidade maior de cobre seja instalada em espaços menores.

Testes realizados em transformadores de força de uma distribuidora permitiram calcular a redução de perdas comparando transformadores com condutores convencionais e os condutores planos (avançados). Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas seguintes:

Tabela 13.1 - Comparação de transformador 48/64/80 MVA Convencional e Avançado

Característica do transformador	Convencional	Avançado	Melhoria
Peso do núcleo e enrolamento (1000 kg)	89,36	84,46	5,5 %
Perda a vazio (kW)	21,5	19,3	10,4 %
Perda em carga (kW)	90,8	76,6	17,0 %
Perda total (kW)	112,3	95,9	14,6 %

Tabela 13.2 - Comparação de transformador 48/64/80 MVA Convencional e Avançado

Característica do transformador	Convencional	Avançado	Melhoria
Peso do núcleo e enrolamento (1000 kg)	68,49	63,50	7,1 %
Perda a vazio (kW)	83,7	69,4	17,1%
Perda em carga (kW)	82,0	73,4	10,5 %
Perda total (kW)	165,7	142,8	13,8 %

Deve-se observar que além da redução das perdas nos condutores, há uma sensível redução no peso do transformador, já que os condutores avançados ocupam 30% menos espaço.

13.6.2. Aço silício de baixas perdas

Um transformador com núcleo de aço silício de baixas perdas é um equipamento cujo núcleo é projetado e construído para minimizar as perdas em vazio. A partir do momento que as distribuidoras de energia e consumidores industriais começaram a avaliar as perdas na década de 70, os fabricantes têm se empenhado para reduzir as perdas nos transformadores com núcleo de aço silício.

Esforços neste sentido permitiram uma redução das perdas em vazio em transformadores com núcleo de silício da ordem de 50% nos últimos 30 anos. Esta redução das perdas em vazio foi obtida através de:

- Melhoria na produção do aço silício;
- Melhoria da laminação do aço;
- Melhoria do empacotamento do núcleo;
- Utilização de modelos computacionais para otimização da geometria do núcleo.

13.6.3. Construção do núcleo

Uma maneira de minimizar as perdas em vazio é através da redução na espessura das lâminas do núcleo e da isolação elétrica entre elas, no que resulta em uma redução dos circuitos percorridos por correntes parasitas e conseqüente redução das perdas.

A redução da espessura das lâminas de aço silício com cristais orientados iniciou-se em 1934 com a introdução do processo de laminação a frio de dois estágios. Na década de 80 uma espessura ainda mais fina foi desenvolvida. Atualmente, dipõe-se da tecnologia de corte a laser para o fatiamento de núcleos de aço silício, cortando-o em tiras paralelas à superfície.

As perdas oriundas da circulação de correntes parasitas também podem ser bastante reduzidas com a construção de lâminas limpas e sem rebarbas, obtidas através do uso de máquinas laminadoras mais precisas. Além disso, o empacotamento do núcleo também tem resultado na redução dessas perdas. No entanto, a maior redução das perdas em vazio ocorreu com a introdução dos núcleos de metal amorfo nos transformadores de distribuição. Isto resultou numa redução de mais de 80% sobre os núcleos de aço silício convencionais.

13.6.4. Utilização de metal amorfo

Apesar dos transformadores de distribuição de metal amorfo estarem sendo utilizados desde 1982, estes são tidos como a última tecnologia emergente para melhorar a eficiência de transformadores.

A tecnologia de transformadores com núcleo de metal amorfo permite reduzir as perdas através da otimização da estrutura cristalina do núcleo. Diferentemente do aço silício, cujos átomos se arranjam em uma estrutura cristalina ordenada, os átomos do metal amorfo não é cristalino. Esta estrutura molecular não cristalina se assemelha à do vidro e é frequentemente conhecido como metal vítreo.

Devido às suas propriedades magnéticas particulares, suas perdas por histerese são muito baixas. Em função da pequena espessura das lâminas, geralmente de 7 a 12 vezes mais fina que as obtidas com aço silício, o metal amorfo apresenta também baixas perdas com correntes parasitas.

Desta forma, a combinação de baixa histerese e menores correntes parasitas resultam em novos transformadores com cerca de 70% a 80% menos perdas de energia se comparados com os transformadores com núcleo de aço silício.

A tabela a seguir apresenta uma comparação da perda em vazio entre trans-

formadores convencionais com núcleo de aço silício, transformadores com núcleo de aço silício de baixa perda e transformadores com núcleo de metal amorfo.

Tabela 13.3 - Comparação dos valores de Perdas em vazio (W)

Potência (kVA)	Silício típico	Silício de baixas perdas	Amorfo
Monofásicos			
10	60	30	11
25	100	50	20
50	210	105	32
75	260	130	39
100	320	160	54
Trifásicos			
75	370	185	67
150	540	270	107
300	950	475	185
500	1400	710	260
750	1750	875	310
1000	2400	1200	420
1500	3600	1800	555
2000	4000	2000	750
2500	4800	2400	850

Mesmo demandando maiores investimentos, a utilização dos transformadores com núcleo de metal amorfo se viabiliza ao quantificar-se os ganhos energéticos em relação aos transformadores convencionais. A economia obtida pode ser facilmente determinada através de ensaios comparativos. As perdas em vazio não dependem da carga do transformador e a economia com a sua redução permanece durante toda a vida útil do equipamento.

Adicionalmente, a utilização de transformadores de metal amorfo por parte de distribuidoras de energia pode ser considerado como uma medida de conservação de energia e gerenciamento pelo lado da demanda, não resultando em perda no faturamento.

13.7. OPERAÇÃO OTIMIZADA

Os critérios mais comumente empregados para a especificação e análise de carregamento de transformadores fundamentam-se principalmente em limites térmicos, perda de vida, ciclo de operação e em condições ambientes. Ou seja, diz-se por exemplo para um transformador 55°C que a sua potência nominal é aquela que fluindo continuamente pelo mesmo, provoca nos seus enrolamentos uma elevação de temperatura média acima da temperatura ambiente de 55°C, considerando-se, ainda, que a temperatura no ponto mais quente não pode exceder os 95°C.

A análise de carregamento é muito importante, sobretudo porque os transformadores são os equipamentos mais caros dentro de uma subestação, onde exercem a sua função principal. Como o investimento nestes equipamentos é de longa maturação, torna-se imperativo que durante a fase de planejamento haja uma preocupação de evitar a ocorrência de sobrecargas que possam provocar riscos ou danos, resultando em uma redução da expectativa de vida útil e níveis de confiabilidade dos transformadores.

Neste item é apresentado um procedimento alternativo para a seleção e aplicação de transformadores, considerando não somente os aspectos técnicos, mas também os econômicos. Dado um conjunto de alternativas possíveis, a metodologia proposta, implementada sob a forma de um processo de otimização, seleciona automaticamente qual o transformador, ou transformadores, que devem compor a configuração da subestação para o perfeito atendimento da demanda.

13.7.1. Fator de carregamento ótimo

Nas seções anteriores foram apresentadas equações para a determinação do eficiência de operação de transformadores. A equação a seguir, no entanto, apresenta esta eficiência como uma função de dados fornecidos pelos fabricantes, constantes da placa do transformador e do fator de carregamento.

$$\eta = \frac{F_c \cdot S_N \cdot FP}{F_c \cdot S_N \cdot FP + F_c^2 \cdot P_{JN} + 1,2 \cdot P_o} \cdot 100$$

onde: η - eficiência de operação (%);

F_c - fator de carregamento (pu);

S_N - potência nominal (kVA);

FP - fator de potência da carga;

P_o - perdas em vazio (kW);

P_{JN} - perda em carga nominal (kW).

Derivando-se esta expressão em relação ao fator de carregamento, pode-se obter o ponto de carga correspondente à máxima eficiência, que é dado por:

$$F_c^* = \sqrt{\frac{1,2 \cdot P_o}{P_{JN}}}$$

onde: F_c^* - fator de carregamento ótimo (pu).

É importante observar que carregar um transformador próximo à sua potência nominal implica em um expressivo aumento das perdas (note-se que as perdas em carga são proporcionais ao quadrado da corrente de carga). Neste sentido, o carregar um transformador tendo como critério o seu limite térmico, além de expor o transformador a uma maior probabilidade de falha, contribui decisivamente para uma ineficiência da sua aplicação e, portanto, deve ser reavaliado.

13.7.2. Operação em baixa carga

Se por um lado a operação de transformadores a baixa carga pode trazer grandes benefícios em termos de redução das perdas, por outro, pode ser bastante prejudicial com relação ao fator de potência em operação.

A corrente em vazio possui uma forte componente reativa, resultando numa potência reativa absorvida da rede, considerada constante para uma dada frequência e tensão de operação, que praticamente independe da carga. Naturalmente, para uma baixa carga, esta componente reativa, embora constante, cresce em termos relativos, contribuindo para uma redução do fator de potência.

A potência reativa continuamente absorvida pelo transformador, utilizada somente para a manutenção do fluxo magnético, pode ser calculada por:

$$Q_o = \sqrt{S_N^2 \cdot I_o^2 - P_o^2}$$

onde: Q_o - potência reativa (kvar);

I_o - corrente em vazio (pu).

Observe que estes dados podem facilmente serem encontrados em listas técnicas de fabricantes. Na falta de valores mais precisos, pode-se lançar mão dos valores máximos para estas grandezas, indicados em norma.

13.7.3. Operação em paralelo

Depois de efetuado o paralelismo, a repartição de carga entre os transformadores se dá automaticamente em função das suas impedâncias percentuais, regida pelas duas leis de Kirchhoff, ou seja, a lei dos nós e a lei dos laços. Em p.u. pode-se dizer:

$$\sum_{i \in \text{NÓ}} S_i = 0$$

$$\sum_{i \in \text{LAÇO}} S_i \cdot z_i = 0$$

onde: S_i - potência que flui pelo transformador i (pu);

z_i - impedância do transformador i (pu).

NÓ - conjunto de transformadores conectados a um mesmo nó.

LAÇO - conjunto de transformadores conectados a um mesmo laço.

13.7.4. Custos de Operação

A metodologia apresentada a seguir propõe que o transformador a ser selecionado deverá ser aquele que apresentar os menores custos de investimento e de operação anualizados durante a sua vida útil.

Os principais custos envolvidos na aquisição e operação de transformadores de potência são os seguintes:

a. Custos das perdas em vazio

Os custos das perdas em vazio são aqueles que inevitavelmente se incorre logo que se conecta o transformador à rede. Devem ser contabilizados pela demanda e energia, segundo as suas respectivas tarifas, como se segue:

$$CV_{ij} = P_{o_i} \cdot (Td_j + Te_j \cdot \Delta T_j)$$

onde: CV_{ij} - custo das perdas em vazio do transformador i durante o período j (R\$);

P_{o_i} - perdas em vazio do transformador i (kW);

Td_j - tarifa de demanda no período j (R\$/kW);

Te_j - tarifa de energia no período j (R\$/kWh);

ΔT_j - Número de horas que o transformador permanece energizado durante o período j (h).

b. Custo das perdas em carga

Como analisado anteriormente, as perdas em carga são proporcionais ao quadrado da corrente de carga, ou seja, em última instância, estas perdas são proporcionais ao quadrado do carregamento do transformador. Sendo assim, os custos operacionais poderão ser calculados através da seguinte expressão:

$$CO_{ij} = P_{JNi} \cdot fc_j^2 \cdot (Td_j + Te_j \cdot \Delta T_j)$$

onde: CO_{ij} - custos operacionais do transformador i durante o período j (R\$);

fc_j - fator de carregamento do transformador durante o período j (pu);

P_{JNi} - perda Joule nominal do transformador i (kW).

c. Custo de investimento

Como a análise será efetuada em termos de custos anuais, deve-se anualizar o valor do investimento do transformador através do fator de recuperação de capital. Dessa forma, o custo de investimento do transformador será dado por:

$$CI_i = INV_i \cdot \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

onde: CI_i - custo de investimento no transformador i (R\$);

INV_i - investimento no transformador i (R\$);

r - taxa de juros (pu);

n - vida útil do transformador (anos).

d. Custo do reativo

Foi analisado como um transformador operando a baixa carga pode trazer benefícios em termos energéticos e, por outro lado, como esta prática contribui para a redução do fator de potência do sistema.

Para contabilizar esta desvantagem deveria-se determinar qual a parcela que o transformador contribui para o consumo de reativo do sistema e adicioná-la aos custos operacionais. Isto implicaria na determinação de uma curva de carga típica, tanto para potência ativa como para reativa, o que nem sempre condiz com a realidade, posto que pode haver uma grande variação da carga do sistema, ou mesmo um

crescimento natural ao longo dos anos.

Neste caso será empregada uma aproximação baseada no conceito de custo de oportunidade, ou seja, para cada transformador, o custo do reativo será avaliado pelo custo de um banco de capacitores que deveria ser instalado para fornecer a potência reativa necessária à manutenção do fluxo magnético do transformador, como mostrado a seguir:

$$CR_i = Q_o \cdot CMC \cdot \frac{r \cdot (1+r)^m}{(1+r)^m - 1}$$

onde: CMC - custo médio do capacitor na tensão de utilização (R\$/kvar);

m - vida útil do capacitor (anos).

Observe-se que o que se propõe aqui não é a utilização de um capacitor em paralelo com o transformador, o que se faz é a consideração do seu custo para fins de comparação entre os diversos transformadores, este valor deverá ser adicionado ao custo de investimento como sendo o custo de reativos. No entanto, a hipótese de se instalar um capacitor não deve ser descartada, mas sim estudada técnica e economicamente.

13.7.5. Modelo de otimização

Utilizando um modelo de programação linear mista inteira foi desenvolvida uma solução otimizada para o problema de minimização de custos de aquisição e operação, de modo a selecionar o melhor transformador, ou conjunto de transformadores, dentre as opções disponíveis.

Neste modelo considera-se uma aproximação linearizada das perdas em carga do transformador, definindo os coeficientes de perdas c_1 , c_2 e c_3 , como mostra a figura a seguir.

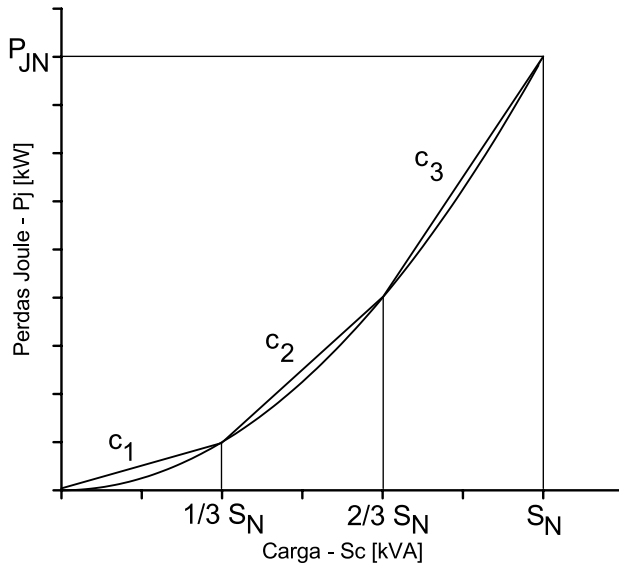


Figura 13.5 - Linearização por partes das perdas em carga

Nesta figura tem-se:

$$c_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{jN}}{S_N}$$

$$c_2 = \frac{P_{jN}}{S_N}$$

$$c_3 = \frac{5}{3} \cdot \frac{P_{jN}}{S_N}$$

Outro aspecto da modelagem é a consideração da possibilidade da operação de transformadores em paralelo. Para tanto, empregou-se um artifício matemático, através de variáveis inteiras, sobre a restrição que trata da lei dos laços.

Sendo assim, para cada par de transformadores candidatos, são construídas duas restrições relativas à lei dos laços. Isto se faz, no sentido de que se o transformador proposto for escolhido, as restrições continuam válidas e, em caso contrário, estas ficam inoperantes, resultando na seguinte modelagem final.

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (CO_{ij} + CV_{ij} \cdot x_i) + \sum_{i \in I} (CI_i + CR_i) \cdot x_i$$

$$\text{s.a. } \sum_{i \in I} S_{ij} \cdot S_{N_i} = D_j \quad j \in J$$

$$S_{ij} \cdot S_{N_i} - S_{MAX_i} \cdot x_i \leq 0 \quad i \in I, j \in J$$

$$\sum_{i \in I} x_i = N_{MAX}$$

$$\left. \begin{aligned} S_{mj} \cdot z_m - S_{nj} \cdot z_n &\leq M \cdot (2 - x_m - x_n) \\ S_{mj} \cdot z_m - S_{nj} \cdot z_n &\geq M \cdot (x_m + x_n - 2) \end{aligned} \right\} \quad m \in I, n \in I, j \in J$$

$$x_i \in \{0,1\}, S_{ij} \geq 0$$

onde: x_i - variável de decisão de investimento sobre o transformador i ;

$x_i=0$ --> transformador i não selecionado.

$x_i=1$ --> transformador i selecionado.

S_{ij} - fluxo de potência no transformador i , durante o período j (em p.u.);

S_{ni} - potência nominal do transformador i ;

D_j - demanda no período j ;

M - número inteiro bastante grande (big M);

S_{MAX_i} - capacidade máxima do transformador i ;

N_{MAX} - número máximo de transformadores na subestação;

I - conjunto dos transformadores;

J - conjunto dos períodos.

As restrições funcionais incluem o atendimento à demanda, restrição de capacidade máxima de cada transformador, número máximo de transformadores a ser selecionado e distribuição de carga entre os transformadores. As restrições funcionais garantem a não negatividade dos fluxos de potência e a utilização somente dos transformadores selecionados.

Este modelo pode também ser aplicado apenas para a otimização da operação de um conjunto de transformadores em paralelo, bastando para tanto, entrar com os dados somente dos transformadores existentes e zerar os custos de investimento.

13.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma NBR 5356/81.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma NBR 5450/84.

BASTOS, J.R.; NETTO, L.V. (1992); **“Fator de carga e suas restrições como balizador no carregamento de transformadores”** in IEEE/IAS Internation Conference - INDUSCON'92. São Paulo. Brasil.

BORTONI, E.C.; TANAKA, E.T. (1995) **“OPTIMUS v0.6 - Pacote de Otimização - Manual do Usuário”**. Quadrante Softwares Especializados Ltda. Itajubá/MG.

FERREIRA, C. **E301 – Eletrotécnica I**, apostila, EFEI, 1992.

CORREIA, P.B.; BORTONI, E.C.; SIQUEIRA NETO, J.L. (1992); **“Dimensionamento otimizado de transformadores em subestações industriais”** in XXIV CBPO - Congresso Brasileiro de Pesquisa Operacional. Salvador/BA.

KENNEDY, B. W., (1998) **“Energy Efficient Transformes”**. McGraw-Hill

KOVACS, J.P. (1980); **“Economic considerations of power transformer selection and operation”** - IEEE Trans. on IA-16, Nº 5, pp 595-599.

NEMHAUSER, G.L.; WOSLEY, L.A. (1988); **“Integer and combinatorial optimization”**. John Wiley & Sons.

OLIVEIRA, J.C.; COGO, J.R.; ABREU, J.P.G. (1984); **“Transformadores - Teoria e Ensaios”** - Ed. Edgard Blücher.

PROCEL / Eletrobrás / CEPEL, Folder Transformador de distribuição eficiente: mito ou realidade.

FUCHS, R.D., **Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica** – Rubens Dario Fuchs – EFEI/1972.

STEIN, R., HUNT, W.T.JR., **Electric Power System Components – Transformers and Rotating Machines**, Van Nostrand, 1979.

STIGANT, S.A., FRANKLIN, A.C., **The J&P Transformer Book**, Neunes-Butterworths, 1973.

MENDES, P.P.C., **E401 – Eletrotécnica Geral 2**, apostila, EFEI, 1992.

Capítulo 14

INVERSORES DE FREQUÊNCIA

14.1. INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento dos semicondutores de potência, tais como GTO (Gate Turn - off Thyristor) , IGBT (Insulation Gate Bipolar Transistor), MCT (Mos Controlled Thyristor) ou SITH (Static Induction Thyristor), entre outros, juntamente com a crescente oferta de microprocessadores, microcomputadores e DSP (Digital Signal Processors) no mercado, tornaram o Inversor Fonte de Tensão, também conhecido popularmente como Inversor de Freqüência, uma excelente opção técnica-econômica para o controle de velocidade de motores elétricos, principalmente o Motor de Indução Trifásico e o Motor de Imã Permanente.

Com a contínua exigência de aplicações em faixas de potência cada vez maiores, a própria topologia e as respectivas técnicas de controle, tem sofrido uma evolução de modo gradual, porém significativo, de modo que já existem equipamentos no mercado da ordem de 10 [MVA] até 0,5 [kVA], o que tende a popularizar dia a dia este tipo de Inversor.

14.2. DIAGRAMA EM BLOCOS

Um Inversor tipo Fonte de Tensão (VSI), cuja nomenclatura é derivada do termo em inglês Voltage Source Inverter, possui o diagrama em blocos ilustrado na Figura 14.1. Basicamente os principais elementos indicados nesta figura são:

AT - Transformador;

R - Ponte retificadora (diodos ou SCR' s);

I - Inversor VSI;

MIT - Motor de indução trifásico.

O objetivo deste equipamento é o controle de velocidade do MIT dentro de uma ampla faixa, mantendo otimizada as características de torque e corrente.

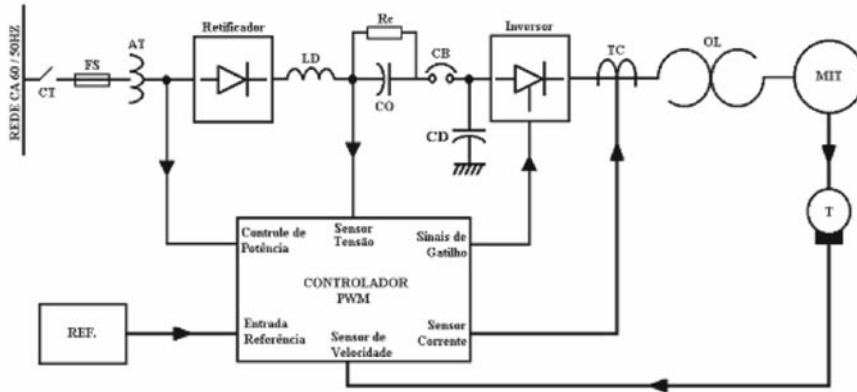


Figura 14.1 - Diagrama em bloco do Inversor VSI

14.3. SENTIDO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Tradicionalmente para uma unidade retificadora (R) constituída por diodos, o sentido do fluxo de potência é sempre unidirecional como mostrado na Figura 14.2. Deve ser observado que somente a potência ativa (Wattada) é que é suprida pela rede CA de alimentação (concessionária) ao MIT. Contudo, devido à presença de componentes harmônicos na corrente injetada no barramento da Concessionária, existirá também um consumo de reativo.

O reativo necessário ao funcionamento do motor deve ser suprido pelo próprio Inversor, através do capacitor CD existente no Link CC.

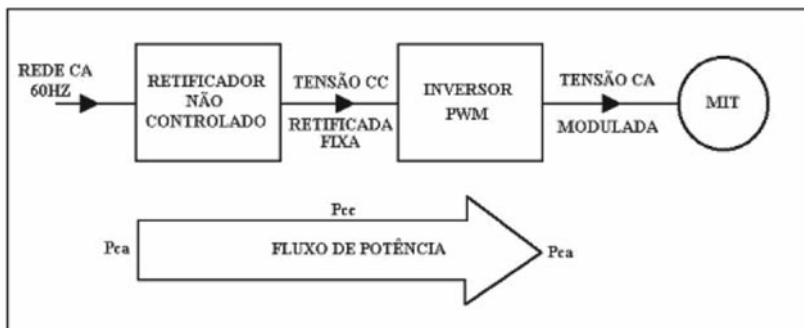


Figura 14.2 - Sentido do fluxo de potência

14.4. A TÉCNICA DE GERAÇÃO DAS TENSÕES

A maneira tradicional de se gerar os sinais de gatilho dos semicondutores de potência, representados por chaves ideais, é através da comparação de uma onda de tensão senoidal, a qual define a frequência de tensão resultante na saída do Inversor e entregue ao MIT, e uma onda triangular. Estas ondas, senoidal trifásico e triangular, são denominadas respectivamente de Referência e Portadora, e são geradas na placa eletrônica de controle denominada de Controlador PWM, o qual foi mostrado na Figura 14.1.

Observa-se ainda na Figura 14.3(a), que os sinais de comando das chaves 1 e 4, são denominados de G1 e G4, e são obtidos pela comparação da onda triangular com referência da fase 4. De modo idêntico se obtém os sinais G3 e G6 (onda triangular comparada com tensão de referência da fase B) e G5 e G2 (onda triangular comparada com tensão de referência da fase C). Estes últimos sinais disparam as chaves 3, 6 e 5, 2 respectivamente.

Através da lógica de disparo adequado, os sinais de tensões fase-terra das fontes $V_d / 2$ e fase-fase são obtidos com os formatos típicos, mostrados na Figura 14.3(b)

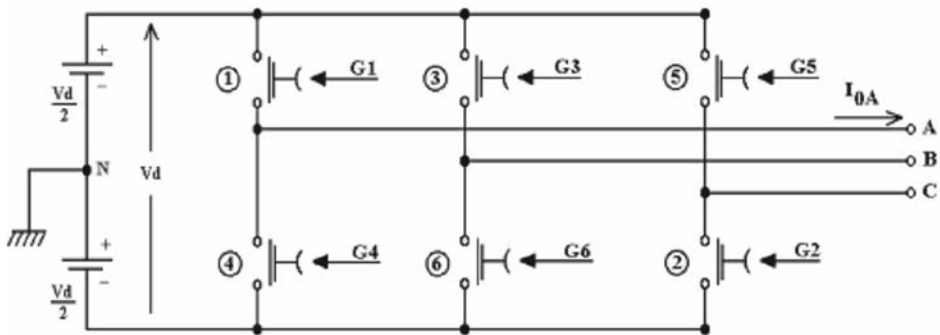


Figura 14.3(a) - Inversor PWM

14.5. OUTRAS TÉCNICAS

A seguir ilustra outras técnicas PWM para geração dos sinais de disparo das chaves, cujos resultados, relativamente às tensões na saída do Inversor, estão mostrados na Figura 14.4 e na Figura 14.5.

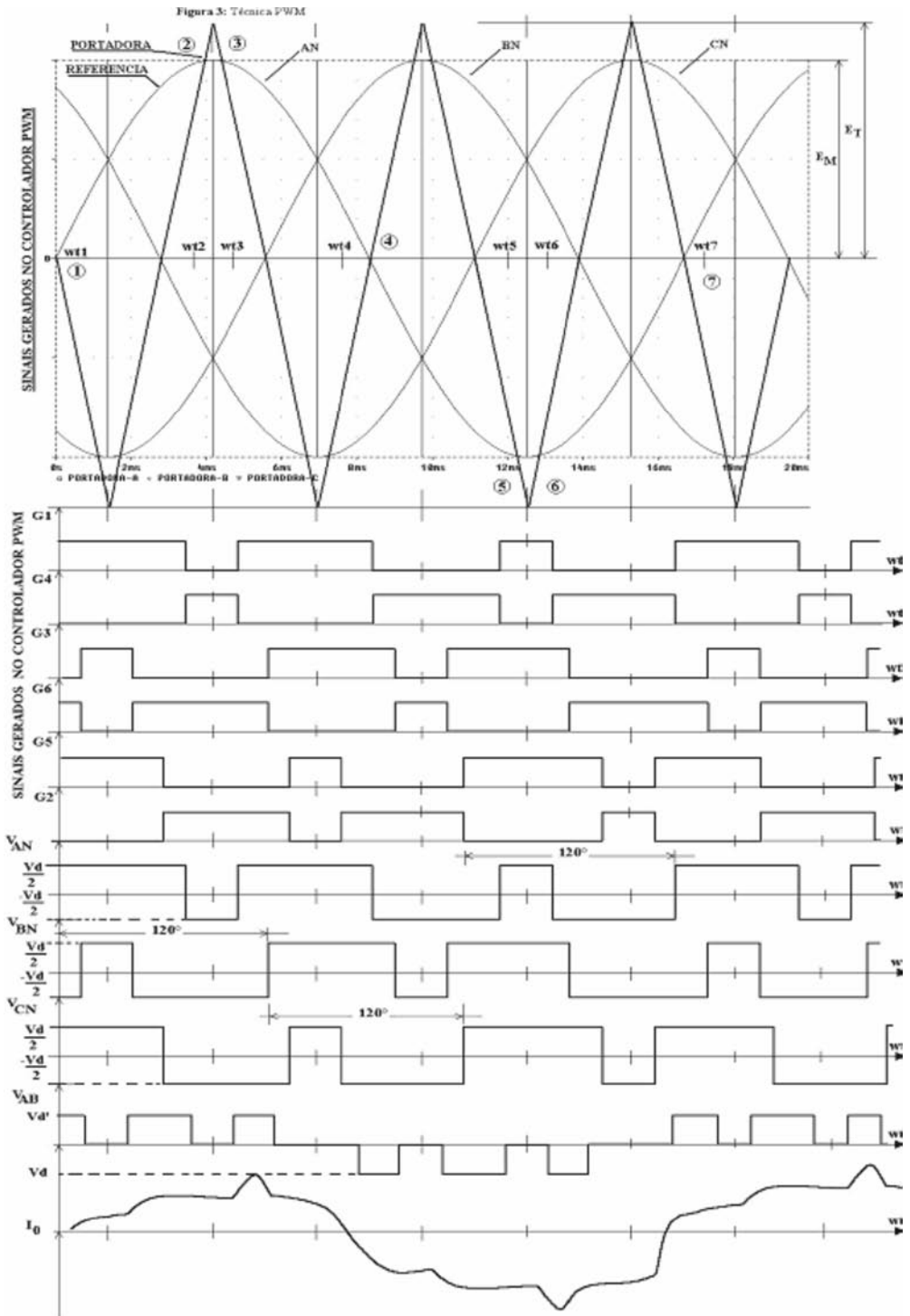


Figura 14.3(b) - Formas de Ondas

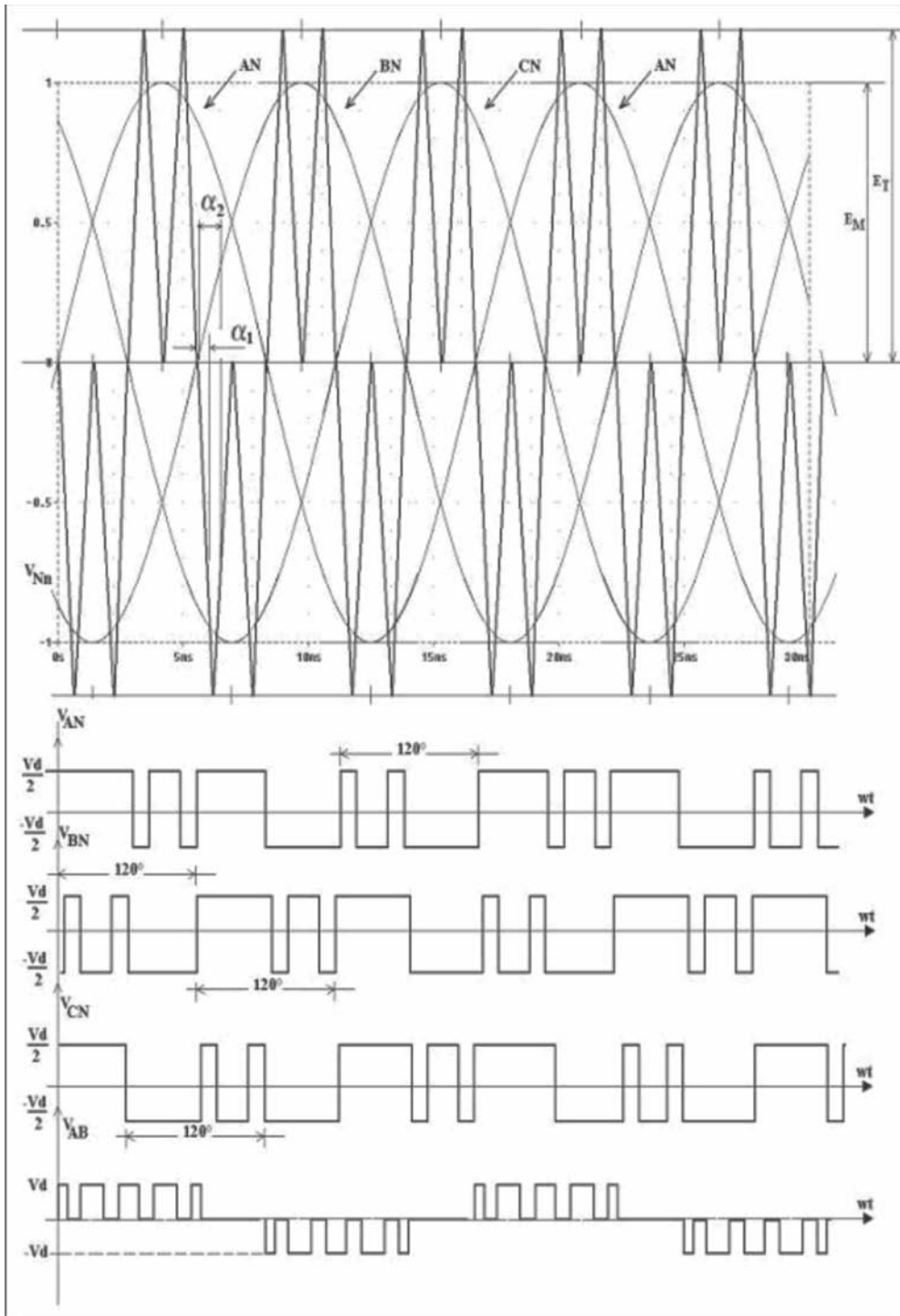


Figura 14.4 - Variação da técnica PWM e respectivas formas de ondas

Sistema	Comando dos Transistores para Tensão de Saída do Inversor	Freq. dos Pulsos	Características
"8"		1 X F	BLOCO COMPLETO $U = U_{rede}$
"7"		3 X F	MODULAÇÃO DOS FLANCOS
"6"		3 X F	3 - VEZES RETANGULAR
"5"		5 X F	5 - VEZES RETANGULAR
"4"		7 X F	7 - VEZES RETANGULAR
"3"	MODULAÇÃO SENOIDAL COM FREQUÊNCIA VARIÁVEL DOS PULSOS	9 X F	9 - VEZES SENOIDAL
"2"	MODULAÇÃO SENOIDAL COM FREQUÊNCIA VARIÁVEL DOS PULSOS	15 X F	15 - VEZES SENOIDAL
"1"	MODULAÇÃO SENOIDAL COM FREQUÊNCIA VARIÁVEL DOS PULSOS	21 X F	21 - VEZES SENOIDAL
"0"	MODULAÇÃO SENOIDAL COM FREQUÊNCIA CONSTANTE DOS PULSOS	700 HZ	SISTEMA LIVRE SENOIDAL

Figura 14.5 - Técnicas de modulação para diferentes freqüências de operação do Motor

14.6. FUNCIONAMENTO INTERNO

14.6.1. Circuito Equivalentes

Para o entendimento do funcionamento propriamente dito do Inversor, deve-se recorrer aos circuitos equivalentes e formas de ondas indicadas na Figura 14.6 e Figura 14.7, respectivamente. Cada circuito equivalente da Figura 14.6 está relacionado às formas de ondas de tensão e corrente na carga, indicados na Figura 14.7. Seja o exemplo a seguir.

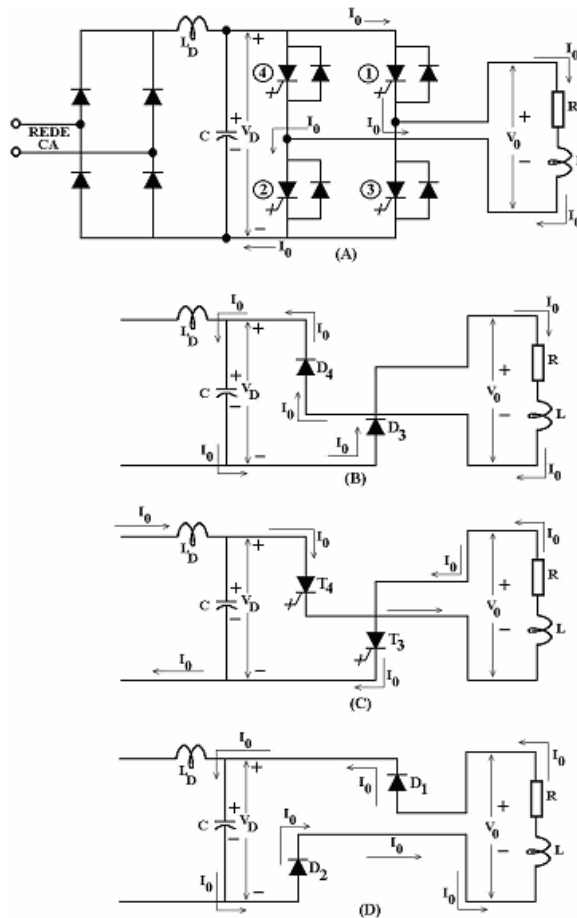


Figura 14.6 - Funcionamento do VSI monofásico

- Intervalo wt_3 a wt_4

Neste intervalo os Gto's 1 e 2 conduzem (Figura 14.6) e a tensão na carga é igual a V_d e a corrente i_o na carga cresce de modo exponencial (Figura 14.7). Desde modo que se analisando segundo a sistemática acima, obtém-se o funcionamento global do Inversor.

14.6.2. Formas de Ondas

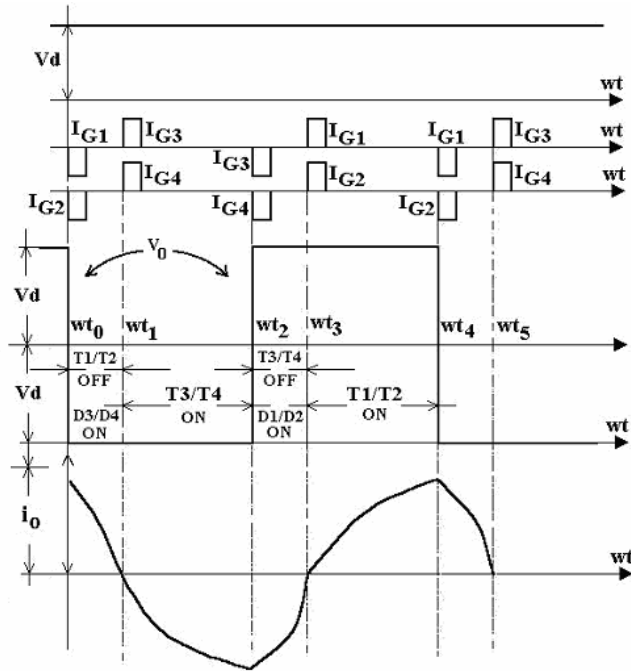


Figura 14.7 - Formas de ondas do VSI monofásicos

14.7. INVERSOR TRIFÁSICO

14.7.1. Formação de Tensões e Correntes / Inversor com GTO

O funcionamento do Inversor em nível de geração trifásico das tensões para o MIT é análogo ao do circuito anterior, tendo contudo as suas particularidades na análise, quando se deseja obter a tensão da fase (saída) para o neutro n da carga. Pode-se provar que a seguinte relação é verdadeira:

$$V_{AN} = \frac{2}{3} \cdot V_{AO} - \frac{1}{3} \cdot (V_{BO} + V_{CO}) \tag{14.1}$$

onde: v_{AN} - Tensão instantânea fase-neutro da carga;

V_{AO}, V_{BO}, V_{CO} - Tensões das fases para o neutro (ground) da bateria.

A Figura 14.8 ilustra o VSI trifásico a GTO (Gate Turn - off Thyristor), assim como as formas de ondas existentes.

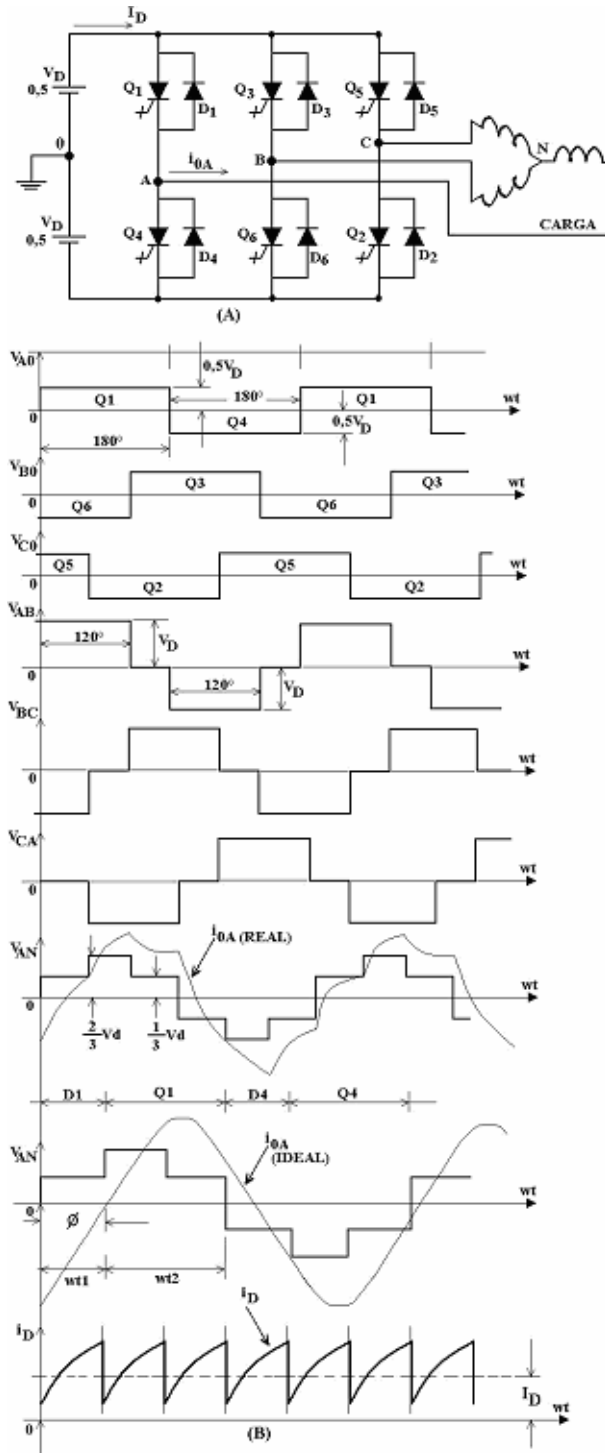


Figura 14.8 - O VSI trifásico

14.7.2. Inversor Transistorizado / Ondas Típicas / Drive

A Figura 14.9 mostra um VSI a PBT (Power Bipolar Transistor), com respectivas formas de ondas de tensão fase-fase e corrente na fase, além dos correspondentes drives de disparo dos PBT.

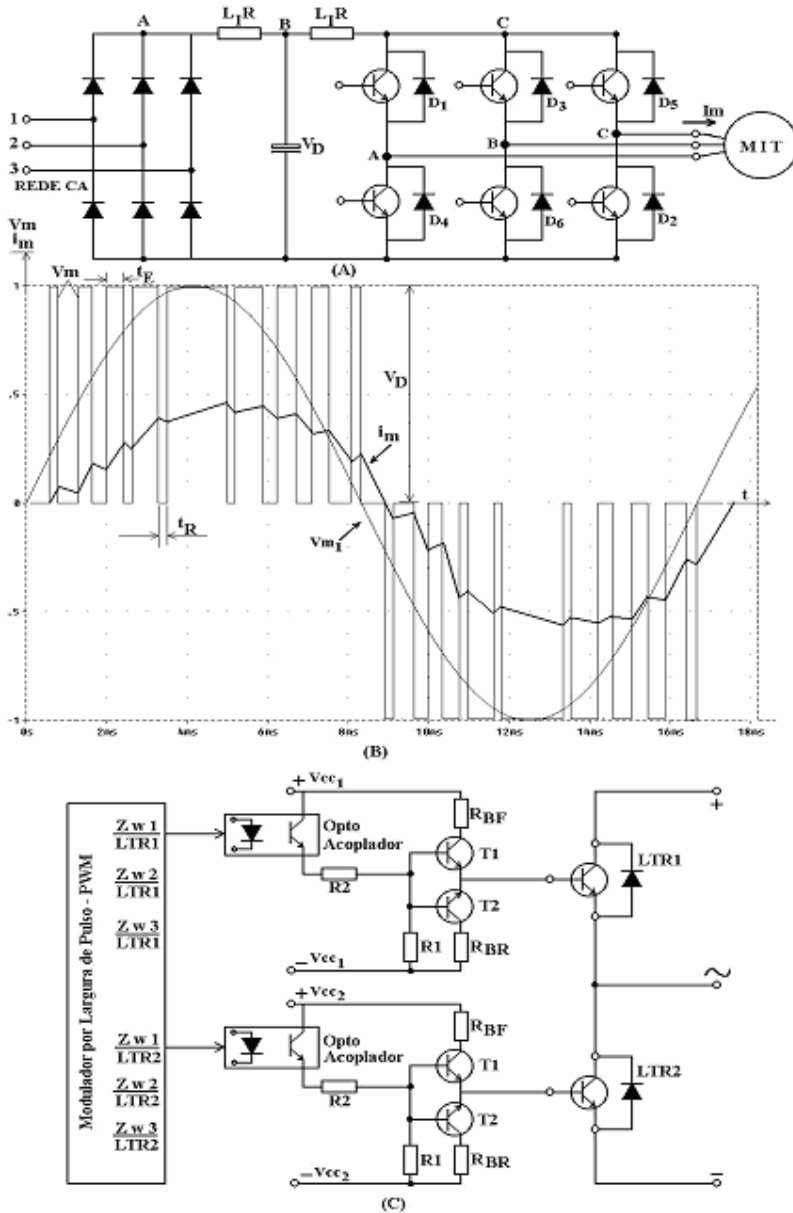
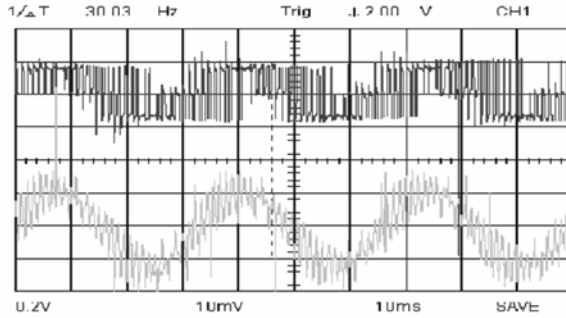


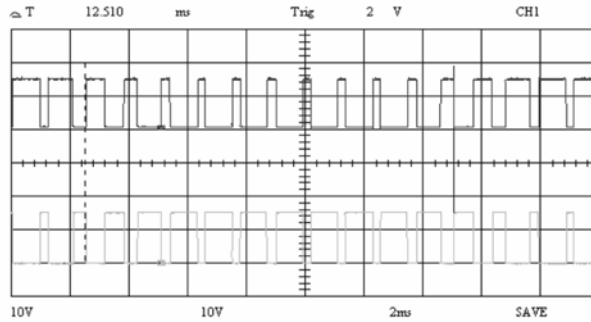
Figura 14.9 - O VSI com PBT e respectivo drive

14.7.3. Formas de Ondas Experimentais

As Figuras 14.10(a) e 14.10(b) ilustram as formas de ondas experimentais obtidas no Laboratório do Departamento de Eletrônica da UNIFEI.



(a) - Sinais de gatilhamento do IGBT1 e IGBT4
Amostragem Regular Assimétrica
Operação: 30 [Hz]



(b) - Sinais estáticos de tensão e corrente
Amostragem Regular Assimétrica
Operação: 30 [Hz]

Figura 14.10 - Formas de ondas experimentais Inversor / Motor

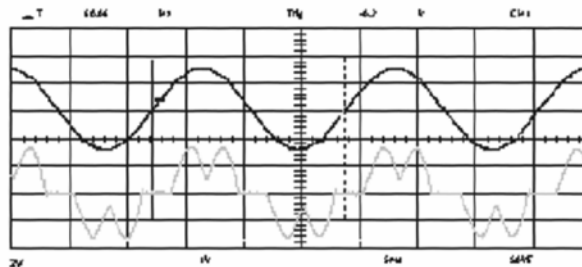


Figura 14.11 - Formas de ondas experimentais tensão – corrente injetadas na concessionária

14.8. CARACTERÍSTICAS DO MIT

14.8.1. A Curva Torque - Velocidade e a Relação V / f

O modo de operação do MIT, ao ser acionado por um VSI, deve obedecer a curva de torque versus velocidade, mostrado na Figura 14.12 e também a curva de tensão versus frequência (f), indicada na Figura 14.13. Conclui-se, portanto, que o MIT trabalha de modo análogo ao motor de corrente de contínua (MCC) por possuir tanto uma região de torque constante quanto uma região de potência constante.

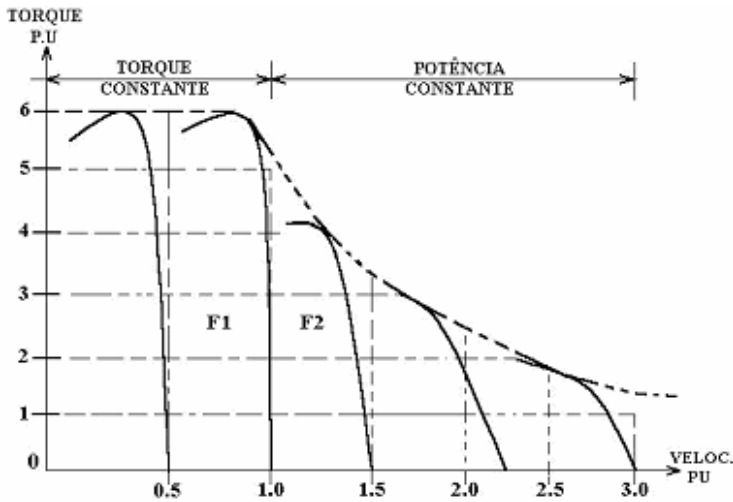


Figura 14.12 - A característica torque – velocidade

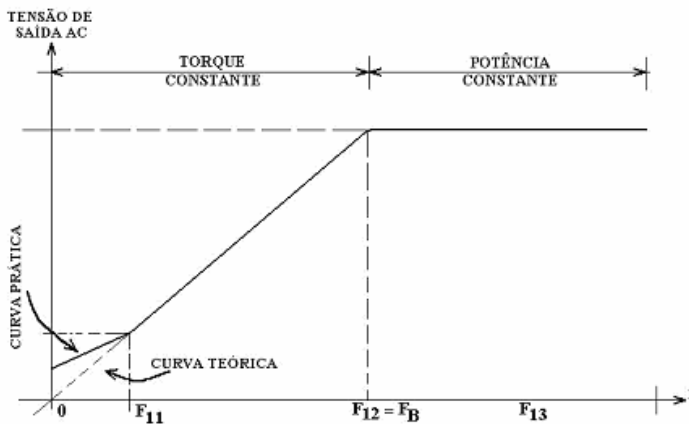


Figura 14.13 - A relação V / f

14.9. APLICAÇÕES

14.9.1. Campos de Aplicações

A Tabela 14.1 é auto-explicativa e ilustra os principais campos de aplicações do VSI no acionamento de motores elétricos.

Tabela 14.1 - Aplicações típicas para Inversores

Alimentos	<ul style="list-style-type: none"> - Evaporadores - Transportadores contínuos - Fornos contínuos - Bombas dosadoras 	<ul style="list-style-type: none"> - Extratores de óleo - Misturadores - Máquinas de engarrafar
Têxtil	<ul style="list-style-type: none"> -Teares Circulares - Cardas - Lavadeiras - Secadores - Urdideiras 	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentadores de cardas - Máquinas de tingimento - Mercerizadeiras - Retorcedeiras de fios
Mineração e Cimento	<ul style="list-style-type: none"> - Bombas - Agitadores - Separadores dinâmicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Ventiladores - Peneiras - Transportadores contínuos
Siderurgia e Metalurgia	<ul style="list-style-type: none"> - Trefiladores - Osciladores de molde - Transportadores - Pontes rolantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesa de rolos - Bobinadores, desbobinadores - Ventiladores e exaustores
Papel e Celulose	<ul style="list-style-type: none"> - Bombas dosadoras - Ventiladores - Agitadores 	<ul style="list-style-type: none"> - Bombas de processo - Válvulas rotativas - Fornos rotativos
Química e Petroquímica	<ul style="list-style-type: none"> - Bombas - Extrusoras - Misturadores 	<ul style="list-style-type: none"> - Ventiladores - Agitadores - Centrífugas
Plástico e Borracha	<ul style="list-style-type: none"> - Extrusoras - Calandras 	<ul style="list-style-type: none"> - Misturadores -Filatórios

14.9.2. Aplicações no Controle de Bomba

14.9.2.1. Conceitos gerais

A Figura 14.14 indica uma aplicação típica do conjunto Inversor - MIT no controle do fluxo de vazão Q de uma bomba do tipo hidráulica. Através do ajuste de velocidade do MIT consegue-se obter uma melhor eficiência, em nível de redução no consumo de energia, na operação da bomba.

14.9.2.2. Benefícios adicionais

Além do aspecto econômico, o sistema de controle por variação de velocidade da bomba apresenta uma série de vantagens em relação ao sistema de controle por válvulas:

- melhoria na eficiência do sistema pelo casamento da característica da bomba com a característica do sistema e otimização do ponto de trabalho;
- limitação da corrente de partida;
- partidas e paradas suaves do sistema de bombeamento, evitando picos na rede de energia elétrica e esforços na tubulação;
- simplificação da rede de dutos através da eliminação das válvulas de estrangulamento;
- aumento da vida útil da bomba devido a eliminação do desequilíbrio interno de pressões, fonte causadora do desgaste mecânico;
- eficiência otimizada de sistema de bombeamento através da obediência às variações de pressão ou fluxo;
- utilização de motores de indução trifásicos, padronizados, que requerem menor manutenção e possuem baixos custos de aquisição e reparação;
- emprego em áreas que requeiram motores a prova de explosão, a prova de tempo ou atmosferas quimicamente agressivas;
- método simples de interfaceamento para sinais de controles externos, tais como: 0 - 10 Volts ou 4 - 20 mA, provenientes de transmissores de pressão, vazão, nível ou ainda telemetria.

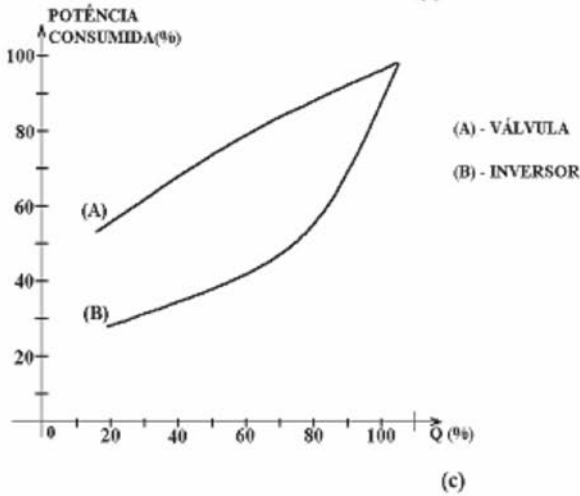
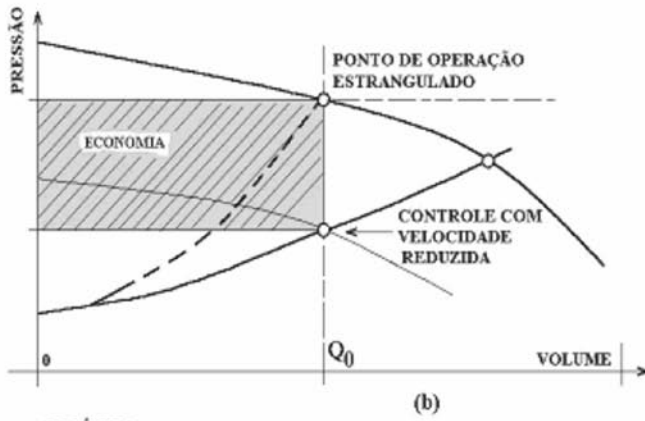
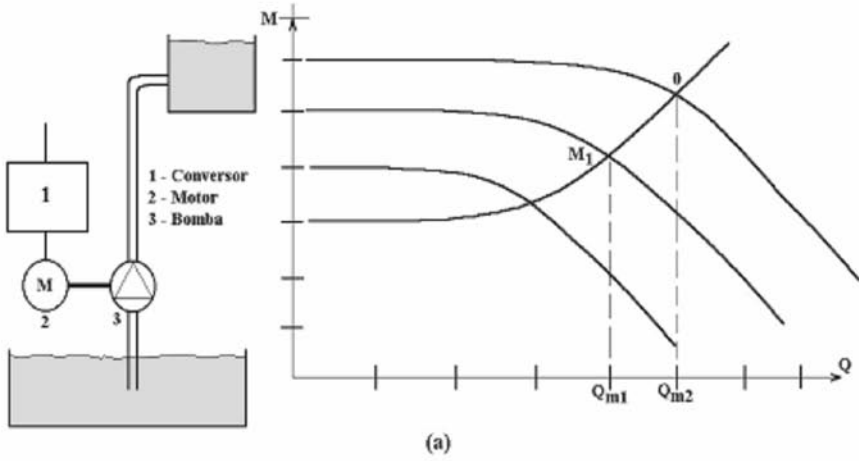


Figura 14.14 - Aplicação do VSI no acionamento de bomba

14.10. INVERSORES MICROPROCESSADOS

14.10.1. Inversor Comercial

A Figura 14.15 mostra um VSI comercial, com os principais detalhamentos da ponte de potência e também ilustra o circuito do drive para o gatilhamento de cada GTO.

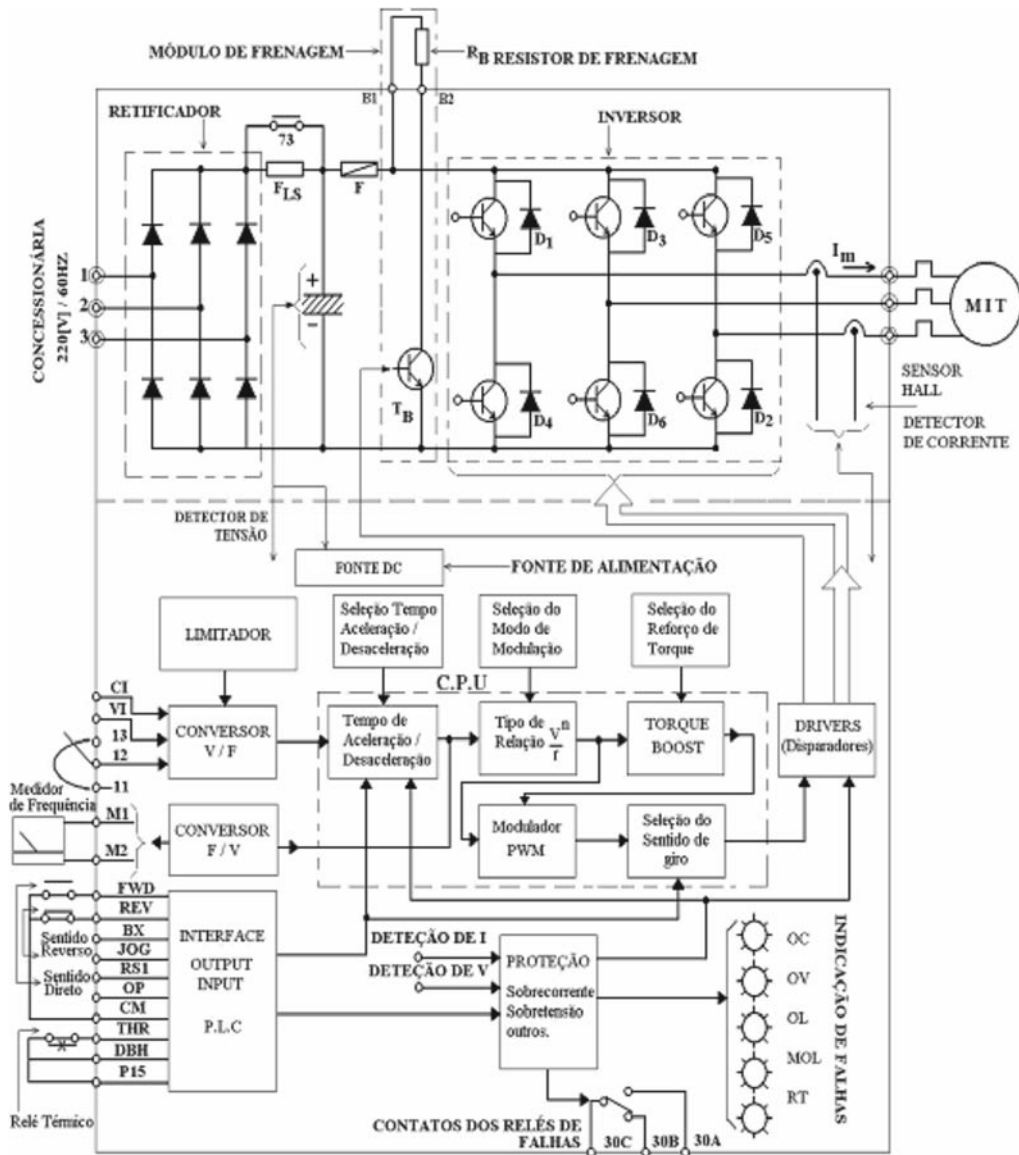


Figura 14.15 - Exemplo de um VSI comercial

14.10.2. Diagrama em Bloco do Controle Microprocessado

Com a evolução dos chips eletrônicos, microcontroladores e DSP (Processadores de Sinais Digitais), a placa eletrônica de controle tornou-se bem mais simples que a correspondente analógica. A Figura 14.16 ilustra esta placa eletrônica.

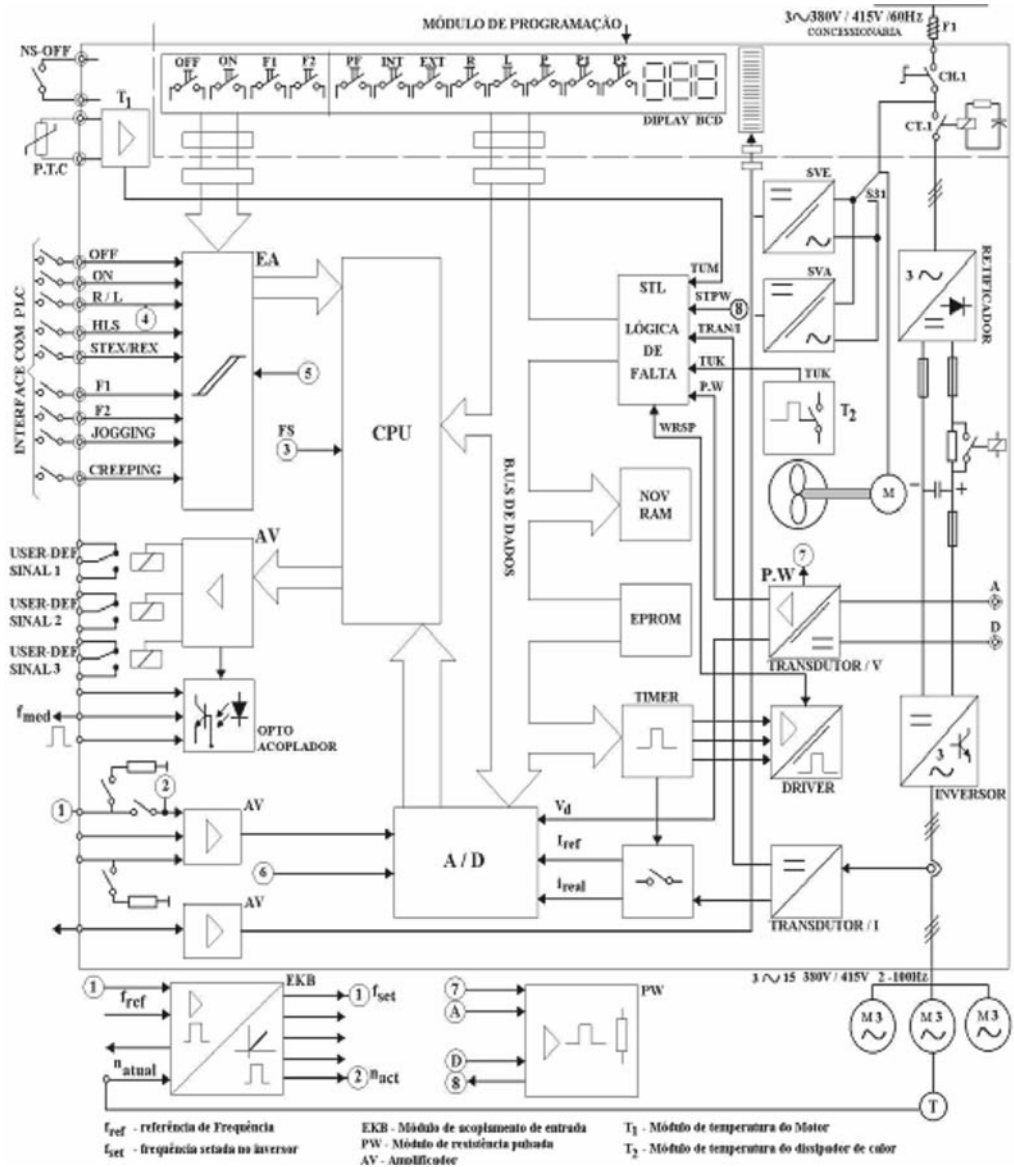
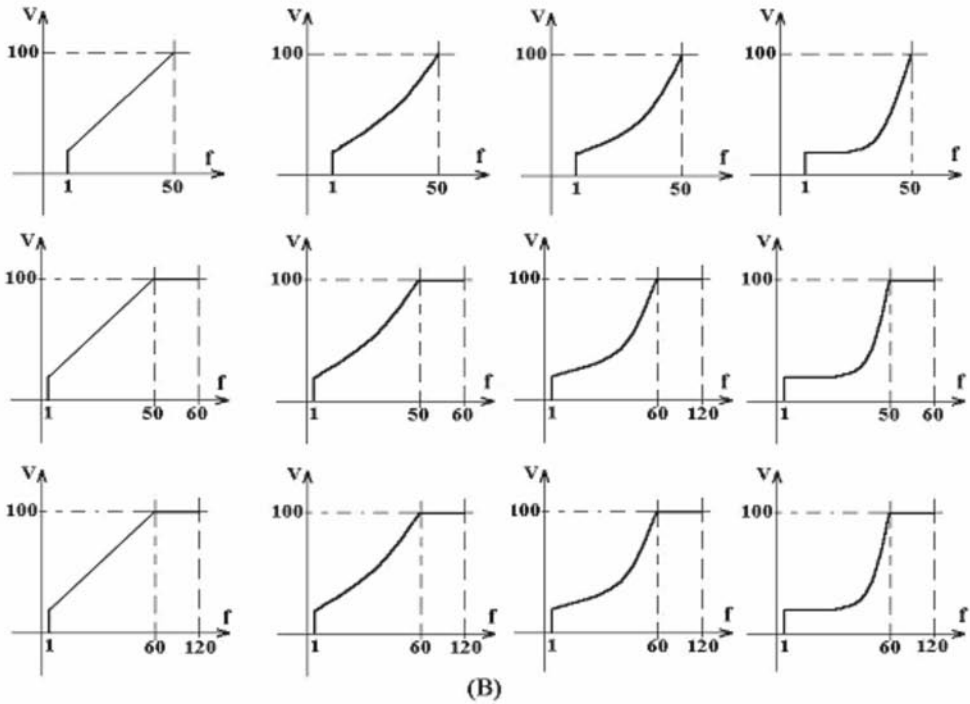
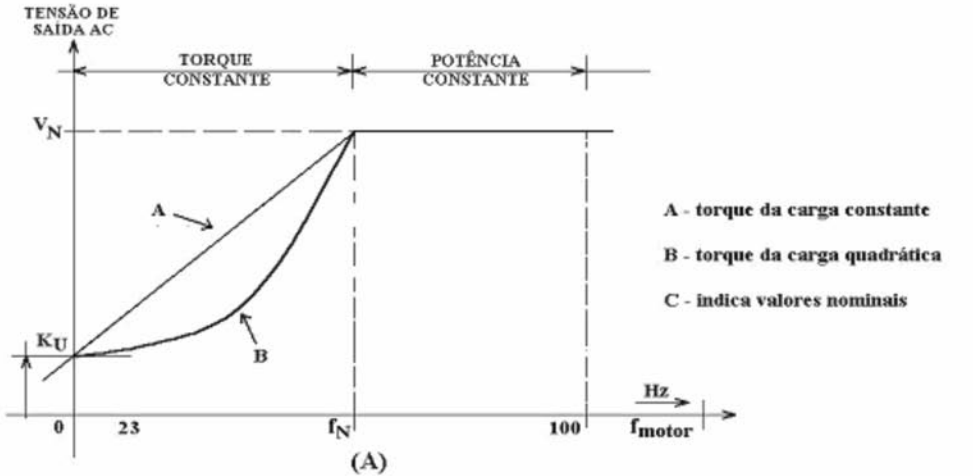


Figura 14.16 - Diagrama em bloco típico de um VSI comercial

14.10.3. Cargas Típicas e Ajustes

As figuras 14.17 (a) e (b) ilustram, respectivamente, os principais tipos de cargas e seus possíveis ajustes.



(A) Tipo de Carga (B) Tipo de Ajuste

Figura 14.17 - Relações Típicas V_n/f

14.11. TENDÊNCIAS

14.11.1. Inversor Multinível

Devido a exigências de redução do nível de correspondentes harmônicos na carga, a redução de perdas no sistema e outras exigências, a topologia dos Inversores vem sofrendo grandes modificações. Uma das mais aceitas atualmente, é a conhecida como Multinível e está indicada na Figura 14.18 com as respectivas formas de ondas ilustradas na Figura 14.19.

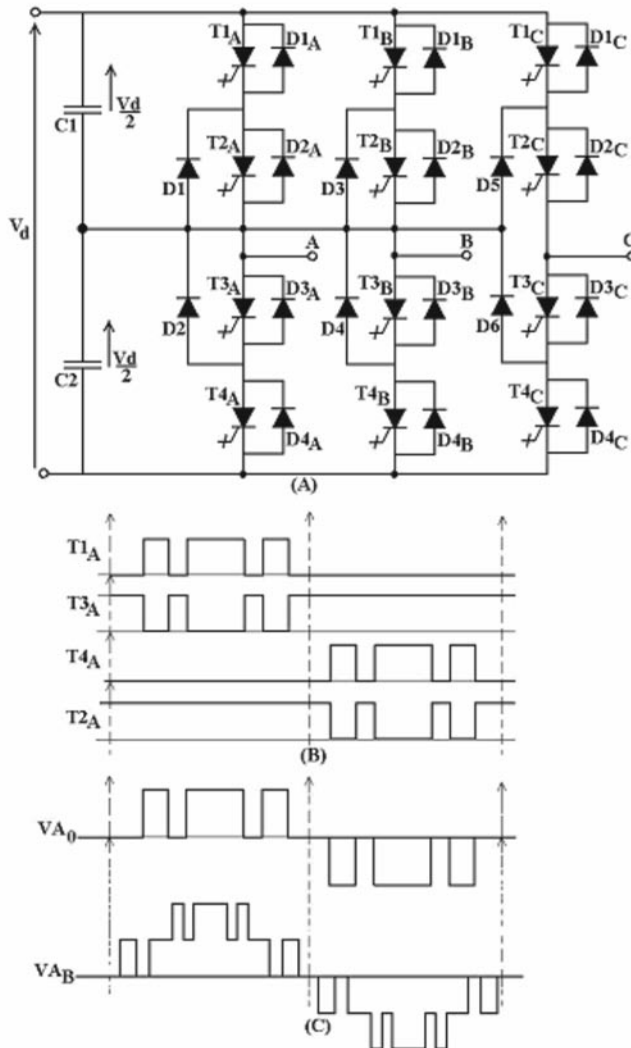


Figura 14.18 - Inversor Multinível

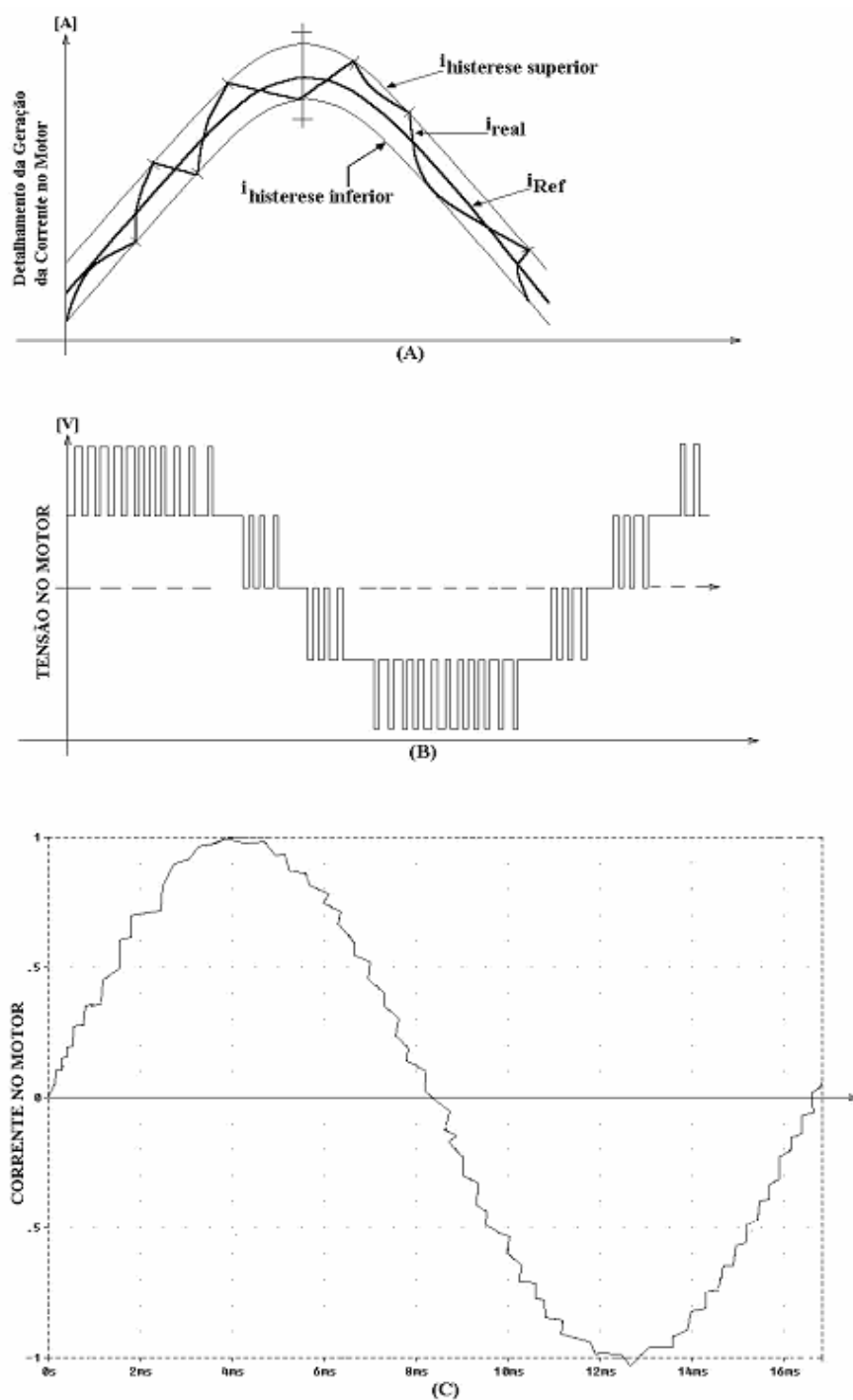


Figura 14.19 - Formas de ondas do Inversor Multinível

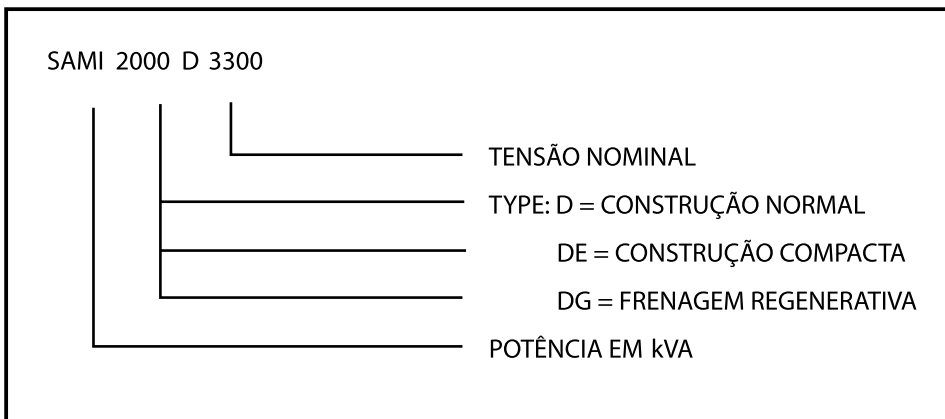
Faixas de aplicação do inversor multinível

Para o VSI do tipo Multinível, as Tabelas 14.3 e 14.4 indicam as faixas de potência e designação comercial* destes novos tipos de equipamentos.

Tabela 14.3 - Faixas de potência

Tipo	Corrente	Potência no eixo	Potência aparente
SAMI 1250 D 3300 and SAMI 1250 DE, DG 3300	220 A	1000 kW	1250 kVA
SAMI 2000 D 3300 and SAMI 2000 DE, DG 3300	350 A	1600 kW	2000 kVA
SAMI 2800 D 3300	490 A	2200 kW	2800 kVA
SAMI 3150 D , DG 3300	550 A	2600 kW	3150 kVA
SAMI 5000D , DG 3300	875 A	4000 kW	5000 kVA
SAMI 6300 D 3300	2 x 550 A	5000 kW	6300 kVA
SAMI 10000D 3300	2 x 875 A	8000 kW	10000 kVA

Tabela 14.4 - Designação



* Gentilmente cedida pela ABB.

14.12. BIBLIOGRAFIA

Manuais de fabricantes de Inversores

Artigos técnicos (diversos) da revista IEEE / IA (Industry Applications)

DEWAN, S.B. et all, **Power Semiconductor Drives**, John Wiley and Sons

BOSE, B.K , **Power Electronics and AC Drives**, Prentice-Hall Inc

Capítulo 15

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

15.1. INTRODUÇÃO

Os atuais programas de conservação de energia, adotados pelas mais diversas empresas governamentais (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL) e não governamentais (Energy Services Companies - ESCOS e Consultorias em geral), são elaborados e executados considerando-se que o sistema elétrico de potência esteja trabalhando sob condições praticamente senoidais, com níveis de tensão e frequência dentro de valores estabelecidos por normas. Desta forma, os problemas associados com a qualidade da energia elétrica não são levados em consideração.

Com o aumento das cargas não lineares no sistema elétrico, o problema da distorção harmônica tem se tornado cada vez mais significativo. Algumas medidas de conservação, tais como: a aplicação de inversores de frequência para o controle da velocidade de motores, controladores de intensidade luminosa (dimmers), utilização de lâmpadas fluorescentes compactas com reatores eletrônicos, controladores de potência para chuveiros, entre outras, podem interferir na qualidade do sistema elétrico, de forma a aumentar as perdas e até causarem danos e prejuízo aos consumidores e à concessionária.

Este capítulo leva em consideração os problemas associados com a qualidade da energia (em específico os harmônicos), na avaliação das medidas de conservação. Faz-se uma avaliação das medidas de conservação, considerando-se as perdas em cabos e transformadores, a ocupação do sistema elétrico, a nova proposta de tarifação para ambientes distorcidos e algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios da qualidade da energia. Esta avaliação faz parte de uma metodologia que oferece condições para analisar a relação de compromisso entre a conservação de energia e a qualidade da energia elétrica.

15.1.1. A Qualidade da Energia Elétrica (QEE)

No passado, a questão da qualidade da energia elétrica não era importante por dois motivos principais: o primeiro deles porque a maioria dos usuários não ne-

cessitava de um fornecimento de energia de alta qualidade, já que seus processos e equipamentos não eram tão sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade. O segundo deles está relacionado com as empresas brasileiras de eletricidade que, há quase meio século, operaram dentro de um regime de monopólio de tarifas com base no custo do serviço, significando que todo aumento ou redução de custos não implicava em aumento ou redução dos lucros respectivamente.

Atualmente, a questão da qualidade da energia elétrica surge como um fator muito mais relevante e necessário aos vários envolvidos no sistema elétrico. A deterioração da qualidade pode provocar ineficiências técnicas e econômicas com significativas perdas para a comunidade.

Diante de um mercado globalizado crescentemente competitivo, o assunto da qualidade tem se tornado de fundamental importância no cenário econômico nacional, uma vez que os modernos processos industriais produtivos podem sofrer interrupções mais ou menos longas devido às variações momentâneas da tensão, implicando em significativas perdas econômicas. E também porque a sensibilidade dos equipamentos aos distúrbios originários do sistema elétrico tem aumentado.

Por outro lado a desregulamentação do setor elétrico incorpora uma mudança na atuação das empresas brasileiras de eletricidade, que reduzindo seus custos podem aumentar seus lucros, sem que a tarifa seja modificada.

Ao lado das medidas propostas de conservação de energia, os serviços de melhoria da qualidade da energia elétrica também podem ser feitos pelas concessionárias e/ou pelo PROCEL.

Esta nova oportunidade de negócio, para as concessionárias, poderão ampliar os seus serviços e aumentar a sua competitividade neste mercado desregulamentado.

Deste modo, este capítulo pretende, numa primeira etapa, abordar a questão da qualidade da energia elétrica, definindo e identificando os seus principais distúrbios e suas causas. Numa segunda etapa, definir de uma forma mais aprofundada a questão dos harmônicos, o que são, como surgem, qual a sua formulação, os seus efeitos, entre outros, que serão utilizados posteriormente. Numa última etapa, mostrar a nova definição de potência, levando-se em consideração aspectos relacionados com a qualidade da energia elétrica, mostrando também uma nova proposta tarifária, que inclui aspectos de qualidade da energia, em ambientes distorcidos.

Toda esta teoria anterior torna-se necessária para que se possa compreender melhor as implicações que irão relacionar a conservação de energia com a qualidade da energia elétrica.

15.1.2. Definição da Qualidade da Energia Elétrica

Qualidade da energia elétrica (QEE) pode ser definida como a ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, surtos e harmônicos (este pelo lado do cliente), medidos no ponto de entrega de energia (fronteira entre as instalações da concessionária e as do consumidor). Se, entretanto, olharmos o problema sob o ponto de vista do consumidor, "energia elétrica de boa qualidade, é aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas". (Bronzeado, 1997).

15.1.3. Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões em qualquer ponto deveriam ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas, e com amplitude e frequência constantes. Qualquer desvio, acima de certos limites, na característica desses parâmetros pode ser considerado como uma perda de qualidade de energia. Em outras palavras, existe um problema de QEE sempre que ocorre um desvio na forma de onda da tensão de alimentação. Portanto, a QEE, na maioria dos casos, poderia ser representada pela qualidade da tensão elétrica do ponto onde a carga está ligada.

Por outro lado, a natureza das cargas conectadas à rede de distribuição cujas correntes solicitadas são também senoidais, são ditas lineares e apresentam formas de onda de corrente e tensão, conforme Figura 15.1. Para outras cargas, chamadas de não lineares (ou especiais), as correntes são distorcidas (Figura 15.2).

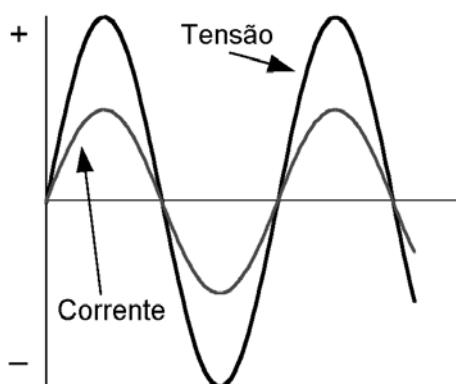


Figura 15.1 - Forma de onda de um sinal elétrico de uma carga linear

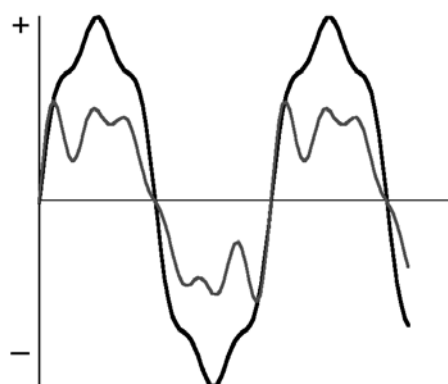


Figura 15.2 - Forma de onda de tensão e corrente solicitada por uma carga não linear

Assim, a qualidade da energia pode ser caracterizada por um conjunto de parâmetros, relacionados com a qualidade da fonte de tensão e corrente.

A qualidade das fontes de tensão e corrente pode ser definida através de quatro parâmetros principais:

1. Freqüência;
2. Forma de onda;
3. Amplitude da tensão;
4. Assimetria em sistemas trifásicos.

Os principais fenômenos eletromagnéticos associados à QEE (BRONZEADO, 1997 e IEEE Standard 1159, 1995) podem ser agrupados em:

a) Variações Instantâneas de Tensão (*Transient Voltages*): São variações súbitas do valor instantâneo da tensão. Em geral, dependem do montante de energia armazenada nos elementos do sistema no instante inicial da ocorrência e do comportamento transitório do sistema para atingir o seu novo ponto de operação. Neste grupo estão incluídos os Surtos de Tensão; Transitórios Oscilatórios da Tensão e os Cortes na Tensão

- Surtos de Tensão (Impulsive Transients): Usualmente causados por descargas atmosféricas, são caracterizados pelo tempo de subida (Tempo de Crista), tempo de caída (Tempo de Cauda) e pelo valor de pico da tensão. Em geral, os Surtos de Tensão têm polaridade unidirecional.
- Transitórios Oscilatórios de Tensão (Oscillatory Transients): São oscilações do valor instantâneo da tensão sobreposta ao seu valor instantâneo normal, à freqüência fundamental. Em geral os Transitórios Oscilatórios são causados pelos chaveamentos de equipamentos e linhas de transmissão.
- Cortes na Tensão (Notching): São descontinuidades do valor instantâneo da tensão causadas geralmente pelos curto-circuitos fase-fase durante a comutação da corrente entre as fases do sistema sob operação normal dos conversores de potência. Normalmente, são seguidos de transitórios oscilatórios e, por serem periódicos, têm sido também analisados como distorção harmônica.

b) Variações Momentâneas de Tensão (*Short Duration Voltage Variations*): São variações momentâneas no valor eficaz (rms) da tensão entre dois níveis consecutivos, com duração incerta, porém menor do que 1 (um) minuto. Geralmente são causadas por curtos-circuitos no sistema elétrico e chaveamentos de equipamentos que demandam altas correntes de energização.

As Variações Momentâneas de Tensão podem ser classificadas como Subtensões e Sobretensões Momentâneas, e Interrupções Momentâneas de Tensão:

- Subtensões Momentâneas ou Depressão Momentânea de Tensão (Voltage Sags): São reduções momentâneas do valor rms da tensão em uma ou mais fases do sistema elétrico, para valores de tensão entre 10% e 90% da tensão nominal, e duração entre 1/2 ciclo e 1 (um) minuto.
- Sobretensões Momentâneas ou Elevações Momentâneas de Tensão (Voltage Swells): São elevações momentâneas do valor rms da tensão, em uma ou mais fases do sistema, para valores de tensão superiores a 110% da tensão nominal, e duração entre 1/2 ciclo e 1 (um) minuto. Ver Figura 15.3.

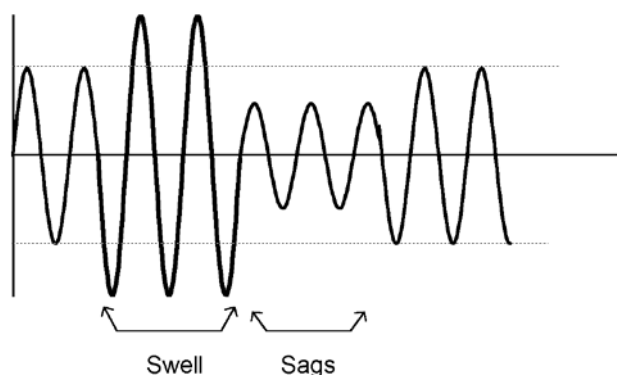


Figura 15.3 - Sobretensão e depressão momentâneas de tensão, respectivamente

- Interrupções Momentâneas de Tensão (Short Duration Interruptions): São reduções do valor rms da tensão, em uma ou mais fases do sistema, para valores de tensão inferiores a 10% da tensão nominal e duração entre 1/2 ciclo a 1 (um) minuto. Em termos de duração as Interrupções Momentâneas de Tensão podem ser divididas em:
 - De curtíssima duração (Instantaneous): Duração entre 1/2 ciclo e 30 ciclos.
 - De curta duração (Momentary): Duração entre 30 ciclos e 3 segundos.
 - Temporária (Temporary): Duração entre 3 segundos e 1 minuto.

c) Variações Sustentadas de Tensão (Long Duration Voltage Variation): São variações de valor rms da tensão entre dois níveis consecutivos, com duração incerta, porém maior ou igual a 1 (um) minuto. Em geral, são causadas pela entrada e saída de grandes blocos de carga, linhas de transmissão e equipamentos de compensação de potência reativa (banco de capacitores e reatores).

A comunidade internacional tende a não considerar as Variações Sustentadas de Tensão como sendo um problema de "Power Quality" (ABRACE, 1985).

As Variações Sustentadas de tensão podem ser classificadas como Subtensão

e Sobretensão Sustentada, e Interrupção Sustentada de Tensão:

- Subtensão Sustentada (Undervoltage): Para valores de tensão entre 10% e 90% da tensão nominal.
- Sobretensão Sustentada (Overvoltage): Para valores de tensão superiores a 110% da tensão nominal.
- Interrupção Sustentada de Tensão (Sustained Interruption): Para valores de tensão inferiores a 10% da tensão nominal ou faltas de tensão.

d) Variações Momentâneas de Freqüência (Power Frequency Variations):

São pequenos desvios momentâneos do valor da freqüência fundamental da tensão decorrentes do desequilíbrio entre a geração da energia elétrica e a demanda solicitada pela carga. A sua duração e magnitude dependem essencialmente da dimensão do desequilíbrio ocorrido, da característica dinâmica da carga e do tempo de resposta do sistema de geração às variações de potência.

e) Distorção Harmônica Total, Flutuação de Tensão, Cintilação e Desequilíbrio de Tensão: Estes termos, os quais se referem aos distúrbios “quase-permanentes”, causados pela operação de cargas não-lineares já foram definidos nos documentos emitidos pelo Grupo de Coordenação e Operação Interligada (GCOI) e Grupo de Coordenação e Operação do Sistema Elétrico (GCOS) (Eletrobrás, 1986). No entanto, é importante ressaltar os seguintes pontos:

- Distorção Harmônica Total (Total Harmonic Distortion): Este termo tem sido usado tanto para os sinais de tensão como de corrente, para quantificar o nível de distorção da forma de onda com relação a forma de onda ideal (senoidal), à freqüência fundamental (Figura 15.4).

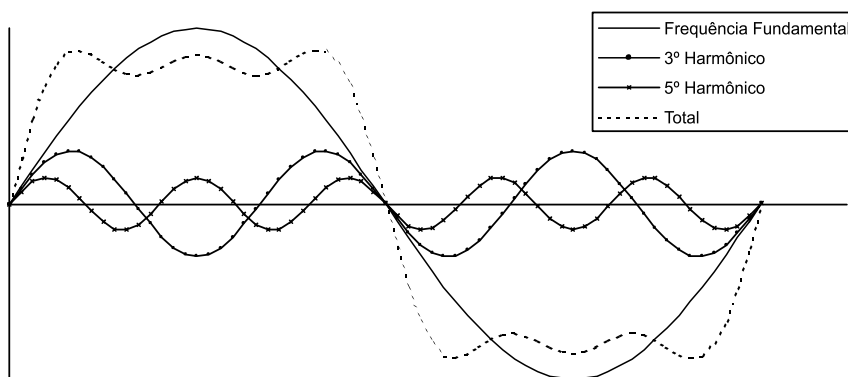


Figura 15.4 - Forma de onda Harmônica

- Flutuação de Tensão (Voltage Fluctuation): É uma série de Variações de Tensão sistemáticas e intermitentes dentro de uma faixa entre 95% e 105% da tensão nomi-

nal. Este termo tem sido usado de forma incorreta para se referir às Variações de Tensão e Cintilação.

- **Cintilação (Flicker):** É a impressão visual resultante da variação do fluxo luminoso nas lâmpadas elétricas submetidas às Flutuações de Tensão do sistema elétrico. Este efeito também pode ser notado em ambientes iluminados artificialmente que têm ventiladores de teto, embora isto não seja um problema relacionado com a QEE.
- **Desequilíbrio de Tensão (Voltage Imbalance):** É a razão entre a componente de seqüência negativa e a componente de seqüência positiva da tensão do sistema trifásico. É prática, embora incorreta, se medir o desequilíbrio de tensão através da medição das magnitudes das tensões de fase, sem levar em consideração os ângulos de fase entre elas. Um sistema com tensões de magnitude iguais, porém, com defasagens diferentes de 120° podem causar grandes desequilíbrios. O IEEE considera também a relação entre a componente de seqüência zero e a positiva para medir o desequilíbrio de tensão (IEEE Standard I159-1995).

Alguns autores (HEI, 1998) consideram também o Ruído, que é um sinal elétrico indesejado e esporádico oriundo de outros equipamentos, como sendo um fenômeno eletromagnético associado à QEE.

15.1.4. Causas de Alguns Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE)

A Tabela 15.1 relaciona alguns distúrbios da qualidade da energia com suas causas e conseqüências, assim como também apresenta algumas medidas de mitigação/eliminação dos distúrbios através dos dispositivos de condicionamento.

Pesquisas realizadas nos EUA, patrocinadas pelo Electrotechnical Power Research Institute (EPRI), identificaram três distúrbios da QEE que mais tem afetado os consumidores: as Variações Instantâneas de Tensão (Transitórios), as Depressões de Tensão (Voltage Sags) e os Harmônicos. Estes distúrbios podem causar problemas, como os listados a seguir:

Depressão de Tensão

- Operação inadequada de equipamentos industriais como os Controladores Lógicos Programáveis (CLP's), responsáveis pelo controle de processos industriais; de relês, responsáveis pela proteção do sistema elétrico; microprocessadores, componente usado em dispositivos de controle;
- Variação da velocidade ou parada de motores;
- Falhas em inversores de freqüência, usados para o controle de velocidade de motores, entre outros.

Tabela 15.1 - Implicações de alguns distúrbios da qualidade da energia elétrica

Distúrbios	Causas	Conseqüências	Dispositivos de condicionamento ⁽¹⁾
Transitórios Impulsivos	Descargas atmosféricas Manobra de carga	Distúrbios em dispositivos eletrônicos	Pára-raios Filtros Transformador de isolamento
Transitórios Oscilatórios	Descargas atmosféricas Manobras de linhas, cabo, capacitor, transformador, carga.	Distúrbios em dispositivos eletrônicos	Pára-raios Filtros Transformador de isolamento
Variações de Curta Duração	Faltas remotas Manobra de carga	Distúrbios em processos industriais	Transformador de tensão constante (2), DVR (5)
Variações de Longa Duração	Partida de motor Variação de carga Manobra de capacitor Sobrecargas	Distúrbios em processos industriais	Regulador de tensão Transformador de tensão constante
Interrupções	Faltas Manobra de disjuntores	Distúrbios em processos industriais	Sistema UPS (3) Geradores de reserva
Desequilíbrio de Tensão	Cargas desequilibradas	Altas correntes, aquecimento de máquinas elétricas girantes	Compensadores eletromagnéticos ou eletrônicos
Harmônicos	Cargas não lineares	Ocupação do sistema, sobreaquecimento, distúrbios em contadores	Filtros Transformador de isolamento
Notching	Pe's (4) com comutação de corrente entre fases	Má operação de equipamentos eletrônicos, interferências	Filtros Blindagem
Ruído	Manobra de Pe's Arcos Radiação eletromagnética	Distúrbios em computadores e controladores programáveis	Aterramento Bobina de bloqueio, filtro Blindagem
Flutuação de Tensão	Cargas intermitentes Cargas a arco Partida de motor	Flicker (cintilação)	Componentes estáticos Capacitor série
Variação da Freqüência	Variação de carga e geração	Afeta a operação de máquinas girantes e contadores	Controladores de freqüência Conversores CA/CA

Notas:

- (1) Dispositivos de condicionamento de potência são dispositivos com o objetivo de isolar a barra de carga de vicissitudes da barra de suprimento de potência.
- (2) Transformadores de tensão constantes (Constant Voltage Transformer – CVT)
- (3) Sistemas de suprimento ininterrupto de potência
- (4) Equipamentos com eletrônica de potência
- (5) Dynamic Voltage Restorer

Fonte: Brasil (1997).

Transitórios

Os transitórios, via de regra, provocam a degradação ou falha imediata nos isolamentos de equipamentos elétricos, falhas em fontes eletrônicas e desligamentos indevidos em acionamentos de velocidade variável usados em motores.

Harmônicos

Este distúrbio tem maior significado dentro deste capítulo, devido ao fato de que os principais equipamentos adotados em medidas de conservação de energia são responsáveis pela geração dos mesmos. Deste modo, uma maior atenção será dada para os harmônicos.

15.1.4. Harmônicos

A geração de energia elétrica se dá através da frequência fundamental de 60 Hz, de formas de onda perfeitamente senoidais. Harmônicos é o nome dado para uma distorção na forma de onda do sinal elétrico que não possui somente a frequência fundamental em sua composição, mas também, sinais cujas frequências são múltiplas da fundamental.

A explicação deste aparecimento de harmônicos no sistema elétrico está diretamente ligado ao crescimento e uso disseminado das chamadas cargas não lineares. Estas últimas, por sua vez, não apresentam proporcionalidade entre a tensão aplicada com a respectiva corrente.

Os harmônicos são conhecidos no sistema elétrico há muitos anos. Mas, até antes dos equipamentos com base na eletrônica de potência surgirem (conversores estáticos), os elementos não lineares em circuitos elétricos eram relativamente pequenos, fazendo com que a sua influência no sistema fosse insignificante. Atualmente, com o crescimento cada vez maior e mais rápido de cargas com princípio de funcionamento baseado na eletrônica de potência, ditas não lineares, a questão dos harmônicos preocupa pela sua influência no sistema como um todo.

15.1.4.1. Cargas Lineares

As cargas lineares seguem a Lei de Ohm, onde a sua corrente é proporcional à tensão aplicada dividida pela sua impedância. Assim, caso a forma de onda da tensão seja senoidal, a da corrente também será. A Figura 15.5 mostra uma relação entre a tensão e a corrente para um tipo de carga linear.

15.1.4.2. Cargas Não Lineares

A eletrônica de potência disponibilizou para vários setores, como escritórios, indústrias e residências, diversos equipamentos capazes de controlar o produto final: iluminação variável, velocidade ajustável de motores, etc. Desse modo, aproximadamente 50% da energia elétrica passa por um dispositivo de eletrônica de potência antes de ser realmente utilizada. Essa eletrônica faz uso de diodos, tiristores, transistores, sendo que praticamente todos eles operam em modo de interrupção. Isto significa que funcionam essencialmente em dois estados: Condução e Bloqueio. O primeiro corresponde ao período em que o dispositivo permite a passagem de corrente. O segundo estado tem operação inversa ao primeiro, bloqueando a passagem da corrente. Deste modo, a tensão na carga é interrompida pelos semicondutores e deixa de ser senoidal, podendo o usuário variar o instante de condução e conseqüentemente a tensão e a corrente no circuito.

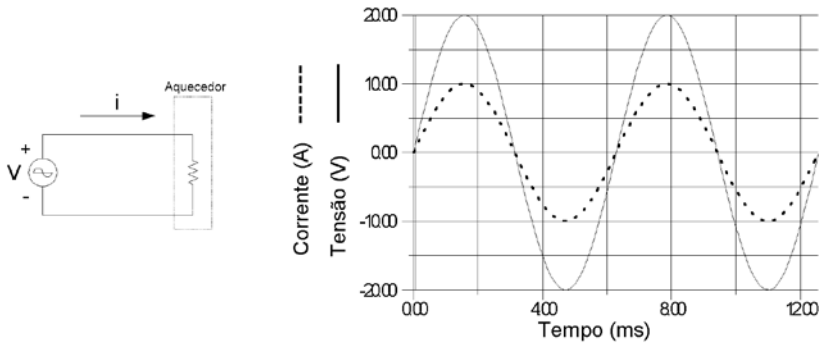


Figura 15.5 – Consumo de um aquecedor de 1kW. Fonte: (Procobre, 1998)

Assim sendo, a forma de onda da corrente em um circuito com cargas não lineares apresenta-se de forma não senoidal. A Figura 15.6 mostra um dispositivo para controlar a corrente em uma carga linear constituída por uma resistência e uma indutância. A tensão é interrompida pelos semicondutores e deixa de ser senoidal. A corrente é nula em determinados intervalos de tempo. Ao resultar na circulação de correntes não senoidais pelo circuito, fala-se da distorção harmônica devido à carga não linear.

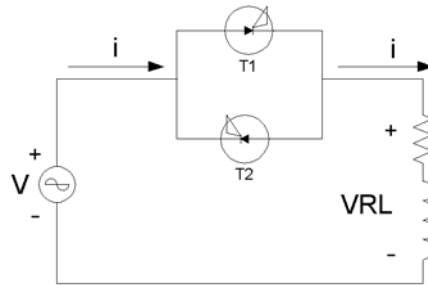


Figura 15.6 – Dispositivo semiconductor de controle da corrente e da tensão – Carga Não Linear

15.1.4.3. Análise Matemática dos Harmônicos

Os sinais, tanto de tensão quanto de corrente, podem ser decompostos em componentes harmônicos. Para tanto, utiliza-se a Série de Fourier de uma função periódica, no domínio da frequência, dada pela equação 15.1:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (15.1)$$

onde:

$x(t)$ - função periódica a ser decomposta em série de Fourier;

a_0 - componente contínua ou valor médio do sinal;

a_n - amplitude de pico das componentes de frequência $n\omega$.

T - período da forma de onda do sinal na frequência fundamental.

Na eletrotécnica, costuma-se utilizar valores eficazes ao invés de valores de pico. Desse modo, a equação 15.2, fica:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \sqrt{2} \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + B_n \sqrt{2} \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (15.2)$$

sendo A_n e B_n valores eficazes do sinal.

Estes coeficientes são obtidos através das seguintes equações:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (15.3)$$

$$A_n = \frac{2}{\sqrt{2} T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot dt \quad (15.4)$$

$$B_n = \frac{2}{\sqrt{2} T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot dt \quad (15.5)$$

Várias outras formas podem ser adotadas, equivalentes à equação 15.2, tais como:

Forma Complexa:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(C_n \sqrt{2} e^{j(n\omega t + \phi_n)} \right) \quad (15.6)$$

sendo

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (15.7)$$

$$\phi_n = -\arctan\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (15.8)$$

Forma Cossenoidal:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(C_n \sqrt{2} \cos(n\omega t + \phi_n) \right) \quad (15.9)$$

Forma Senoidal:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(C_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \phi_n) \right) \quad (15.10)$$

onde:

$$\phi_n = \arctan\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (15.11)$$

Deste modo, sinais de tensão e corrente poderão ser representados pela forma cossenoidal, resultando nas seguintes equações:

$$V(t) = V_0 + V_1 \cos(\omega t + \phi_{v1}) + V_2 \cos(2\omega t + \phi_{v2}) + V_3 \cos(3\omega t + \phi_{v3}) + \quad (15.12) \\ + V_4 \cos(4\omega t + \phi_{v4}) + V_5 \cos(5\omega t + \phi_{v5}) + \dots + V_n \cos(n\omega t + \phi_{vn})$$

$$i(t) = I_0 + I_1 \cos(\omega t + \phi_{i1}) + I_2 \cos(2\omega t + \phi_{i2}) + I_3 \cos(3\omega t + \phi_{i3}) + I_4 \cos(4\omega t + \phi_{i4}) + I_5 \cos(5\omega t + \phi_{i5}) + \dots + I_n \cos(n\omega t + \phi_{in}) \quad (15.13)$$

onde:

V_0 e I_0 são as componentes contínuas dos sinais de tensão e corrente respectivamente.

$V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$ são as respectivas amplitudes das tensões harmônicas.

$I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_n$ são as respectivas amplitudes das correntes harmônicas.

$\phi_{v1}, \phi_{v2}, \phi_{v3}, \phi_{v4}, \dots, \phi_{vn}$ são as fases dos respectivos harmônicos de tensão.

$\phi_{i1}, \phi_{i2}, \phi_{i3}, \phi_{i4}, \dots, \phi_{in}$ são as fases dos respectivos harmônicos de corrente.

“n” é a ordem de cada harmônico.

Cada harmônico tem a sua fase e o seu módulo. Em geral, os harmônicos de ordem par são nulos, devido aos dispositivos que atuam de forma simétrica e periódica. Os harmônicos de ordem elevada são pequenos, fundamentalmente porque as variações são suavizadas pela presença de indutâncias no sistema. A presença de harmônicos pares é sintoma de que o controle dos semicondutores está desajustado e a existência de harmônicos elevados pode ser indício de variações bruscas de tensão ou corrente.

A distorção harmônica pode ser quantificada de várias formas. Uma das mais comuns é a Distorção Harmônica Total – THD (Total Harmonic Distortion) (IEEE 519–1992). Ela representa a distorção devida a todos os harmônicos presentes em um sinal. É definida como sendo uma percentagem da frequência fundamental e é calculada através da equação 15.14:

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\text{Somatório de Todos os Quadrados das Amplitudes de Todos os Harmônicos do Sinal}}{\text{Quadrado da Amplitude da Frequência Fundamental do Sinal}}} \cdot 100\%$$

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}{C_1^2}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}}{C_1} \cdot 100\% \quad (15.14)$$

onde C_1 e C_n são as amplitudes dos harmônicos de frequências fundamental e de ordem “n”, respectivamente, baseados na forma cossenoidal.

Deste modo, basta substituir os valores de C_n por valores de amplitudes de tensão ou corrente para se determinar a Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_v) ou a Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_i), respectivamente. Obtém-se as seguintes equações mais especificamente:

Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_v):

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \cdot 100\% \quad (15.15)$$

Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_i):

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \quad (15.16)$$

O valor total da corrente em um circuito contendo uma carga linear é dado pela equação (15.17), onde I_2, \dots, I_N são as correntes harmônicas e I_1 é a corrente fundamental.

$$I_{TOTAL} (rms) = \sqrt{I_1^2 (rms) + I_2^2 (rms) + I_3^2 (rms) + \dots + I_h^2 (rms)} \quad (15.17)$$

Assim, define-se a Distorção Total Harmônica de corrente - THD_i, conforme (IEEE-519), como sendo:

$$THD_i (\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2 (rms) + I_3^2 (rms) + \dots + I_h^2 (rms)}}{I_1 (rms)} \quad (15.18)$$

ou, conforme (IEC-1000),

$$THD_i (\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2 (rms) + I_3^2 (rms) + \dots + I_h^2 (rms)}}{I_{TOTAL} (rms)} \quad (15.19)$$

A Figura 15.7 mostra um sinal contendo as freqüências fundamental, de 3ª, 5ª e 7ª ordens e o espectro de freqüências do sinal. Neste espectro, pode-se verificar a ordem dos harmônicos existentes no sinal de tensão com as suas respectivas amplitudes.

15.1.4.4. Fontes de Harmônicos

Vários são os tipos de cargas não lineares que geram frequências harmônicas. A maioria delas trabalha com correntes não senoidais. Existem também outros tipos de fenômenos ou arranjos que podem levar um dispositivo ou equipamento a se comportar como uma carga não linear. Entre eles, pode-se citar:

- Saturação do núcleo magnético de transformadores;
- Corrente inrush do transformador;
- Fornos elétricos a arco;
- Pontes trifásicas;
- Computadores e impressoras;
- Compensadores estáticos [VAR];
- Televisores;
- Fornos de microondas;
- Fotocopiadoras;
- Reatores Eletrônicos e Eletromagnéticos;
- Controladores de Velocidade de Motores (ASD – Adjustable Speed Drives), entre outros.
- Conversores DC;

Os conversores estáticos de potência são as principais fontes de correntes harmônicas que causam grande preocupação na atualidade. Englobando inversores e retificadores, eles podem ser divididos em três grupos com relação à geração de harmônicos: conversores de grande, média e baixa potência.

Os de baixa potência estão relacionados com equipamentos de pequeno porte, tais como televisores e computadores e diversos outros eletrodomésticos. Constituem atualmente, devido a sua utilização disseminada, uma grande preocupação para o sistema elétrico, ocasionando muitos problemas para o mesmo (Rocha, A. C.; et. Alii, 1997).

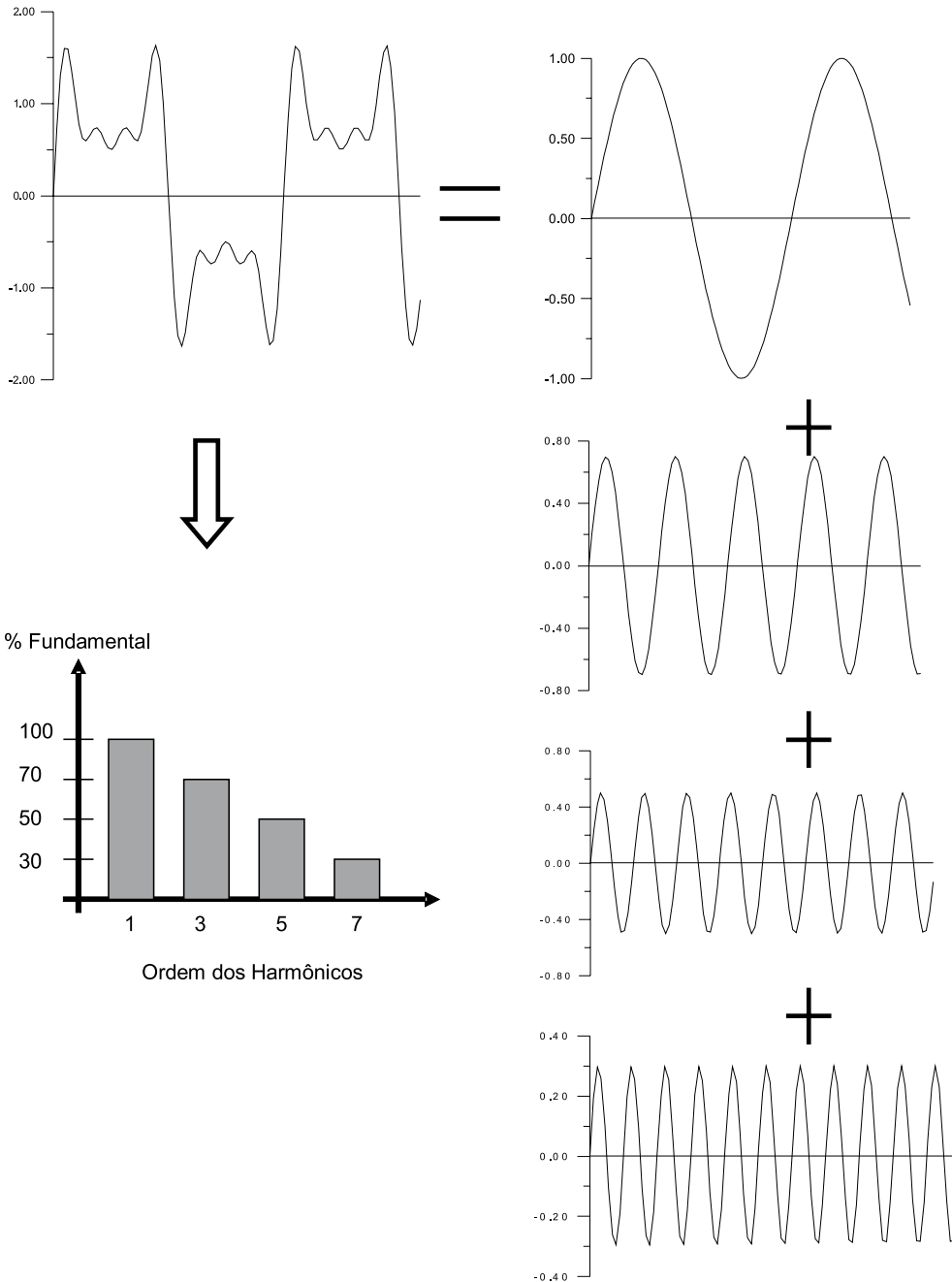


Figura 15.7 – Sinal de tensão com harmônicos ímpares

Tanto os televisores como os computadores e vários outros equipamentos eletrodomésticos são geralmente alimentados por circuitos retificadores de onda completa, com uma capacitância de alisamento de valor bastante elevado, como mostrado na Figura 15.8.

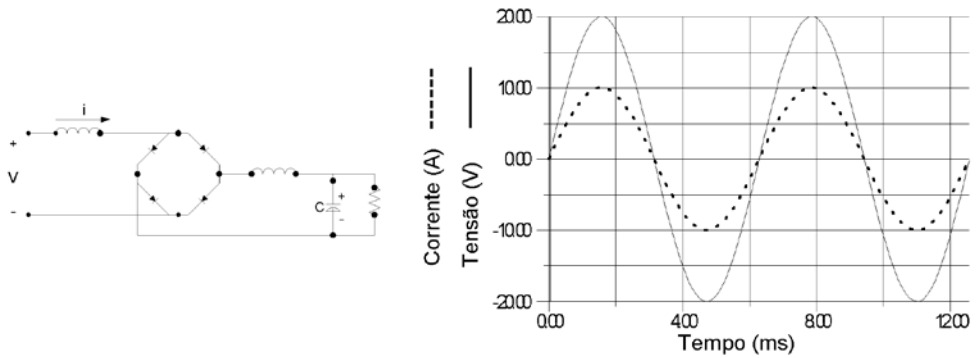


Figura 15.8 – Circuito Retificador de Onda Completa

Pode-se dizer, devido à sua vasta aplicabilidade industrial, que a fonte mais comum de problemas harmônicos em sistemas elétricos de potência, é, certamente, a Ponte Conversora na configuração Graetz. Ela é largamente utilizada em sistemas Controladores de Velocidade de motores ASD's, em sistemas de Transmissão High Very Direct Current (HVDC) e equipamentos como No-Breaks, entre outros. Um exemplo de uma ponte conversora trifásica na configuração Graetz está mostrada na Figura 15.9.

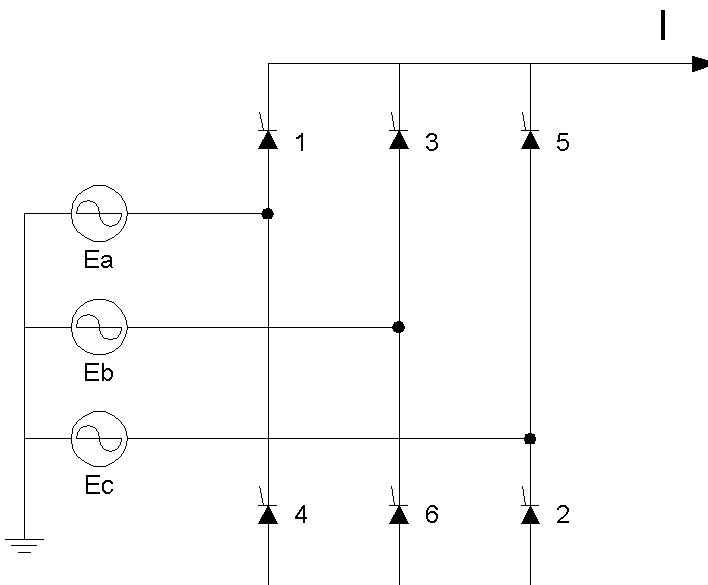


Figura 15.9 – Ponte trifásica na Configuração Graetz

A corrente de alimentação da ponte conversora é não senoidal e, quando decomposta em série trigonométrica de Fourier, apresenta a componente fundamental e componentes harmônicas de ordem $6.n \pm 1$ para $n = 1,2,3,\dots$, assim como pode ser representado pela equação (15.20).

$$I(t) = \frac{8\alpha I}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos(n\alpha\pi)}{1 - (n\alpha\pi)^2} \cos(n\omega t) \quad (15.20)$$

onde:

I é o valor de pico da corrente;

$\alpha = \theta/T$ é a duração com relação ao período da tensão da fonte.

Existem dois fatores importantes que podem ser ressaltados com relação ao efeito de redução dos níveis harmônicos das pontes. O primeiro deles está relacionado com o ângulo de comutação (μ) e o segundo deles com o ângulo de disparo (α) da ponte. Quanto maiores forem estes ângulos, maior será a atenuação da componente harmônica com relação à componente fundamental com ângulo de comutação zero graus (Rezek, A.J.J., 1995).

Por serem cargas de pequena potência, muitas vezes o nível de distorção harmônica causada pela mesma não afeta o sistema. Mas, o efeito, devido ao elevado número destes equipamentos existentes na rede elétrica, pode tornar-se significativo.

A contribuição harmônica de equipamentos de pequenas potências pode ter efeitos maiores ou menores sobre o sistema elétrico, quando levados em consideração alguns aspectos, tais como (De Vré, 1994):

- Fator de Saturação (K_{sa}): Relação entre o número de consumidores que possuem o equipamento e o número total de consumidores ligados ao sistema;
- Fator de Simultaneidade (K_v): Relação entre o número de consumidores cujos aparelhos estão em funcionamento em determinado horário e o número de consumidores que possuem tal aparelho;
- Fator de Dispersão (K_d): Relação entre a soma vetorial e a soma algébrica das correntes harmônicas de determinada ordem, geradas pelos equipamentos existentes.

Deste modo, a corrente harmônica injetada em uma determinada barra do sistema pode ser obtida através da equação (15.21):

$$I_{h_r} = K_{sa} \cdot K_d \cdot K_v \cdot N \cdot I_h \quad (15.21)$$

sendo:

h - ordem harmônica;

I_{h_r} - Corrente resultante da operação de um número determinado de equipamentos;

I_h - Corrente harmônica gerada por um único equipamento;

N - número de consumidores alimentados pela barra em análise.

Controladores de Iluminação (Dimmers)

Um sistema similar ao apresentado pela Figura 15.9, pode ser utilizado para regular o fluxo de luz emitido por uma lâmpada incandescente. É certo que, a plena carga, os semicondutores conduzem o tempo todo, a tensão e a corrente são senoidais. Para diminuir a intensidade luminosa, os semicondutores operam durante um tempo mais curto, diminuindo a potência fornecida à lâmpada. Nesse caso, a corrente que passa através da lâmpada e do sistema apresenta distorções harmônicas.

A Figura 15.10 mostra a variação da 3ª harmônica em função da potência da lâmpada. Pode-se observar que, entre 15 e 75% de luminosidade, a corrente de 3ª harmônica varia entre 0,18 a 0,20A no máximo, ou seja, aproximadamente 30% da corrente nominal da lâmpada.

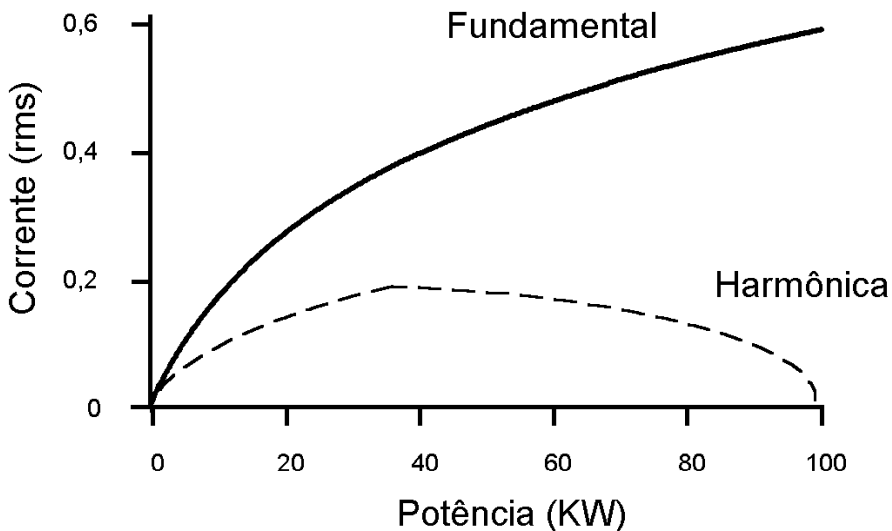


Figura 15.10 - Variação da corrente harmônica em função da potência de uma lâmpada (Procobre 1998)

Lâmpadas de Descarga

A família das lâmpadas de descarga incluem as lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio, e as lâmpadas fluorescentes compactas. Estas lâmpadas possuem características não lineares, portanto, causam distorções na forma de onda da corrente. As maiores distorções são observadas nas lâmpadas fluorescentes compactas, por possuírem starter e reatores eletrônicos.

Fornos a Arco

O conteúdo harmônico produzido por fornos a arco variam continuamente devido à condição de operação do forno, posição dos eletrodos, aleatoriedade dos arcos entre os eletrodos, posição dos eletrodos com relação ao terra, entre outros. Uma característica destes fornos é a presença de sub-harmônicos, isto é, harmônicos cujas frequências não são múltiplos inteiros da frequência fundamental.

A título de exemplo de alguns equipamentos, a Tabela 15.2 mostra os resultados da medição harmônica feita em alguns equipamentos.

15.1.4.5. Efeitos dos Harmônicos

Alguns dos problemas originados pelos harmônicos podem ser listados a seguir:

Perdas adicionais e aquecimento em máquinas elétricas e capacitores

- aumento das perdas no ferro devido às correntes parasitas induzidas;
- torques parasitas a baixas velocidades.

Alguns trabalhos realizados (SEN, 1990) verificaram que o aquecimento de um motor de indução está relacionado não só com a Distorção Harmônica Total de Tensão como também está diretamente relacionado com a intensidade de determinadas harmônicas.

Em outros estudos, comprova-se que o aquecimento do motor devido ao 2º harmônico é 3 vezes maior do que aquele com o 5º ou outros harmônicos. (Yacamini, 1995).

Tabela 15.2 – Emissão de harmônicos de alguns equipamentos residenciais, comerciais e industriais

Equipamento Avaliado	Distorção Harmônica Total de Corrente - THDi (%)
Aparelho de ar condicionado	123
Microcomputador com impressora conectada	86,8
Televisão com decodificador para TV a cabo	92,3
Chuveiro com tap's para ajuste de temperatura	36,6
Geladeira	7,2
Lavadora de roupas	5,7
Lavadora de louças	10,3
Forno microondas	46,1
Exaustor	32,1
Aparelho de som com CD	103,5
Televisão com vídeo cassete	129,1
Vídeo Game	32,1
Lâmpada fluorescente	35,8
Ventilador	4,2
Cafeteira	2,3
Torradeira	2,1
Carregador de bateria	83,1
Telefone sem fio	39,5
Telefone sem fio com secretária eletrônica	47,0
Rádio relógio	52,1
Transformadores de uso doméstico (50W)	33,3
Portão eletrônico	13,0

Fonte: (Aloísio, 1997)

Sobretensões devido a ressonâncias

Na Figura 15.11 caso um banco de capacitores seja conectado ao barramento de um conversor, para correção do fator de potência, tem-se o circuito equivalente para o harmônico de ordem "n".

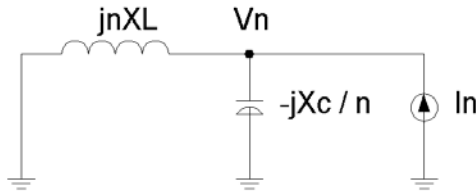


Figura 15.11 – Circuito equivalente para harmônica de ordem “n”

No caso da ressonância paralela, tem-se:

$$nX_L = \frac{X_C}{n} \quad (15.22)$$

$$Z_{eq} = \frac{(jnX_L) \cdot \left(-j\frac{X_C}{n}\right)}{j \cdot \left(nX_L - \frac{X_C}{n}\right)} \quad (15.23)$$

sendo

$$V_n = Z_{eq} \cdot I_n \quad (15.24)$$

e como V_n é muito elevado devido à ressonância, tem-se:

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \text{ou} \quad \sqrt{\frac{S_{cc}}{S_{bc}}} \quad (15.25)$$

sendo

S_{cc} - Potência de curto circuito no barramento do conversor;

S_{bc} - Potência do banco de capacitores, nominal.

Isto significa que a distorção de tensão cresce no sistema e, o que é mais grave, o sistema apresentará uma ressonância em torno de uma determinada frequência harmônica. Assim, os capacitores contribuem com o fenômeno da ressonância, podendo em muitas vezes ser o próprio banco danificado (explodir), ou danificar outros equipamentos, como transformadores.

Interferências

Interferências em sistemas de comunicação; circuitos telefônicos, circuitos de proteção e controle que operam em uma faixa de frequência de 100 Hz a 4 kHz; disjuntores.

Os disjuntores termomagnéticos usuais possuem um disparador térmico sensível ao aquecimento produzido pela corrente do circuito protegido. Tal disparador é projetado para responder ao valor eficaz (real) da corrente de modo a atuar quando se aquece acima de um certo limite. Nessas condições, num circuito que alimenta cargas não lineares, pode ocorrer o disparo do disjuntor com uma corrente, medida por um amperímetro convencional, inferior (ou igual) à nominal do dispositivo, o que caracterizaria um disparo “aparentemente” intempestivo; na realidade o disjuntor está protegendo adequadamente o circuito contra uma sobrecarga produzida pelas harmônicas.

No caso dos disjuntores eletrônicos o problema é diferente. Se o disparador não for projetado para responder a valores eficazes reais e sim a valores de crista, frente a correntes com resíduo harmônico, ele poderá detectar valores muito altos e disparar prematuramente, ou detectar valores muito baixos e deixar de atuar, dependendo da forma de onda da corrente; isso caracteriza um funcionamento não confiável do disjuntor.

Aumento da Corrente de Neutro

Em instalações contendo muitas cargas monofásicas não lineares, caso típico de edifícios comerciais e análogos contendo grande quantidade de aparelhos de iluminação fluorescente e de microcomputadores, a corrente de neutro nos circuitos de distribuição trifásicos a 4 condutores, mesmo havendo um equilíbrio razoável entre as cargas, é superior à “corrente de desequilíbrio”, podendo mesmo superar a corrente de fase. Isso deve-se às correntes harmônicas de ordem 3 e múltiplos que somam-se ao neutro. Na prática destacam-se as correntes de 3ª harmônica e as de frequência ímpar e múltipla de 3 (9ª, 15ª, 21ª, etc.), conhecidas como harmônicas homopolares.

Observe na Figura 15.12 a fase do harmônico de 3ª ordem e perceba que em todas as fases do sistema (seja A, B e C ou R, S e T) estes harmônicos possuem a mesma fase, ou seja a mesma polaridade.

Uma corrente excessiva no neutro causa sobreaquecimento do condutor, de suas conexões e da barra de neutro, e também uma queda de tensão no circuito, que pode superar os limites fixados.

Atualmente a norma NBR5410 apresenta um critério de dimensionamento aplicável a circuitos trifásicos a 4 condutores, com um desequilíbrio inferior a 50% onde é prevista corrente harmônica de 3ª ordem no neutro. Neste caso os 4 condutores devem ser dimensionados com a mesma seção, considerando-os carregados.

(ver Tabela 15.3). Quando a corrente de neutro é inferior ou igual a de fase, toma-se como base a corrente de fase e quando for superior a de fase, o dimensionamento é feito com base na corrente de neutro.

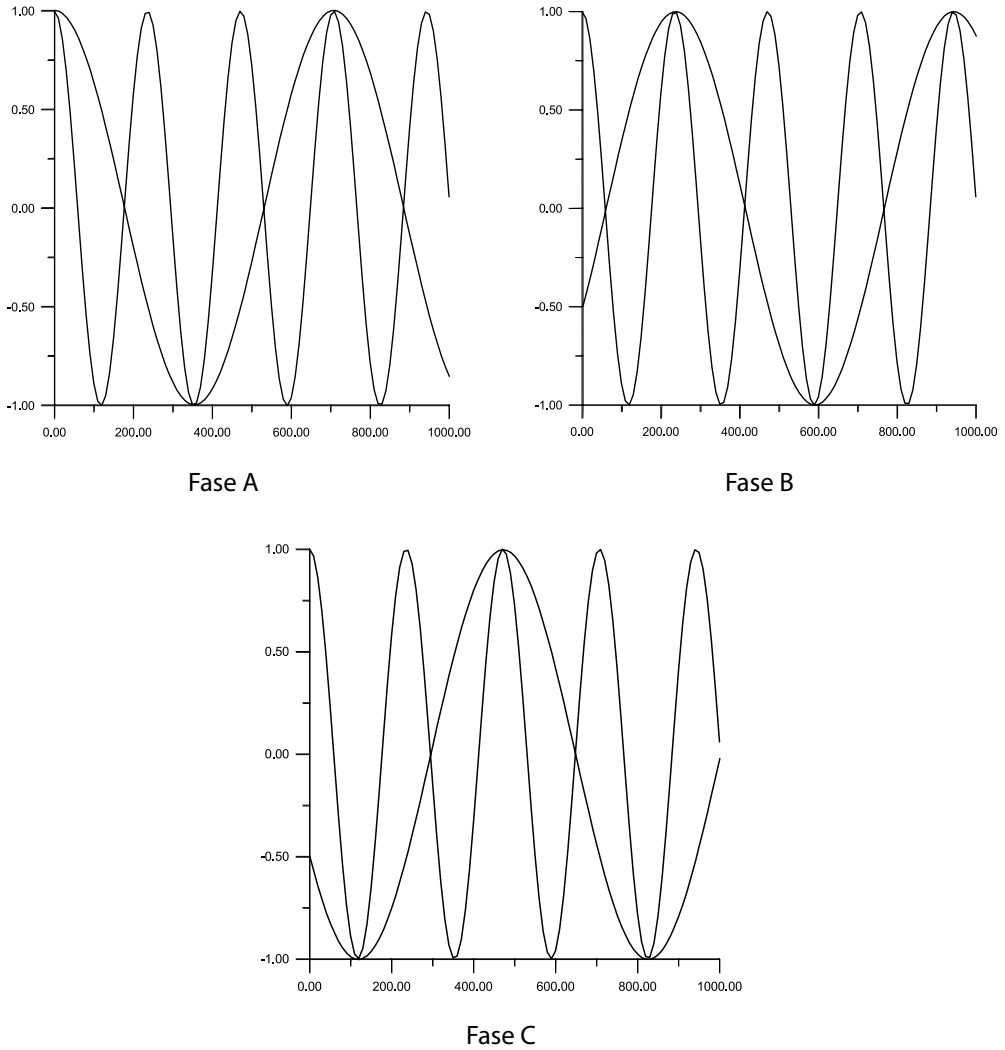


Figura 15.12 – Harmônicos Homopolares

Tabela 15.3 - Fatores de Correção para correntes harmônicas em circuitos trifásicos com neutro

Fator de 3ª harmônica da corrente de fase (%) (p)	Fator de Redução (fr)	
	Dimensionamento pela corrente de fase (IF)	Dimensionamento pela corrente de neutro (IN)
0 – 15	1,0	----
15 – 33	0,86	----
33 – 45	----	0,86
> 45	----	1,0

Fonte: NBR 5410/1997

$$\text{Para } I_N \leq I_F \rightarrow I'_F = I = \frac{I_F}{fr} \quad (15.25-a)$$

$$\text{Para } I_N \leq I_F \rightarrow I_N = I_F \cdot \frac{p}{100} \cdot 3 = I'_N = \frac{I_N}{fr} = \frac{1}{fr} \cdot I_B \cdot \frac{p}{100} \cdot 3 \quad (15.25-b)$$

Erros em Instrumentos Convencionais por Efeitos Harmônicos

Os medidores residenciais apresentam variações em suas medições quando sob condições harmônicas, dependendo do grau de intensidade desta última. Trabalhos realizados com o objetivo de se determinar estas variações apresentaram os seguintes resultados:

- Para uma bomba de calor com acionamento controlável de velocidade, tendo como distorção harmônica total de tensão THDV = 6,03% e de corrente THDI = 32,33%, apresentou erros de +7,97% a +9,46% do valor correto (valor sem distorção). Já para o caso de uma estação bombeadora com um motor à velocidade controlada por um retificador de 6 pulsos, com desbalanço de tensão de 5,55% e corrente de 28,0% chegou a apresentar erros de -10,09% a +0,52% do valor correto. Esta diferença se deu devido às distorções e à diferença dos medidores utilizados. (Guimarães, 1997). Desbalanço de tensão é definido como a diferença dos valores de tensão por fase do sistema. O mesmo conceito é aplicado para a corrente.
- Em outro teste realizado com um medidor trifásico convencional os erros variaram de +1,32% a +7,05% do valor correto para determinado nível de distorção.

Aumento de Perdas em Condutores

Existem duas formas através das quais as correntes harmônicas podem causar aquecimento em condutores acima do esperado para os valores de corrente fundamental.

A primeira delas é a redistribuição da corrente dentro do condutor que inclui o efeito pelicular (skin) e o efeito de proximidade. A segunda forma se dá através da corrente de neutro em circuitos trifásicos a 4 fios nos sistemas de distribuição com cargas monofásicas, já comentado anteriormente no item D.

O efeito pelicular é a concentração da corrente na camada externa do condutor. Com ele a resistência do condutor aumenta. Este efeito aumenta com a frequência e com o diâmetro do condutor.

O efeito de proximidade é devido à distorção que o campo magnético de outros condutores adjacentes causam sobre a corrente do condutor em questão.

As perdas nos cabos são dadas pela equação:

$$I^2 R = (I_1^2 + I_h^2) \cdot R = R \cdot I_1^2 + R \cdot I_h^2 \quad (15.26)$$

$$I^2 (\text{rms}) = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2 \quad (15.27)$$

sendo I a corrente rms que circula pelo mesmo, I_1 a corrente na frequência fundamental, I_h as correntes harmônicas e R a sua resistência, que é a resistência R_{cc} acrescida de um valor devido aos efeitos pelicular e de proximidade, aqui chamada de R_{CA} . Tem-se deste modo um acréscimo nas perdas devido a estes efeitos (NBR 11301, 1990; Key, 1996).

Levando-se em conta os efeitos relativos à frequência, a resistência elétrica do condutor em corrente alternada (RCA) na temperatura de operação é calculada através da equação 15.28:

$$R_{CA} = R_{CC} (1 + Y_s + Y_p) \quad (15.28)$$

onde

Y_s - fator de efeito pelicular.

Y_p - fator de efeito proximidade.

Na temperatura de operação, a resistência do condutor em corrente contínua (R_{CC}) é calculada pela seguinte equação:

$$R_{CC} = R_{CC20} [1 + \alpha_{20} (\theta_c - 20)] \quad [\Omega/m] \quad (15.29)$$

sendo

R_{CC20} - resistência elétrica do condutor em corrente contínua a 20°C, em (Ω/m).

θ_c - máxima temperatura de operação (°C);

α_{20} - coeficiente de temperatura a 20°C para correção da resistividade K.

O fator de efeito pelicular é dado por:

$$Y_s = \frac{X_s^4}{(192 + 0,8X_s^4)} \quad (15.30)$$

sendo

$$X_s^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot K_s \cdot 10^{-7}}{R_{CC}} \quad (15.31)$$

onde:

X_s - argumento da função de Bessel usado no cálculo do efeito pelicular.

f - frequência do sistema, em Hz;

K_s - coeficiente utilizado para o cálculo de X_s .

O fator de efeito proximidade, para cabos com duas veias e para dois cabos unipolares, é dado por:

$$Y_p = \frac{X_p^4}{(192 + 0,8X_p^4)} \cdot \left(\frac{dc}{s}\right)^2 \cdot 2,9 \quad (15.32)$$

sendo

$$X_p^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot K_p \cdot 10^{-7}}{R_{CC}} \quad (15.33)$$

onde:

X_p - argumento da função de Bessel usado no cálculo do efeito proximidade;

f - frequência do sistema, em Hz;

s - distância entre os eixos dos condutores adjacentes, em mm;

dc - diâmetro do condutor, em mm.

K_p - coeficiente utilizado para o cálculo de XP.

O fator de efeito proximidade, para cabos tripolares e para três cabos unipolares, é dado por:

$$Y_p = \frac{X_p^4}{(192 + 0,8X_p^4)} \cdot \left(\frac{dc}{s}\right)^2 \cdot \left[0,312 \left(\frac{dc}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_p^4}{(192 + 0,8X_p^4)} + 0,27} \right] \quad (15.34)$$

sendo

$$X_p^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot K_p \cdot 10^{-7}}{R_{cc}} \quad (15.35)$$

Desta forma, pode-se observar que, com a introdução de harmônicos, a resistência R_{cc} de um condutor aumenta, implicando num aumento de perdas para o mesmo. A perda nos condutores devido aos harmônicos (P_{HC}) pode ser determinada através da equação abaixo:

$$P_{HC} = \sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot R_h \quad (15.36)$$

sendo R_h as resistências do condutor (R_{CA}), para cada nível harmônico, obtidas através das equações anteriores.

Redução da Vida Útil de Lâmpadas Incandescentes

As lâmpadas incandescentes têm uma perda de vida útil diminuída quando operam com tensões distorcidas. Isto porque elas são sensíveis às variações de tensão. Se a tensão rms de operação da lâmpada está acima da sua nominal, devido aos harmônicos (por exemplo), a elevação da temperatura do seu filamento reduzirá a sua vida útil. Demonstra-se que uma operação contínua com 105% da tensão nominal implica numa redução de 47% da vida útil da lâmpada. (Kaufman, 1981).

Necessidade de Sobredimensionamento de Transformadores e suas Perdas

As características nominais dos transformadores e geradores baseiam-se no aquecimento provocado por correntes de carga senoidais de frequência 60 Hz. Quando as correntes são senóides distorcidas, com forte conteúdo de harmônicos, o aquecimento provocado é consideravelmente maior do que o esperado para correntes senoidais do mesmo valor. As principais razões desse superaquecimento são

a histerese, as correntes parasitas de Foucault, sem se esquecer dos efeitos pelicular e de proximidade nos enrolamentos (bobinas).

O primeiro efeito causado pelos harmônicos em transformadores é o seu aquecimento adicional. Outros podem ser definidos como sendo a ressonância causada entre a indutância do transformador e a capacitância do sistema, stress mecânico da isolamento (fios e lâminas) devido ao ciclo de temperatura e a uma pequena vibração mecânica dos fios. (Wagner, V. E., 1993).

A fim de levar em consideração a presença de correntes harmônicas, a corrente de projeto de um transformador deve ser multiplicada, para cada ordem de harmônico, por um fator "K". Este fator de correção ou majoração é dado pela equação que segue:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \cdot \sum h^{1,6} \cdot I_h^2}} \quad (15.37)$$

A Tabela 15.4 mostra o resultado de uma decomposição de uma onda contendo harmônicos e os respectivos fatores "K" para o transformador.

Tabela 15.4 - Fatores de correção (K) para um transformador sujeito a harmônicos

Ordem do Harmônico (h)	Intensidade da Corrente (A) (rms)	Nível do Harmônico Ih (%)	Fator K
1 (fundamental)	104	100	----
3	84	81	0,851
5	64	61	0,820
7	40	38	0,870
9	16	15	0,960
Valores Globais	157	113	0,690

Fonte: (Revista Eletricidade Moderna, Janeiro de 1997).

Nesta tabela, verifica-se que o valor global do fator "K" é igual a 0,69. O que representa um aumento de potência de 45,6% devido aos harmônicos. Ou seja, nestas condições um transformador é capaz de fornecer apenas 69% de sua potência nominal. Para obter-se a potência necessária, é preciso escolher um transformador com potência nominal majorada de 45,6%.

Por exemplo, se a potência correspondente à corrente de projeto de uma instalação é de 630kVA, deve-se escolher um transformador com potência nominal igual a: $630 / 0,69 = 630 \times 1,456 = 917 \text{ kVA}$, ou seja, na prática, um transformador de 1000kVA.

As Perdas em Transformadores (Key, 1996), (Emanuel, 1985).

As perdas nos transformadores incluem as perdas em vazio (P_{NL}) e em carga (P_{LL}) como mostrado na equação (15.38). A perda em carga é uma função da corrente de carga, que pode ser dividida em perda de potência (por efeito Joule) I^2R (P_R) e perdas parasitas (ou de dispersão). As perdas parasitas são causadas por correntes de Foucault que produzem fluxos parasitas em bobinas, núcleo, paredes do tanque e outras partes estruturais. As perdas devidas às correntes de Foucault, nas bobinas, são as mais dominantes para as correntes harmônicas. Estas perdas são representadas por P_{EC} . As outras perdas parasitas das partes estruturais do transformador são definidas como P_{ST} . A equação (15.39) relaciona tais perdas.

$$P_{LOSS} = P_{NL} + P_{LL} \tag{15.38}$$

onde

$$P_{LL} = P_R + P_{EC} + P_{ST} \tag{15.39}$$

Para correntes de cargas não-senoidais, a corrente total (I_{rms}) pode ser obtida conforme equação (15.27), e a perda de potência devida a esta corrente pode ser obtida através da equação (15.40):

$$P_R = \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 R_h \tag{15.40}$$

As perdas devidas às correntes de Foucault nas bobinas aumentam proporcionalmente com o quadrado do produto entre as correntes harmônicas (I_h) e suas respectivas ordens de freqüências (h). Dado a perda devida à corrente de Foucault na freqüência fundamental (P_{EC-1}), a perda total incluindo as devidas às componentes harmônicas pode ser calculada conforme a equação (15.41):

$$P_{EC} = P_{EC-1} \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2 \tag{15.41}$$

Esta relação tem sido precisa para harmônicas de baixa ordem (3a, 5a, 7a) e estimada para harmônicas de ordem superior (9a, 11a, 13a e assim por diante) particularmente para diâmetros grandes das bobinas e para transformadores de grande capacidade.

Obs. A perda por correntes parasitas de Foucault, sob condições nominais ($PEC-1$), pode ser obtida através de ensaio a vazio ou diretamente com o fabricante.

15.1.4.6. Normalização Harmônica

No contexto internacional existem normas relativas ao monitoramento da QEE (IEEE-1159,1995) e outras normas que estabelecem limites harmônicos para sistemas elétricos de energia em altas tensões (IEEE-519, 1992), e em sistemas a níveis de tensões de distribuição (IEC-1000, 1990).

O aspecto fundamental e inovador da norma IEEE-519, 1992, é a divisão da responsabilidade do problema de harmônicos entre os consumidores e a concessionária. Neste caso, os limites de distorções de tensão no ponto de ligação são de responsabilidade da concessionária, e os limites de distorção de corrente, neste mesmo ponto, são de responsabilidade dos consumidores (Tabelas 15.5 e 15.7).

A recomendação brasileira (ELETROBRÁS, 1993) sugere limites harmônicos (globais e por consumidor) para sistemas de tensões inferiores e superiores a 69KV (Tabelas 15.6 e 15.8).

Já a norma europeia IEC1000, referência mundial para as medições dos níveis harmônicos em sistemas de distribuição, fornece as principais características da tensão, no ponto de entrega ao consumidor, em baixa e média tensão, sob condições normais de operação (Tabela 15.9).

Tabela 15.5 - Limites de distorção de tensão – IEEE 519

Tensão no PAC	Distorção de tensão	
	Por Consumidor (%)	Total (%)
Abaixo de 69 kV	3,0	5,0
69 a 138 kV	1,5	2,5
138 kV e acima	1,0	1,5

PAC é o Ponto de Acoplamento Comum entre a concessionária e a entrada do consumidor.

Tabela 15.6 - Limites de tensão por consumidor expressos em % da tensão fundamental (Eletrobrás, 1993)

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3 a 25 ≥ 27	1,5 % 0,7 %	Todos	0,6 %	3 a 25 ≥ 27	0,6 % 0,4 %	Todos	0,3 %
THD _v = 3 %				THD _v = 1,5 %			

Tabela 15.7 - Limites de distorção da Corrente (120 V a 69 kV) – IEEE 519

Corrente harmônica máxima em % da fundamental						
Ordem das harmônicas (harmônicas ímpares)						
Isc/IL	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	THD1
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

As harmônicas pares são limitadas a 25% dos valores indicados acima para as harmônicas ímpares.

Tabela 15.8 - Limites globais de tensão em % da tensão fundamental - Eletrobrás, 1993

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor	Ordem	Valor
3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 a 25 ≥ 27	5 % 3% 2% 1%	2, 4, 6 ≥ 8	2 % 1 %	3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 a 25 ≥ 27	2% 1,5% 1% 0,5%	2, 4, 6 ≥ 8	1 % 0,5%
THD _v = 6 %				THD _v = 3 %			

Tabela 15.9 - Níveis de tensão harmônica individual em redes de baixa tensão.
IEC1000-2-2

Harmônicos ímpares Não múltiplos de 3		Harmônicos ímpares múltiplos de 3		Harmônicos pares	
Ordem do Harmônico h	Harmônico de tensão %	Ordem do Harmônico h	Harmônico de tensão %	Ordem do Harmônico h	Harmônico de tensão %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
> 25	0,2+0,5*25/h				

A recomendação da norma IEEE 519 limita a distorção dos harmônicos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC – Ponto físico que liga a concessionária e o consumidor), sem levar em consideração cada consumidor individualmente.

De uma forma geral, as normas atualmente existentes não abordam um número suficiente de distúrbios relacionados com a QEE. Torna-se extremamente importante que as empresas de energia, o governo, os consumidores e os fabricantes, juntamente com os órgãos de pesquisa, tomem iniciativas de se determinar, regulamentar e normalizar os níveis adequados das distorções voltados à QEE.

15.1.5. Algumas Medidas Técnicas e Operacionais de Mitigação/Eliminação de Alguns Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica.

A. *Utilização de No-Breaks nos sistemas ou em equipamentos específicos:* Esta solução permite que o equipamento protegido não “perceba” os distúrbios elétricos. Pode ser considerada uma solução egoísta, pois proporciona proteção individual, sem resolver a origem do problema.

B. *Utilização de Filtros Harmônicos:* São elementos incorporados no sistema para a

redução dos harmônicos ou redução do fator de potência de uma forma geral. Podem ser passivos, ativos, eletrônicos e de reator de linha. Retificadores PWM, Conversores BOOST, também são usados para estas finalidades. Muitas vezes apresentam como co-efeito destas duas ações principais outras secundárias como: Redução da corrente de neutro em sistemas trifásico; minimização do impacto (menores perdas) sobre os transformadores de distribuição; efeito isolante para outras fontes harmônicas (oriundas de outros sistemas); eliminação de possíveis ressonâncias com banco de capacitores utilizados para a correção do fator de potência; mitigação de problemas como interferência em sistemas de comunicação; aumento indireto da eficiência de motores e liberação da capacidade de distribuição para a concessionária. (TOM, 1998).

- C. *Utilização de Condicionadores de Potência (Power Conditioners)*: No caso de distúrbios como a depressão de tensão, estes equipamentos são capazes de fornecer altas potências em pequenos intervalos de tempo. Um exemplo real é o "SMES - Superconductor Magnetic Energy Storage", projetado por BABCOCK & WILCOX para o sistema isolado do ALASCA (600MW) e capaz de fornecer 30MW durante um período superior a 20 segundos, garantindo, desta maneira, a forma original da onda do sinal elétrico. (HEI, 1998).
- D. *Mudanças no Sistema de Distribuição*: Com mudanças na forma de ligação dos transformadores dos sistemas de Distribuição, torna-se muitas vezes possível a isolamento de determinadas frequências harmônicas do restante do sistema ou a disseminação de outros distúrbios.
- E. *Utilização de equipamentos não geradores de distúrbios*: Alguns equipamentos utilizados no sistema são geradores de distorções, como por exemplo as cargas não lineares. A substituição dos mesmos por outros não tão poluidores ajudaria a resolver o problema.

15.1.6. Aspectos de Responsabilidades Relacionados com a Emissão dos Distúrbios da QEE

Atualmente existe uma discussão a respeito de como deverá ser feita a distribuição de responsabilidades entre os consumidores, fabricantes e concessionários, dos problemas gerados pela distorção harmônica.

Alguns autores sugerem a cobrança do "excedente" harmônico, assim como é feito para a energia reativa, através do fator de potência (Portaria DNAEE 1569). O excedente harmônico seria cobrado dos consumidores que ultrapassassem determinados limites estabelecidos por lei. Limites estes chamados de "limites de referência".

Mas, sabe-se que a distorção harmônica causa danos e perdas diferenciadas

quando comparadas com as perdas devido ao excedente reativo. A distorção harmônica não é algo que possa ser simplesmente cobrada. É uma distorção nociva ao sistema que deve ser minimizada e/ou eliminada. Diferentemente do excesso de potência reativa que tem como problema principal a ocupação do sistema elétrico. Dentro desta linha de pensamento, de que a distorção harmônica deve ser eliminada e não tarifada simplesmente, existem outros autores que defendem tal abordagem. Desta forma, a atual legislação não cobre tais problemas, mas está em busca de uma solução.

De uma forma geral, o importante é estar consciente de que a minimização da distorção harmônica pode e deve ser de responsabilidade de todos os "atores" envolvidos no setor elétrico. Sejam os consumidores ou as concessionárias, através de medidas de mitigação, os fabricantes com a melhoria da qualidade de seus produtos e o órgão regulador com a elaboração de normas que visem a adequação dos níveis de qualidade.

15.1.7. Nova Definição de Potência (Watanabe, 1993; Emanuel, 1998; Arango, 1997; Mielczarski, 1998)

A potência aparente para sistemas trifásicos, simétricos e lineares, com tensão e corrente senoidais é definida pela fórmula dada pela equação abaixo:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (15.42)$$

sendo suas potências ativa (P) e reativa (Q) dadas pelas fórmulas seguintes:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (15.43)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (15.44)$$

Desta forma a relação com a potência aparente fica:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (15.45)$$

Define-se o Fator de Potência (FP), através da relação dada pela equação a seguir:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos \varphi \quad (15.46)$$

Atualmente, os sistemas elétricos não se apresentam única e exclusivamente senoidais e lineares devido a vários motivos, entre eles, a existência das distorções harmônicas, apresentadas anteriormente, assimetrias, etc. Neste contexto, o sistema elétrico apresenta potências diferentes das apresentadas. Alguns autores definem outras potências ditas não ativas tais como:

- Potência de Assimetria - A;

- Potência Harmônica – H;

Tomando a nova potência aparente a seguinte forma:

$$S_T = \sqrt{P^2 + Q^2 + A^2 + H^2} \quad (15.47)$$

apresentando deste modo um novo fator de potência, dado por:

$$FP_T = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + A^2 + H^2}} = \cos \theta < \cos \varphi \quad (15.48)$$

Considerando um sistema trifásico e simétrico, com harmônicos apenas na corrente ($V_1 = V$), define-se as potências ativa (PT) e reativa (QT):

$$P_T = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (15.49)$$

$$Q_T = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sen \varphi_1 \quad (15.50)$$

sendo o índice "1" relacionado com a freqüência fundamental.

Assim, o fator de potência real "FPT" será dado por:

$$FP_T = \frac{P_T}{S_T} \quad (15.51)$$

Como I é dada pela equação (1.27), o fator de potência real fica:

$$FP_T = \frac{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \varphi_1 \quad (15.52)$$

$$FP_T = \frac{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \varphi_1 \quad (15.53)$$

e é chamado de fator de potência real, sendo KI o fator de distorção dado por:

$$K_I = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N I_i^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (15.54)$$

onde $\cos \varphi_1$ é o fator de deslocamento entre as formas de onda de corrente e tensão fundamentais.

Torna-se importante observar que na presença de harmônicos, o fator de potência real é menor do que o fator de potência de deslocamento.

15.1.8. Nova Proposta Tarifária para Ambientes Distorcidos

O sistema elétrico é tarifado pelo seu excedente reativo através do fator de potência. Este por sua vez é definido para condições senoidais simétricas e lineares.

A cobrança pela energia excedente é calculada multiplicando-se um fator que leva em conta uma relação entre um fator de potência de referência (dFR) atualmente com valor de 0,92 pelo fator de potência medido no sistema.

A energia excedente é assim calculada:

$$\text{Medição Reativa} = \left(\frac{0,92}{\text{dFP}} - 1 \right) \cdot \text{Medição Ativa} \quad (15.55)$$

Mas, dependendo das condições de distorção e assimetria do sistema, o fator de potência pode tomar formas que dependam destes distúrbios. Em tais condições, pode-se escrever (Arango, 1997):

$$\text{FP} = (\cos\varphi_B) \cdot (\text{aFP}) \cdot (\text{hFP}) \quad (15.56)$$

Note-se que o primeiro fator do 2º membro $\cos\varphi_B$, representa o efeito da defasagem entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente, sendo que na condição ideal coincide com o próprio fator de potência (dFP). Já os outros fatores levam em consideração os efeitos da assimetria (aFP) e não linearidade da carga (hFP).

Considerando agora a existência de três componentes do fator de potência total ou real (FPT), basta aplicar a cada um o conceito de excedente. Poderá haver, assim, três excedentes. O primeiro é aquele já levado em conta para o cálculo do excedente atualmente apresentado pela Resolução ANEEL nº 456/2000, isto é, o excedente reativo, mostrado conforme fórmula 15.55 sendo $\text{dFR} = 0,92$

Os outros excedentes teriam um formato análogo:

- Devido à Assimetria:

$$\left(\frac{\text{aFR}}{\text{aFP}} - 1 \right) \cdot \text{Medição Ativa} \quad (15.57)$$

- Devido aos Harmônicos

$$\left(\frac{\text{hFR}}{\text{hFP}} - 1 \right) \cdot \text{Medição Ativa} \quad (15.58)$$

Vale notar que a soma da parcela convencional da fatura destes três exceden-

tes representa um valor aproximadamente proporcional aos consumos aparentes da carga, ou seja, aqueles gerados pela expressão "VI" produto dos valores eficazes de tensão e a corrente, e que corresponde a definição moderna de potência aparente em sistemas de três fios. A Figura 15.13 mostra o triângulo de potências para ambientes distorcidos.

Considerações sobre os fatores de referência (CED, 1998)

Para o fator de referência reativo, dFR a norma brasileira estipula o seu valor em 0,92. Já para os valores de referência distorcivos e assimétricos existe a necessidade de determiná-los.

O mais relevante fenômeno de distorção é a presença de harmônicos. Assim, o fator distorcivo pode estar relacionado ao conteúdo harmônico total da onda de corrente, o THDi.

$$hFP = \sqrt{\frac{1}{1 + THD_i^2}} \tag{15.59}$$

assim, hFR fica:

$$hFR = \sqrt{\frac{1}{1 + THD_{iR}^2}} \tag{15.60}$$

sendo THDi o conteúdo total harmônico de corrente de referência. Estas fórmulas consideram apenas distorções na corrente.

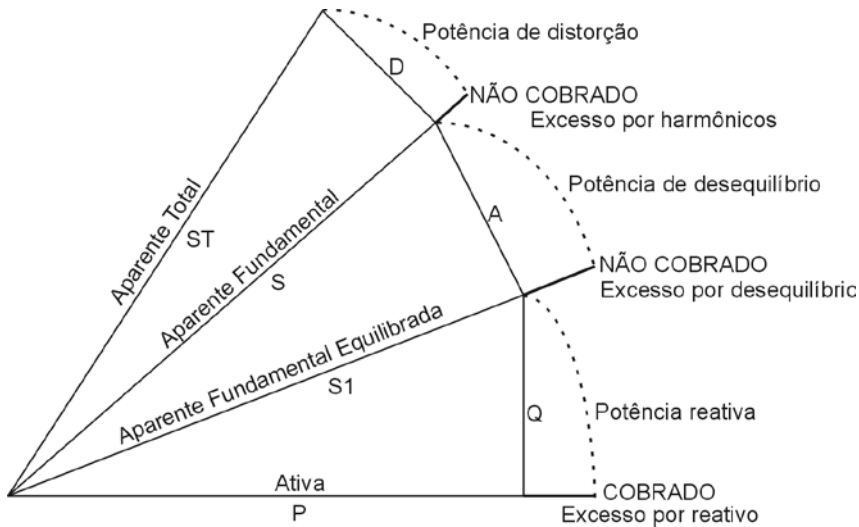


Figura 15.13 - Triângulo de Potências para Ambientes Distorcidos

Algumas concessionárias Norte-Americanas aceitam valores de $THD_iR = 20\%$ no máximo (R. R. Verderber - 1991). Implicando num $hFR = 0,98$.

15.2. OS PROGRAMAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E SEUS IMPACTOS SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

15.2.1. Crescimento do Consumo de Energia Elétrica no Brasil

Para se poder compreender melhor o problema da “poluição” da energia elétrica fez-se um comparativo com o crescimento do mercado, implicando em aumento de cargas não-lineares (geradoras de distúrbios) para o sistema.

Há uma expectativa de forte expansão do mercado de eletrodomésticos no Brasil [DKB, 1997]. Nos últimos anos a venda de eletrodomésticos tem crescido muito, redundando em forte expansão do consumo residencial e comercial, conforme Tabela 15.10.

Tabela 15.10 - Consumo por Classes (Energia Firme - GWh) e as Taxas de Crescimento deste consumo (96/97)

	1997	Variação (%) 1996/1997	Participação(%)
Residencial	74.104	7,3	27,0
Industrial	122.245	4,9	44,6
Comercial	38.191	9,8	13,9
Outras Classes	39.732	6,5	14,5
Total	274.272	6,5	100,0

Fonte: Boletim de Mercado e Carga Própria - Eletrobrás - 1997

Esta comparação se faz necessária pois implica numa necessidade ainda mais forte da questão da QEE. Como resultados principais do Boletim cita-se:

- No setor Comercial, a utilização de condicionadores de ar se mostra expressiva, devido às altas temperaturas ocorridas; ampliação de shopping centers, com a agregação de novas unidades; aumento do mercado de eventos e convenções; Administração Pública (aumento de lâmpadas fluorescentes e computadores), outros;
- No setor Industrial, um aumento se deu em atividade de Extração Mineral (implicando no aumento de motores e Controladores de Velocidade Variável para os mesmos), em Construção (também com aumento de motores), outros;
- No setor residencial, aumento de televisores, eletrodomésticos, condicionadores de ar devido à alta da temperatura (aumentando a distorção harmônica), entre outros.

Os eletrodomésticos, somados aos dispositivos industriais que empregam a eletrônica e outros equipamentos com características não-lineares, surgem como exemplo de cargas geradoras de harmônicos em instalações industriais, comerciais e residenciais. Neste último em particular, reconhece-se que as unidades são de pequenas potências, porém, constituem-se em milhares de fontes de correntes harmônicas. Estes fatos, juntamente com o exposto nos parágrafos anteriores, determinam que, num futuro próximo, haverá a necessidade do controle do grau de distorção harmônica (não se esquecendo das demais distorções) não apenas para o setor industrial, como também para as redes elétricas residenciais e comerciais.

15.2.2. O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica no Brasil - PROCEL

O PROCEL estabelece metas de redução de desperdícios que são consideradas no planejamento formal do setor elétrico. A meta global é obter uma economia progressiva de energia elétrica que deverá alcançar 130 milhões de MWh no ano de 2015.

Para atingir estas metas, o PROCEL tem centrado seu interesse nas seguintes áreas:

- elaboração de planos de ação para programas de combate ao desperdício;
- elaboração e implementação de planos de marketing;
- proposição de políticas e instrumentos legais/econômicos de incentivo;
- política de financiamento e de fortalecimento de empresas privadas de diagnóstico energético;
- adequação e aplicação de metodologias;
- desenvolvimento de sistemas de informação computadorizados;
- projetos de Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD);
- projetos de Planejamento Integrado de Recursos – PIR;
- montagem de projetos segundo modelos do BID/BIRD para pedidos de financiamento;
- programas de redução de perdas na oferta;
- atuação no uso final (residencial, industrial, comercial, rural e público).

Destas alternativas de economia de energia, a gerência pelo lado da demanda (GLD) e a atuação no uso final, incluem diversas medidas, tais como sistemas tarifários diferenciados, programas educativos, auditorias energéticas, ou opções tecnológicas. A Tabela 15.11 apresenta alguns exemplos de opções tecnológicas que podem e são utilizadas na gerência pelo lado da demanda pelo PROCEL.

Dentre as medidas tomadas através da gerência pelo lado da demanda e a atuação no uso final, merecem destaque o uso de alguns equipamentos / componentes, tais como:

- Lâmpadas Fluorescentes Compactas;
- Controle de Iluminação através de Dimmers;
- Controladores de Velocidade Variável para motores;
- Compensação de Potência Reativa através de bancos de capacitores;
- Controladores de Temperatura para Chuveiros.

Estas medidas resultam em efeitos negativos sobre o sistema elétrico (ver Tabela 15.12). Pode-se, portanto, vincular perda de qualidade da energia elétrica a algumas medidas de conservação de energia.

A Tabela 15.12 mostra que o principal distúrbio causado por estes equipamentos é a emissão harmônica, implicando numa redução do fator de potência, entre outros problemas.

A Tabela 15.13 e as Figuras 15.14 e 15.15 mostram o acréscimo de corrente devido às distorções harmônicas de corrente (THDi) causadas por cargas não-lineares, e a variação no fator de potência. Tomou-se como base uma corrente (fundamental) de 1 Ampère.

Tabela 15.11 - Algumas Alternativas Tecnológicas Utilizadas pelo Lado da Demanda. (FINEP, 1989)

Setor Residencial	Setor Comercial	Setor Industrial
• Eletrodomésticos de alta eficiência (incluindo ar condicionado e bombas de calor)	• Iluminação fluorescente de alta eficiência	• Controladores ajustáveis de frequência ou os Controladores de Velocidade Variável para motores
• Iluminação eficiente através de lâmpadas fluorescentes compactas	• Controle de Iluminação (dimmer)	• Compensação de Potência Reativa através de bancos de capacitores
• Isolação Térmica de aquecedores de água	• Sistema de controle de Demanda	• Motores de alta eficiência
• Torneiras e chuveiros de baixa vazão	• Isolação térmica de prédios	• Dimensionamento ótimo de motores
• Isolação térmica de prédios	• Filme solar para janelas	• Iluminação interior e exterior com lâmpadas de sódio a alta pressão
• Projeto de prédios energeticamente eficientes	• Ar condicionado e bombas de calor de alta eficiência	• Recuperação de calor de processo
• Filme solar para janelas	• Projetos de prédios energeticamente eficientes	• Cogeração Industrial
• Controladores Programáveis	• Estudos de Retrofitting em Iluminação	• Bombas de calor para processo
• Aquecimento Solar	• Etc.	• Equipamentos Eletrotérmicos
• Etc.		• Recondutoramento de instalações
		• Etc.

Tabela 15.12 - Benefícios e Efeitos da Conservação sobre a Qualidade da Energia Elétrica. (Abreu - 1997 - 2)

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA		QUALIDADE DA ENERGIA
Ação	Benefício	Efeitos
Instalação de Controladores de Velocidade Variável	Economia de Energia e possibilidade de gerência do controle dos fluxos	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de Harmônicos • Eliminação da “Depressão de Tensão” durante a partida de motores
Instalação de Lâmpadas Fluorescentes	Economia de Energia	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de Harmônicos; Susceptibilidade ao Flicker • Redução do Fator de Potência da Instalação
Instalação de Banco de Capacitores	Melhoria do Fator de Potência	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de Transitórios • Amplificação de Harmônicos
Controle da Iluminação através de Dimmers	Melhoria do fator de Carga	<ul style="list-style-type: none"> • Redução no Fator de potência • Geração de Harmônicos • Melhoria de tensão de regime permanente

Tabela 15.13 - Influência dos Harmônicos no Acréscimo de Corrente e na Redução do Fator de Potência

Distorção na Corrente THDi - %	Acréscimo de corrente - %	Fator de Potência total
0	0,00	1
5	0,125	0,999
10	0,50	0,995
30	4,40	0,958
50	11,80	0,894
70	22,07	0,819
90	34,54	0,743
100	41,42	0,707
120	56,20	0,640
130	64,01	0,610
150	80,28	0,555
170	97,23	0,507
200	123,61	0,447

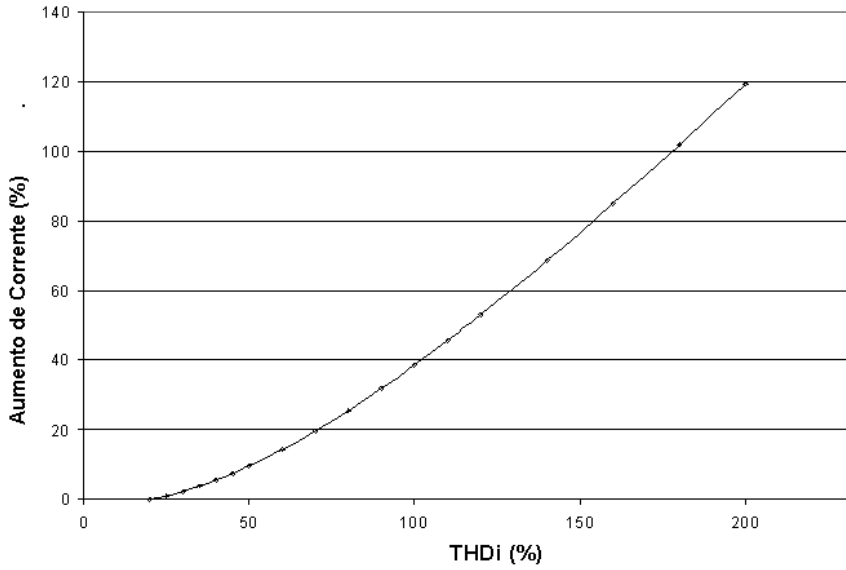


Figura 15.14 – Acréscimo de corrente devido à distorção harmônica

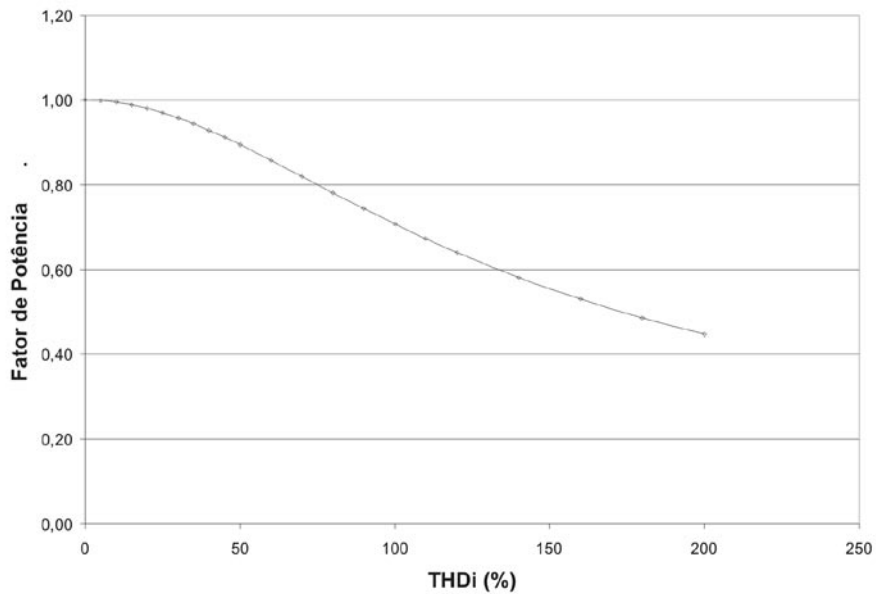


Figura 15.15 – Redução no fator de potência total devido à distorção harmônica de corrente

15.2.3. O Problema da Localização da Medição do Nível Harmônico

Esta discussão sobre a localização da medição dos níveis harmônicos torna-se relevante no momento em que a grande maioria das cargas não-lineares adotadas pelas medidas de conservação de energia interferem localmente no sistema elétrico, causando desperdícios (que podem ser minimizados) e muitas vezes despercebidos quando da realização de uma medição global (na entrada do consumidor, por exemplo).

Muitas vezes os problemas resultantes das medidas de conservação ocorrem em partes isoladas do sistema elétrico, assim como acontece com o fator de potência. Ou seja, quando se corrige o fator de potência de um motor, através de um banco de capacitores, ocorrem perdas nos cabos (devido à potência reativa que circula pelo mesmo) e conseqüentemente uma maior ocupação do sistema neste trecho Banco-Motor. Isto está representado na Figura 15.16

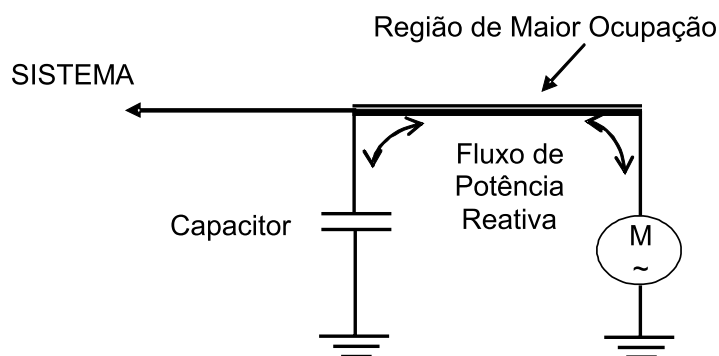


Figura 15.16 – Ocupação de parte do sistema elétrico devido à correção do fator de potência

O mesmo efeito pode ocorrer em um sistema que contenha cargas não lineares. Podem ocorrer casos onde os harmônicos se dispersem entre as cargas lineares do sistema, não chegando ao circuito de entrada do mesmo. Isto faz com que ocorram os efeitos, devidos aos harmônicos, somente nos trechos onde estes circulem, sem atingir portanto o circuito principal. Assim, as perdas e a maior ocupação do sistema se dará nos ramais Carga Não Linear – Cargas Lineares ou Carga Não Linear-Carga Não Linear do circuito. Pode ocorrer também cancelamento de harmônicos entre cargas não lineares, devido aos seus ângulos de fase.

Tendo em vista estes cancelamentos e dispersões, não se torna consistente realizar uma medição harmônica somente na entrada principal de um sistema elétrico. Deve-se realizá-la em circuitos específicos das cargas geradoras de harmônicos ou em circuitos menores que as contenham. O ponto de medição que deve ser observado é aquele no qual a distorção harmônica pode ocasionar problemas, como os citados no capítulo anterior.

A Figura 15.17 exemplifica a ocupação de parte do sistema, devido aos harmônicos. É suposto neste exemplo que existe um cancelamento dos harmônicos entre as cargas não lineares, resultando numa ausência de harmônicos em direção ao sistema.

Mas é sabido que nem sempre se torna possível o cancelamento ou a eliminação total dos harmônicos em um sistema. Com isto, as perdas e a ocupação no sistema estarão presentes e maiores serão quanto maior for o nível harmônico associado. Para exemplificar a necessidade da medição nos vários pontos de um sistema, contrapondo-se a uma única medição na entrada do mesmo, a Figura 15.18 mostra o sistema elétrico de um estabelecimento comercial [Lai, 1997], que possui cargas elétricas lineares e não-lineares, onde cada transformador está com 50% de sua capacidade.

Para se dar continuidade à relação entre conservação e qualidade, torna-se muito importante observar a posição na qual será medida a distorção harmônica do sistema.

Cabe observar no sistema da Figura 15.18 que, caso a medição para a verificação dos níveis de distorção fossem feitos na entrada do mesmo, ter-se-ia uma distorção harmônica total de tensão $THD_v = 2,8\%$ e uma de corrente $THD_i = 16\%$, não proporcionando maiores problemas por estar dentro da norma IEEE519 ($< 3\%$ de THD_v , por consumidor, com tensão abaixo de 69kV).

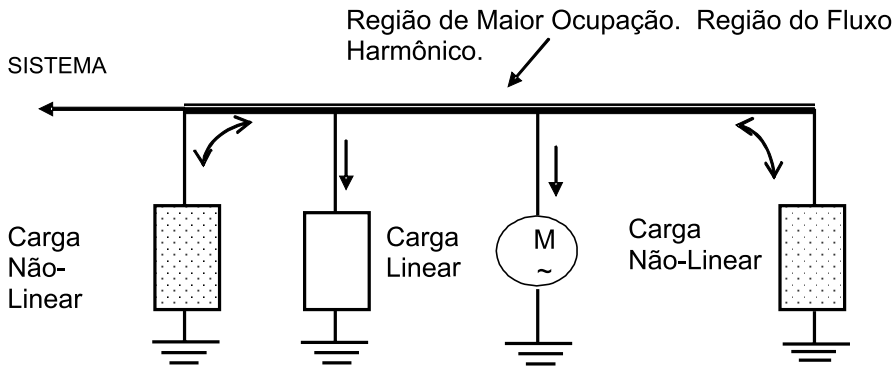


Figura 15.17 – Ocupação de parte do sistema elétrico devido aos harmônicos

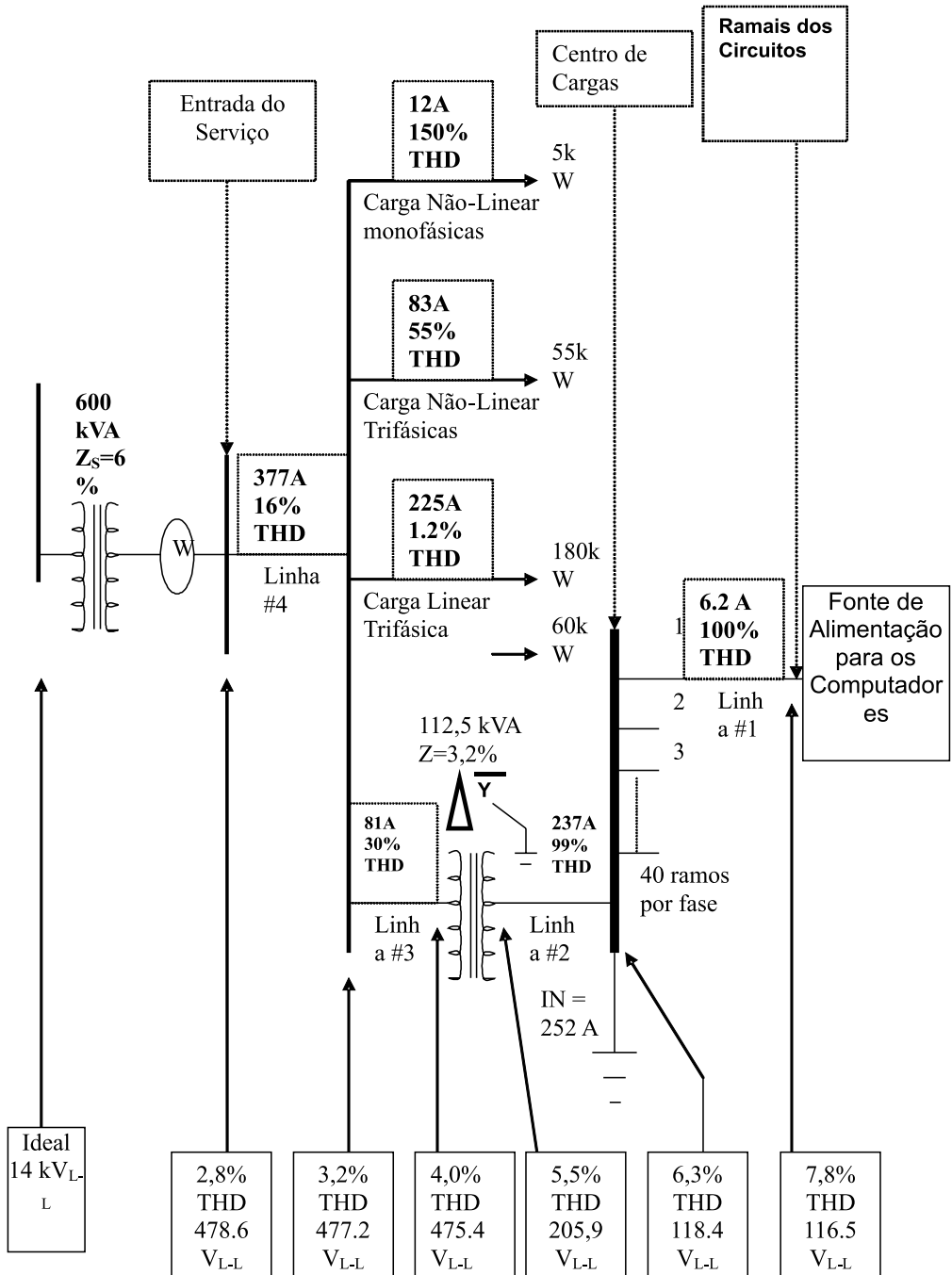


Figura 15.18 – Ocupação de parte do sistema elétrico devido aos harmônicos

Mas, se for observado, nos circuitos internos ao sistema elétrico do estabelecimento comercial existem distorções de tensão e de corrente que ocasionam perdas nos condutores, que não são levadas em consideração caso seja feita uma medição na entrada do sistema. Estas perdas nos condutores podem ser determinadas pela equação $R.I^2$, sendo que a corrente I é o valor rms da corrente total. Deste modo, inclui as respectivas correntes harmônicas.

Entretanto, torna-se interessante observar que existe uma diferença fundamental entre as normas IEEE519 e a IEC 1000-3-2, com relação às suas aplicações. A IEEE519 estabelece níveis de distorção no ponto de acoplamento comum entre o consumidor e a concessionária. Já a IEC1000-3-2 é aplicada nos terminais dos equipamentos. Deste modo, a primeira não proporciona redução das perdas nos condutores internos do sistema. Já a segunda norma tende a reduzir as perdas, referentes aos harmônicos, ocasionadas nos condutores do sistema.

Assim, pode-se concluir que mesmo apresentando níveis aceitáveis de distorção harmônica na entrada do sistema elétrico de um consumidor, este pode estar desperdiçando energia caso possua cargas geradoras de harmônicos através de perdas nos condutores internos ao sistema. Isto sem levar em consideração as demais perdas e problemas citados no capítulo anterior.

15.3. EXEMPLOS DE MEDIDAS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS CAUSADAS POR ALGUMAS MEDIDAS DE CONSERVAÇÃO

15.3.1. Iluminação

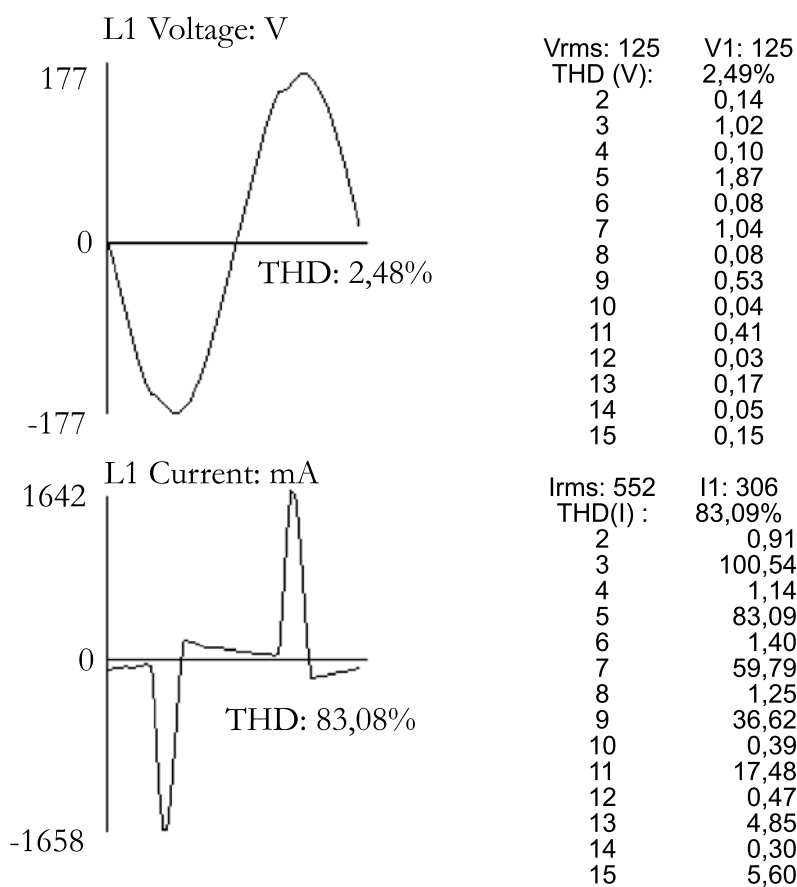
Como já citado anteriormente, algumas lâmpadas utilizadas como medidas de conservação em sistemas de iluminação apresentam um alto valor de distorção harmônica de corrente. Em sistemas de iluminação específicos, como por exemplo, iluminação de túneis ou rodovias, que se utilizam de lâmpadas de vapor de sódio e/ou de mercúrio, a probabilidade de se ter um efeito nocivo ao sistema é muito maior, tendo em vista que quando cargas lineares e não lineares estão presentes em um sistema, a tendência da distorção é diminuir. Mas, podem ocorrer casos onde o inverso seja mais pronunciado. Isto se dá devido ao defasamento angular entre os harmônicos.

Outra medida bastante adotada é a substituição de lâmpadas incandescentes pelas compactas fluorescentes em residências. Um exemplo de medição do sinal de tensão e corrente, bem como da distorção harmônica neste lâmpada é mostrado a seguir. Para os resultados que seguem, os valores de THD tanto de tensão quanto para corrente foram calculados conforme a norma IEC – 1000.

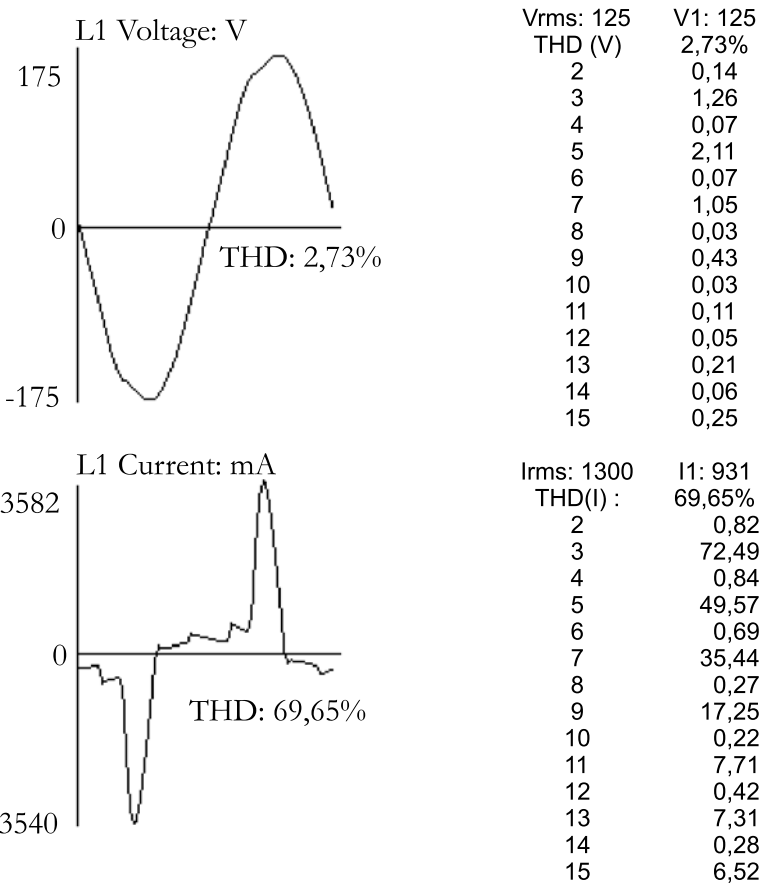
Tabela 15.14 - Medições realizadas em lâmpadas fluorescentes compactas

1ª Medição	
Modelo	Circular com reator eletrônico
Potência	22 W \equiv 60W incandescente
2ª Medição	
Modelo	Três lâmpadas da medição 1 em paralelo

Resultados da 1ª Medição



Resultados da 2ª Medição



15.3.2. Utilização de um Variador de Potência para Controlar a Temperatura da Água de um Chuveiro Elétrico

O uso final de eletricidade no setor residencial devido ao aquecimento de água está em torno de 26%. De todos os usos, este é o que mais contribui para a ponta de carga residencial diária.

A conservação de energia no uso do chuveiro pode ser feita por um variador de potência, através de um sistema de disparo que controla o valor eficaz da tensão aplicada à sua resistência de dissipação, utilizando-se de conversores CA/CA. Desta forma aumenta-se a faixa de temperatura para o banho (além das duas atuais Verão e Inverno), possibilitando ainda um aumento do conforto para o usuário e também um consumo mais eficiente de energia, tendo em vista as variações de temperatura das mais diversas regiões do país. Assim, seriam necessários 2,8kW no Norte-Nordeste, 3,6kW no Centro-Oeste, 3,9kW no Sudeste e 4,9kW no Sul [Jardini, 1996]. Dessa

forma, o usuário poderia escolher o nível de potência em função da vazão e da temperatura da água fria. Um estudo estima que, com essa medida, a demanda total do país poderia ser reduzida em até 20% [Geller et. Alli, 1996].

Outras vantagens do controlador seriam a economia de água, acréscimo na vida útil do chuveiro e eliminação de riscos de choques elétricos.

Assim, este estudo prático considera um chuveiro elétrico, disponível no comércio, munido de controle de temperatura através da variação do valor eficaz da tensão pela variação do ângulo de disparo de um TRIAC – “TRIode AC switch”.

Os lados do circuito em análise (lados A e B) representam as medições das grandezas elétricas, feitas pelo analisador de redes da marca Circutor, conforme demonstra a Figura 15.19.

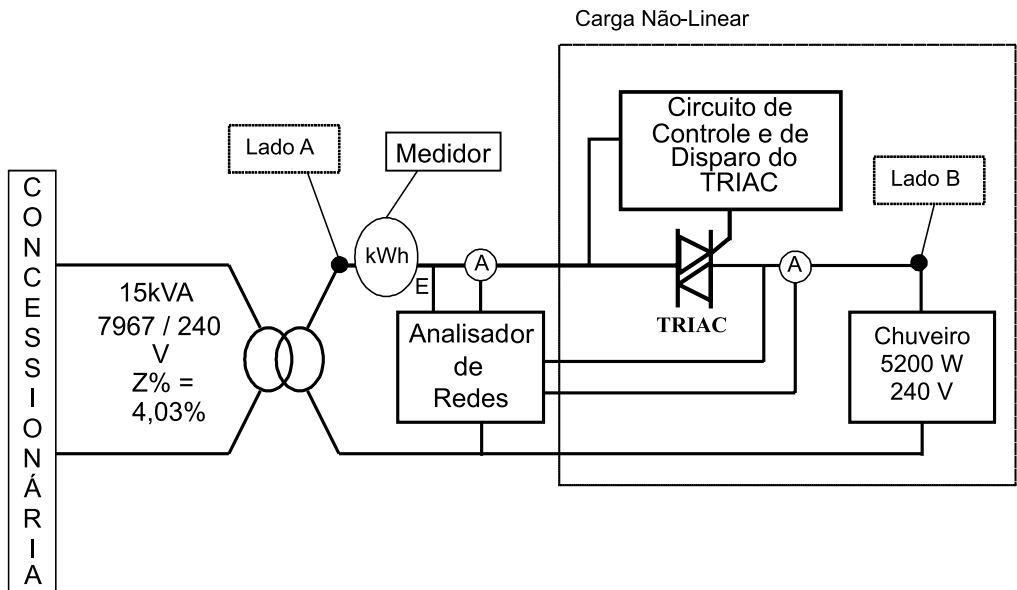


Figura 15.19 - Circuito de Teste para Verificação da Relação Conservação / Qualidade

Para o teste, foram consideradas as potências na carga resistiva de 2,6kW, 2,8kW, 3,6kW, 3,9kW, 4,4kW e 4,9 kW. Nestas condições, foram levantadas as grandezas elétricas e dados adicionais, indicados na Tabela 15.15. Algumas formas de onda de tensão (do lado B) e corrente (lados A e B) na carga nas respectivas potências consideradas, podem ser vistas a seguir.

Tabela 15.15 – Alguns pontos representativos da medição realizada

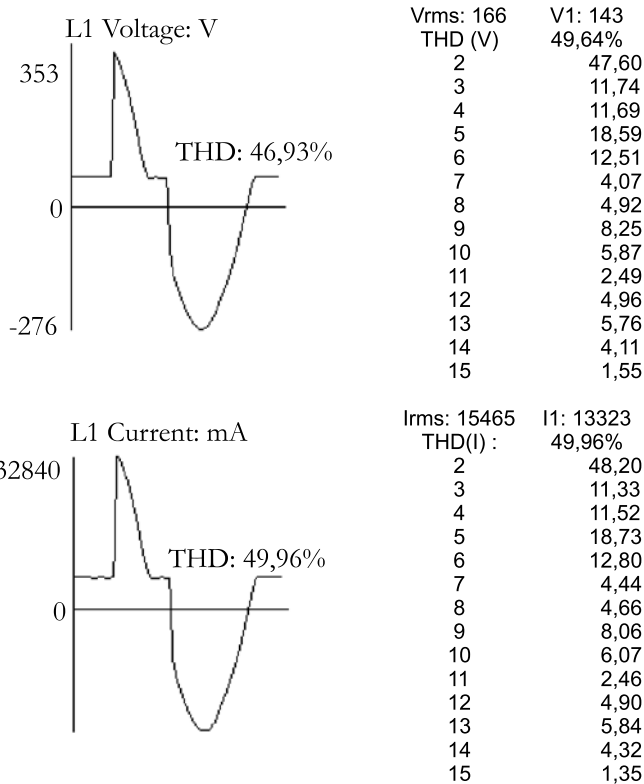
Potência (W) Lado B	I_1 (A)	I_{rms} (A)	E_1 (V) Lado B	E_{rms} (V) Lado B	S_T (VA) Lado A	THD _i (%) IEEE	I_H (% de I_1) = $\sum I_h^2$
2623,00	13,323	15,615	143	168	3731,99	58,55	58,55
2892,00	14,32	16,47	151	175	3935,85	57,29	57,29
3565,00	16,93	18,26	181	195	4364,16	44,65	44,65
3901,00	17,24	19,03	185	204	4547,69	44,40	44,40
4389,00	19,14	20,24	205	217	4812,74	33,28	33,28
4877,00	20,64	21,16	222	229	5057,48	23,93	23,93

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES PARA O ESTUDO PRÁTICO

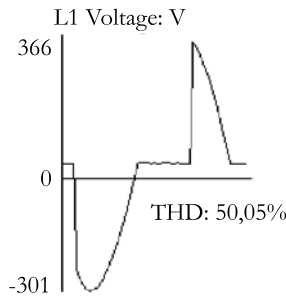
(Os valores de potência referem-se às potências na carga resistiva)

As formas de onda e o espectro harmônico se referem ao Ponto B. Cabe observar que a corrente é a mesma para os pontos A e B.

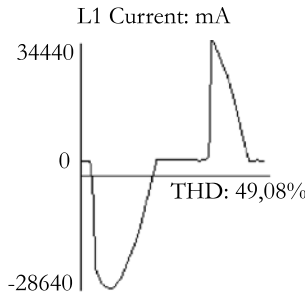
POTÊNCIA: 2623 [W]



POTÊNCIA: 2892 [W]

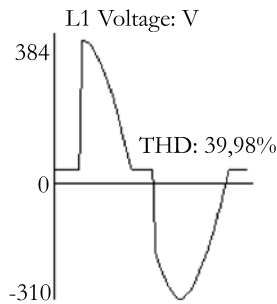


Vrms: 176	V1: 151
THD (V)	
2	33,88
3	30,20
4	25,29
5	8,92
6	11,94
7	10,70
8	1,34
9	10,63
10	6,65
11	3,68
12	7,91
13	3,01
14	5,35
15	5,81

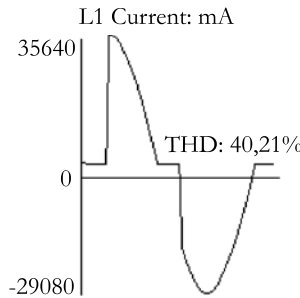


Irms: 16600	I1: 14316
THD(I) :	
2	34,54
3	29,40
4	25,16
5	9,50
6	11,23
7	10,79
8	1,07
9	10,07
10	6,94
11	2,82
12	7,35
13	3,61
14	4,50
15	5,40

POTÊNCIA: 3901 [W]

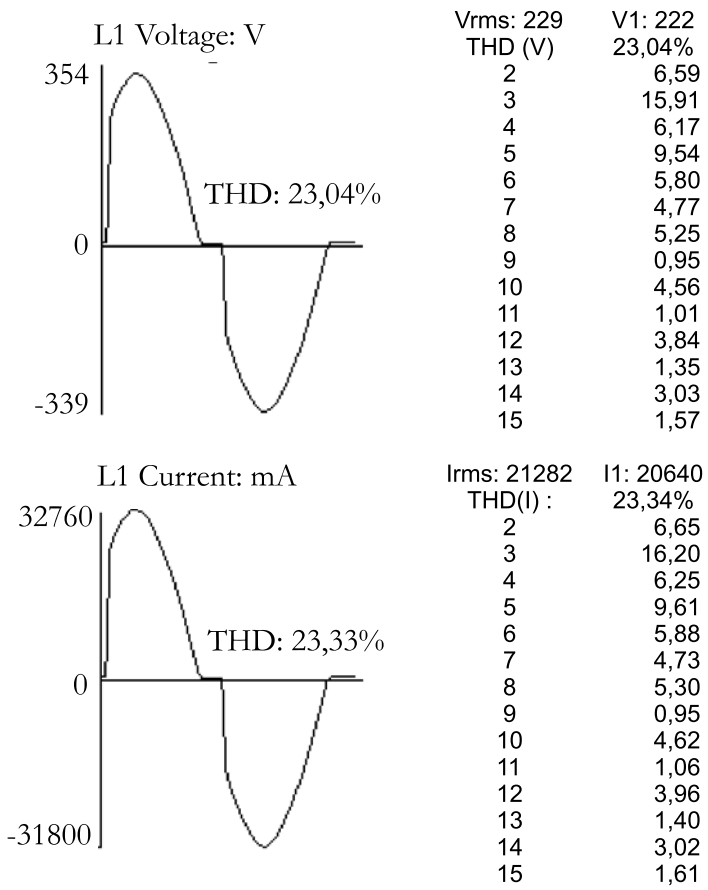


Vrms: 203	V1: 185
THD (V)	
2	39,98%
3	25,10
4	23,53
5	18,57
6	1,49
7	9,15
8	11,20
9	2,36
10	6,66
11	4,84
12	3,36
13	6,11
14	1,83
15	3,89
	4,88



Irms: 18922	I1: 17238
THD(I) :	
2	40,21%
3	25,31
4	23,68
5	18,70
6	1,64
7	9,13
8	11,33
9	2,27
10	6,69
11	4,82
12	3,36
13	6,07
14	1,87
15	3,84
	4,96

POTÊNCIA: 4877 [W]



15.3.3. Utilização de Controladores de Velocidade Variável (ASD – Adjustable Speed Drive)

Trabalhos recentes (Strang, 1996) mostram que os controladores estão relacionados a três características da qualidade da energia: Os transitórios devido ao chaveamento dos bancos de capacitores; as depressões de tensão e os harmônicos. Naquele trabalho, treze controladores de marcas variadas, sendo sete deles de 20HP e o restante de 3HP, foram submetidos a três testes:

- O primeiro teste para verificar a operação do ASD sob condições de transitório ocasionado pelo chaveamento do banco de capacitor;
- Como resultado deste teste, todos os ASD's se mostraram imunes a tal distúrbio.
- O segundo teste objetivou determinar a influência (e conseqüentemente a susceptibilidade dos ASD's) durante as Depressões de Tensão;

Neste teste foram adotados os valores da Tabela 15.16, para a depressão de tensão.

Com isto, foram avaliados 13 ASD's nomeados de G, H, I, J, K, L e M, para os de 20HP e de h, i, j, k, l e m para os de 3HP. A avaliação feita constou das categorias apresentadas na Tabela 15.17.

Tabela 15.16 - Duração e Intensidade das Depressões de Tensão

Tipo de Depressão	Tensão (% da Nominal)	Duração da Depressão
1	100%	1/30 s
2	50%	1/10 s
3	30%	1.0 s

Tabela 15.17 - Categorização do Desempenho dos ASD's durante as Depressões de Tensão

A	A velocidade do motor decresceu momentaneamente.
B	A velocidade do motor decresceu até zero ou inverteu de rotação, mas o sistema se recuperou e retornou à sua operação.
C	A velocidade do motor tornou-se negativa e o ASD ficou inabilitado a restabelecer a operação. Depois da carga ser removida, o motor voltou a acelerar até a sua velocidade original.
D	A energia para o motor foi interrompida, e o ASD não recuperou a sua operação após a carga ter sido removida.

Obteve-se como resultado dos testes o apresentado na Tabela 15.18 para os ASD's de 20HP e na Tabela 15.19 para os ASD's de 3HP. Nestas tabelas, variou-se o torque da carga em três faixas, 0% (sem carga), 50% (a meia carga) e 100% (a plena carga). As letras A, B, C e D, referem-se à categorização da tabela anterior.

Tabela 15.18 - Desempenho dos ASD's de 20HP, durante as Depressões de Tensão

Tipo da Depressão	Torque da Carga (%)	G	H	I	J	L	M
1	0	A	A	A	A	A	A
1	50	A	A	A	A	A	A
1	100	A	C	A	C	A	A
2	0	A	A	A	A	D	A
2	50	A	C	A	C	D	C
2	100	B	C	A	C	D	C
3	0	A	C	A	A	D	A
3	50	C	C	C	A	D	C
3	100	C	C	C	C	D	C

- O terceiro e último teste objetivou determinar o nível harmônico gerado por estes equipamentos assim como as suas eficiências.

Os resultados estão mostrados nas Tabelas 15.20 e 15.21.

Tabela 15.19 - Desempenho dos ASD's de 3HP, durante as Depressões de Tensão

Tipo da Depressão	Torque da Carga	h	i	j	k	l
1	0 %	A	A	A	A	A
1	50 %	A	A	A	A	A
1	100 %	A	A	B	A	A
2	0 %	A	A	A	A	A
2	50 %	A	A	A	A	A
2	100 %	A	A	A	B	A
3	0 %	A	A	A	B	A
3	50 %	A	A	C	B	A
3	100 %	B	A	C	B	A

Tabela 15.20 - Distorção Harmônica Total de Corrente de Linha dos ASD's de 20HP, THDi em %

Frequência (Hz)	Torque(%)	G	H	I	J	K	L	M
60	25	95	143	153	86	83	<1	19
60	50	79	125	127	60	73	<1	14
60	75	65	123	119	45	60	<1	12
60	100	54	112	110	39	49	<1	11
45	25	110	144	151	92	88	<1	15
45	50	85	130	137	73	77	<1	13
45	75	76	121	135	53	69	<1	11
45	100	65	115	116	48	57	<1	11
30	25	108	155	152	98	98	<1	14
30	50	93	143	148	82	85	<1	11
30	75	86	135	133	72	78	<1	10
30	100	80	127	130	59	71	<1	11

Pode-se, portanto, relacionar perda de qualidade da energia devido à utilização destes equipamentos amplamente usados em medidas de conservação de energia.

Cada controlador pode ter um nível diferente de distorção harmônica. Mas todos eles (por trabalharem com a eletrônica) distorcem a forma de onda de corrente, implicando em emissões de correntes harmônicas.

Tabela 15.21 - Distorção Harmônica Total de Corrente de Linha dos ASD's de 3HP, THDi em %

Frequência (Hz)	Torque(%)	h	i	j	k	l	m
60	25	200	106	169	178	88	89
60	50	179	80	163	173	63	84
60	75	171	74	130	164	52	76
60	100	169	58	155	159	43	72
45	25	190	90	181	198	86	105
45	50	190	90	163	181	74	93
45	75	174	78	163	171	62	85
45	100	173	74	159	166	52	79
30	25	197	108	176	180	99	108
30	50	176	94	169	178	83	93
30	75	176	91	165	178	76	88
30	100	179	83	161	172	63	84

15.4. QUANTIFICAÇÃO E CONTABILIZAÇÃO DAS PERDAS DEVIDO AOS HARMÔNICOS

Suponha um consumidor que se beneficia de algumas medidas de conservação de energia. E que estas medidas não implicam em um aumento no custo de fornecimento, por não distorcer a onda de corrente no ponto de medição da concessionária. Mas, ocasiona uma ocupação interna do seu sistema elétrico, implicando em perda de ampacidade de condutores e capacidade de transformadores. E também fazendo com que as perdas em condutores e transformadores aumentem.

Este procedimento de se verificar a relação de compromisso entre as medidas de conservação de energia e a qualidade da energia elétrica está relacionado com a nova definição de potência, apresentada anteriormente. Com ela, pode-se verificar o quanto um sistema elétrico está sendo ocupado devido às distorções harmônicas, à assimetria, e também ao fator de deslocamento (dFP), relativo à utilização de potência reativa.

Uma maior ocupação do sistema elétrico por parte de potências distorcivas, ditas não ativas, como as devidas aos harmônicos e à assimetria, leva a condições desfavoráveis para o mesmo, pois um sistema que se apresente desta forma terá menores condições de transporte de energia ativa (a que realmente realiza trabalho). Assim, este sistema elétrico terá que ser substituído ou incorporar novos equipamentos para suprir a necessidade de novas cargas (algumas vezes) muito antes de atingir a sua capacidade nominal.

A maneira de se quantificar a ocupação de um sistema elétrico pode ser feita através do cálculo ou medição da potência aparente total, comparando esta potência com a aparente (fundamental – S_1) sem distorções harmônicas.

A Figura 15.20 mostra um exemplo de um sistema com cargas não-lineares alimentadas por uma fonte perfeitamente senoidal através de um transformador T. Logo, a potência que a carga exige pode ser dada pela equação (15.43). Esta carga está ocupando do sistema elétrico uma potência aparente total S_T .

Para a execução do seu trabalho, a carga necessita mais do que simplesmente das potências ativa e reativa. Necessita também de outras potências ditas não-ativas, em específico a potência distorciva devido aos harmônicos, chamada de “H”.

Cada carga apresenta as características mostradas nas Figura 15.21 (a) e (b) e na Tabela 15.22 (Guimarães, 1996).

Foi escolhido este tipo de carga pelo fato de que suas formas de onda (tanto de corrente quanto de tensão) apresentam-se semelhantes a várias cargas não-lineares usualmente encontradas em medidas de conservação, tais como: lâmpadas flu-

orescentes compactas, lâmpadas de vapor de sódio, ASD's e também em uma grande parte de equipamentos que se utilizam de um sistema de retificação de tensão com um capacitor de alisamento de tensão.

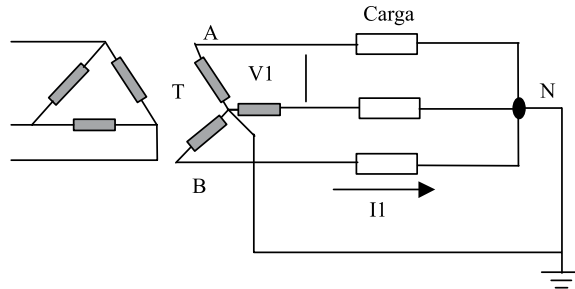


Figura 15.20 – Exemplo de Circuito com Cargas Não-Lineares

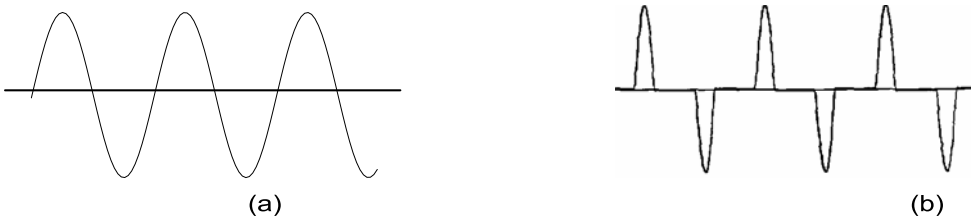


Figura 15.21 – Formas de Onda da Tensão (a) e da Corrente na Carga (b)

Tabela 15.22 – Características das Correntes Harmônicas

Característica dos Harmônicos de Corrente da Carga														
Ordem	I_1	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	I_{15}	I_{17}	I_{19}	I_{21}	I_{23}	I_{25}	I_{27}
% de I_1	100	81	52	23	3	8	7	2	3	4	2	1	2	1
Fase (°)	-2	-11	-19	-31	-91	+155	+138	+102	-29	+50	-70	+138	+115	+100

Desta forma, realizaram-se os cálculos necessários para a determinação da ocupação do sistema devido a esta carga.

$$I_{T(pu)} = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} = \sqrt{1 + 0,9955} = 1,4126(pu) \tag{15.61}$$

$$IT(A) = 1,4126 \times 24,96 = 35,259 (A) \tag{15.62}$$

$$P_1 = \sqrt{3}V_1I_1 \cos(\varphi_1) = \sqrt{3} \cdot 112 \cdot 24,96 \cdot \cos(-2) = 4.839,03 [W] \tag{15.63}$$

$$Q_1 = \sqrt{3}V_1I_1 \sin(\varphi_1) = \sqrt{3} \cdot 112 \cdot 24,96 \cdot \sin(-2) = -168,98 [\text{VAR}] \quad (15.64)$$

$$S_1 = \sqrt{P_1 + Q_1} = \sqrt{3} \cdot V_1I_1 = \sqrt{3} \cdot 112 \cdot 24,96 = 4.841,98 [\text{VA}] \quad (15.65)$$

$$S_T = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_T = \sqrt{3} \cdot 112 \cdot 35,259 = 6.839,88 [\text{VA}] \quad (15.66)$$

Para a determinação da potência distorciva, faz-se:

$$S_T = \sqrt{S_1^2 + H^2} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + H^2} \Rightarrow \quad (15.67)$$

$$H = \sqrt{S_T^2 - S_1^2} = \sqrt{6839,88^2 - 4841,98^2} = 483106 [\text{VA}_{\text{Harm}}]^*$$

* *Nomenclatura ainda não definida pelos especialistas.*

Tendo-se o seguinte valor para a corrente de neutro.

$$I_N (\text{pu}) = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2 + I_{27}^2} = 3 \cdot \sqrt{0,6579} = 2,43 (\text{pu}) \quad (15.68)$$

$$I_N (\text{A}) = 2,43 \cdot 24,96 = 60,65 (\text{A})$$

Não foi levada em consideração a assimetria neste exemplo, por não existir.

15.4.1. Custo de Ocupação devido às perdas (COPE)

Esta consideração está relacionada com as perdas nos condutores e nos transformadores. Estas perdas consideram somente as distorções harmônicas e, portanto, serão chamadas de perdas harmônicas.

As perdas harmônicas nos condutores ou cabos (PHC) (Key, 1996)

São calculadas pela equação (15.36). Com ela, pode-se determinar o custo relativo às perdas por efeito Joule, devido aos harmônicos, nos condutores.

Para o cálculo das perdas deve-se considerar o comprimento do cabo e a sua resistência total RCA.

$$P_{\text{HC}} = \sum_{h=2}^{\text{hmax}} I_h^2 \cdot R_h \quad (15.69)$$

Com estes dados e com o tempo de utilização do sistema, pode-se calcular o custo da perda harmônica nos condutores, dado também o preço do kWh da energia.

$$\text{COPeC} = P_{\text{HC}} \times (\text{tempo de utilização do sistema}) \times \$\text{kWh} \quad (15.70)$$

A perda no condutor de neutro deve ser também levada em consideração. Para tanto, a equação que se segue relaciona esta perda com as correntes harmônicas:

$$P_{\text{HN}} = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2 + I_{27}^2 + \dots} \cdot R_{\text{N}} \quad (15.71)$$

onde

P_{HN} - perda harmônica trifásica para o condutor neutro;

I_3, I_9, I_{15}, \dots - representam as harmônicas múltiplas de 3 e homopolares;

R_{N} - Resistência total de neutro = $\text{RCAN} = \text{RCCN} +$ (acréscimo devido aos efeitos).

As perdas harmônicas nos transformadores (PHT)

Os transformadores apresentam perdas em vazio e em carga. As perdas aqui consideradas são devidas somente aos harmônicos. Para o cálculo desta perda, utiliza-se a equação (15.38 a 15.41).

Com a perda PHT calculada, contabiliza-se o custo da energia correspondente a esta perda no período de operação do transformador e sob estas condições.

$$\text{Custo da Perda no Transformador} = \text{PHT} \times T \times (\$ \text{kWh}) \quad (15.72)$$

sendo T o tempo de operação nestas condições em horas.

Desta forma, a ocupação do sistema do consumidor é refletida através das perdas nos transformadores e condutores e na necessidade de sobredimensionamento ou perda de capacidade e ampacidade respectivamente. No entanto, outras perdas podem surgir devido às condições distorcivas. Perdas em outros equipamentos, que podem ser afetados por harmônicos, como: aquecimento de motores, ressonância com banco de capacitores (usados para correção do fator de potência), atuação indevida de relés, entre outros já mencionados em capítulo anterior. Estes equipamentos podem sofrer aumento de perdas, redução de suas vidas úteis, potencial de ressonância, piora de desempenho, entre outros não contabilizados aqui.

Uma outra observação a ser feita com relação à medição do nível harmônico, é a necessidade de tratamento estatístico para se obter um valor de THDi que represente a condição média desta distorção ao longo do período de utilização do sistema. Com isto, não se incorre num erro comum de assumir uma única medida como sendo o valor presente em todas as condições de operação do sistema. Os harmônicos estão presentes nos sistemas que contenham cargas não-lineares e dependem

do número de cargas ligadas ao mesmo tempo, da intensidade de corrente destas cargas, e de outros fatores já comentados anteriormente. Para maiores informações sobre tratamento estatístico dos harmônicos ver Oliveira (1997).

15.4.2. Quantificação dos Custos de Algumas Medidas de Mitigação/Eliminação dos Distúrbios Causados por Medidas de Conservação

Quando estiver havendo algum problema no sistema elétrico de um consumidor, como: ressonância com banco de capacitores, ocasionando queima prematura dos mesmos; desligamento de processos industriais, resultando em danos e prejuízo; interferência eletromagnética em sistemas de comunicação; queima de transformadores ou condutores; entre outros, torna-se necessária a mitigação/eliminação dos distúrbios causadores destes problemas, em específico para o exemplo anterior, a eliminação dos harmônicos existentes no sistema do consumidor. Para tanto, introduz-se o terceiro procedimento de se verificar a relação de compromisso entre a qualidade e a conservação.

Soluções de mitigação/eliminação dos distúrbios podem ser adotadas. Torna-se importante comentar que estas medidas aplicam-se conforme a necessidade e característica de cada sistema e/ou tipo de distúrbio gerado. Um filtro harmônico deve ser usado quando o sistema estiver com problemas relacionados com a distorção harmônica. Já um condicionador de potência seria usado para casos onde a depressão de tensão esteja ocasionando danos ao sistema e/ou processo.

Para a implementação deste procedimento, vale ressaltar que a posição escolhida para a colocação dos filtros harmônicos é de fundamental importância, (assim como são para os bancos de capacitores para correção do fator de potência), pois reflete diretamente sobre o custo/benefício da medida.

A título de exemplo, um trabalho apresentado por Thomas Key (Key, 1996), mostrou que o potencial de economia de energia variou de US\$10 a US\$2101 devido à localização da medida de mitigação dos harmônicos existentes no sistema por ele analisado. A Figura 15.22 mostra o sistema estudado e a Tabela 15.23 resume estas economias para diferentes localizações dos filtros.

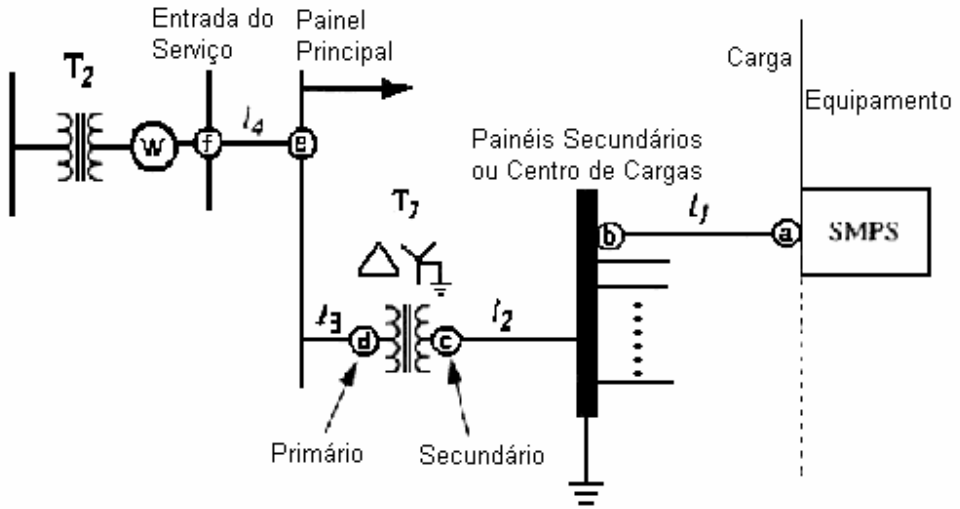


Figura 15.22 - Possíveis localizações para mitigação harmônica

Tabela 15.23 - Potencial de energia economizada para diferentes localizações de colocação dos filtros

Localização do Filtro	Ponto "d" Primário de T1	Ponto "c" Secundário de T1	Ponto "b" No centro de cargas	Ponto "a" Na carga
Perdas totais sem compensação (W)	8148	8148	8148	8148
Perdas totais com compensação (W)	8125	5378	4666	3346
Economia em L1 (W)	0	0	0	1320
Economia em L2 (W)	0	0	712	712
Economia em T1 (W)	0	2747	2747	2747
Economia em L3 (W)	23	23	23	23
Economia Total (W)	23	2770	3482	4802
Custo economizado por ano (\$/ano)	10	1213	1523	2101

Fonte: Key, 1996

Verificou-se que, caso houvesse necessidade e/ou desejo de eliminação da distorção harmônica, a melhor opção de mitigação através de filtros seria colocá-los próximo à carga (ponto a). Uma outra vantagem desta localização está na não ocupação do restante do sistema elétrico, diferentemente de uma localização geral, por exemplo, próximo ao transformador (pontos c ou d).

Neste ponto, a norma européia (IEC-1000) leva uma grande vantagem sobre a norma americana IEEE-519, tendo em vista que a primeira estabelece que as mitigações sejam feitas nos terminais dos equipamentos e não no Ponto de Acoplamento Comum como o caso da segunda.

No trabalho realizado por Key, foi verificado um custo adicional (devido à introdução dos filtros harmônicos) estimado em US\$6 por cada 250W de potência de carga. Este custo se baseou em investigações feitas por J. Lai e pelo próprio Key (Lai, 1991) e também através de fabricantes localizados em Taiwan, para o filtro utilizado.

Mas, para qualquer sistema, o filtro deve ser projetado de acordo com as características de distorção do mesmo, não se podendo generalizar o custo de um filtro para todas as condições, mas sim, determinar o custo de cada um deles, incorporando-os nas análises de viabilidade das medidas de conservação e verificando-se a relação de compromisso entre a qualidade e a conservação.

Desta forma, consegue-se verificar a redução nas perdas harmônicas com a introdução dos filtros e conseqüentemente realizar uma análise real da redução de energia proveniente de uma medida de conservação causadora de distúrbios elétricos que possua uma medida de mitigação. Este procedimento de mitigação é o que apresenta maiores benefícios para o consumidor e também para o concessionário. Isto porque, com a mitigação do distúrbio, as perdas nos condutores e transformadores diminuirão, fazendo com que o segundo procedimento seja incorporado pelo terceiro, assim como também não existirão (ou ficarão dentro de limites estabelecidos por norma) os custos devidos aos excedentes distorcivos, comentados no primeiro procedimento.

Cabe portanto, realizar uma verificação dos possíveis problemas que poderão vir a existir quando da incorporação de medidas de conservação, através de medições e simulações em computador, antes que estas medidas de conservação sejam implementadas.

Ao final de cada procedimento deve-se realizar uma Análise Financeira, levando-se em conta a vida útil do equipamento e os custos associados sem e com a introdução do distúrbio. Esta análise financeira será exemplificada no estudo prático.

Um exemplo desta metodologia de simulação (Padaca, 1998) foi a verifica-

ção da possibilidade de ressonância harmônica em uma empresa de processamento de produtos florestais, quando ela se propôs a colocar controladores de velocidade variável (ASD's) para realizar o controle de motores de ventiladores de 100HP, em seus silos de secagem. A identificação do problema de ressonância com o banco de capacitores (usados para a correção do fator de potência) foi feita através de simulação via computador (HarmFlo, EMTP), e a solução encontrada foi a retirada do banco e a colocação de um filtro de 5º harmônico. Deste modo, a empresa obteve resultados satisfatórios com o ASD, expandindo a utilização de mais 16 ASD's em toda a empresa, de forma rápida e confiável.

15.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACE - Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia, **“Ocorrência de Tensões e Correntes Harmônicas nos Sistemas Elétricos - Portaria em Elaboração pelo DNAEE, Apreciação da ABRACE”**, Relatório ABRACE; novembro 1985.

ABREU, JOSÉ POLICARPO DE; JOSÉ MARIA C. FILHO; PAULO L. CARVALHO; **“Impacto das Voltage Sags Sobre Equipamentos Eletrônicos”**; II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997 - 1

ABREU, JOSÉ POLICARPO DE; JOSÉ MARIA C. FILHO; PAULO L. CARVALHO; OLIVER PÉRICLES O. FREIRAS; **“Reflexos da Conservação na Qualidade da Energia Elétrica”**; II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997 - 2

AGÊNCIA, de Aplicação de Energia, Manual de Administração de Energia , Iluminação 4.

ARANGO, HECTOR; et. alli.; **“A Estrutura Tarifária no Brasil e sua Atualização para Ambientes Distorcidos”**, II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

ARRILLAGA, J.; **“Power System Harmonics”**, John Wiley & Sons, 1985.

BRASIL, DALTON O. C., et alli; **“Qualidade de Potência – Aspectos Metodológicos e de Custos”**, II SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, São Lourenço, de 1997.

BRONZEADO H. S. - CHESF, Á. J. P. RAMOS - CHESF, J. C. DE OLIVEIRA - UFU, J. P. G. DE ABREU - EFEI, A. A. C. ARRUDA - ELETROPAULO, A. C. BRANDÃO – CEMIG, II SBQEE – **“Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições”** Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997 - 1

CEB – Companhia Energética de Brasília, **“Projeto de Conservação de Energia da Esplanada dos Ministérios”**, Brasília, Junho de 1995.

CED – Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, CESP, CPFL, ELMA, EBE, EPUSP, IEE/USP, **“Nota Técnica do Projeto Integrado de Qualidade de Energia, Normalização, Medição e Tarifação – Tarifação e Medição em Ambientes Distorcidos”**, Junho de 1998.

CEMIG, **“Energia Solar para o Aquecimento de Água”**, Cemig/Superintendência Comercial, Belo Horizonte, 1993

CESP, **“Manual de Fator de Potência”**, 2a Edição – SP, 1986.

COENE, **“Apostila do Curso de Otimização Energética”**, FUPAI – Fundação de Ensino e Assessoramento à Indústria, Itajubá, 1996

DE ARAÚJO, JOÃO LIZARDO R. HERMES, **“Difusão de Tecnologias Eficientes no Brasil”**, Instituto de Economia, Material do Curso de Reestruturação do Setor Elétrico e Novos Negócios em Eficiência Energética - UFRJ, 1998

DE VRÉ, R. **“Limitation of Harmonics due to household and similar low-voltage equipment.”** International Conference on Harmonics in Power System, 1994.

ELETOBRÁS, **“Análise dos Comentários sobre a Minuta de Portaria Regulamentando os Critérios para Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais”**, Relatório SCEL/GTEE - 02/86, janeiro 1986.

ELETOBRÁS, **“Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”**, Relatório CECE/SCEL/GCOI e GTCP/CTST/GCPS, fevereiro 1993.

EMANUEL, A. E.; WANG, X.; **“Estimation of Loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads”**, IEEE Transactions On Power Apparatus and System”, Vol. PAS-104, N°3, March, 1985.

EMANUEL, ALEXANDER E.; **“Apparent Power: A Practical Approach to its Resolution”**, II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

FICAP, **“Fios e Cabos Plásticos”**, Catálogos Diversos, 1998

FINEP - Capacitação para a Tomada de Decisões na Área de Energia - **“O Planejador do Setor Elétrico: Desafios e Controvérsias”**; Rio de Janeiro - 1989.

FÓRUM NB-3, **“Harmônicos em Transformadores”**, Revista Eletricidade Moderna, pgs 36-37, Janeiro de 1997

FURTADO, H.C., **“Avaliação do desempenho de materiais ferromagnéticos para motores”**. Revista Eletricidade Moderna, nº263, pp. 50-57, fevereiro de 1996.

GELLER, H. S., et. Alli, **“Iluminação Eficiente no Brasil: Evolução do Mercado, Economia de Eletricidade e Políticas Públicas”**. Rio de Janeiro, ELETROBRÁS/PROCEL, Dezembro de 1996.

GAMA, PAULO HENRIQUE R. P.; **“A Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Elétrica”**, Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, Dezembro de 1998.

GELLER, H. S., **“O Uso Eficiente da Eletricidade: uma estratégia eficiente para o Brasil”**, Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Eficiência Energética, 1996.

GUIMARÃES, C. A. M.; **“Apostila sobre Harmônicos”**, Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica – EFEI, 1997.

HANDBOOK, Insulated Power Cable Engineers Associated; July 1959.

HEI, Hawaiian Electrical Institute, 1998. (Internet: <http://www.hei.com>)

IEEE Standard 519-1992, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System (ANSI).

IEC 1000-3-2, **“Limits for Harmonic Current Emissions”**, International Electrotechnical Commission Standard, Mar. 1995.

IEEE Standard I159, **“IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”** - 1995.

JANNUZZI, GILBERTO DE M.; Swisher, J. N. P.; **“Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis”** Ed. Autores e Associados, Campinas-SP, 1997

JARDINI, JOSÉ A., MOREIRA, J. G. DE SOUZA, **“Efeitos dos Chuveiros no Sistema e Alternativas para sua Substituição”**, Revista Eletricidade Moderna, pgs. 82 a 86, Janeiro de 1996.

JOSÉ BATISTA SIQUEIRA FILHO; EUDES PONTES DA SILVA; **“Harmônicos e Capacitores em Prédios Comerciais: Análise de um Caso Real”**, Revista Eletricidade Moderna, No. 287, Fevereiro de 1998.

JOSÉ CÉSAR NONATO - **“Faturamento de Energia Reativa em Condomínios Residenciais”**, Revista Eletricidade Moderna, Fevereiro de 1998

KARL JOHNSON, Electric Power Research Institute Palo Alto, California, and Robert ZAVADIL, Electrotek Concepts, Inc. Knoxville, Tennessee - **“Assessing the Impacts of Nonlinear Loads on Power Quality in Commercial Buildings - An Overview”**, IEEE Transactions 1991.

KAUFMAN, J. E., **“IES Lighting Handbook”**, Illuminating Engineering Society of North America, New York, 1981.

KEY, THOMAS S.; LAI, JIH-SHENG; **“Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building”**, IEEE Trans. On Industry Applications”, Vol. 32, N°5, September/October, 1996.

LAI, JIH-SHENG; KEY, THOMAS S.; **“Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings”** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No 4, July/August 1997.

LAMBERTS, ROBERTO; DUTRA, LUCIANO; PEREIRA, F. O. R.; **“Eficiência Energética na Arquitetura”**, São Paulo, PW Editores, 1997.

LINDERS, JOHN, R., **“Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment”**, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. IA-15, N°5, pp. 428-436, September/October, 1979.

MAHLER, RENATO PEREIRA, **“Curso de Reestruturação do Setor Elétrico & Novos Negócios em Eficiência Energética. Monografia: Eficientização Energética em Empresas de Saneamento Básico no Brasil”**, UFRJ, Maio de 1998.

MIELCZARSKI, W.; **“Quality of Electricity supply in Competitive Markets”**, Workshop apresentado no III CONLADIS, São Paulo, Setembro de 1998.

MILLS, E., A. ROSENFELD, **“Consumer Non Energy Benefits as Motivation for Making Energy-Efficiency Improvements”**, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Monterrey, California, 1994.

NBR 5410, **“Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Procedimentos ABNT”**, 1997

NBR 11301, **“Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%)”**, 1990

OLIVEIRA, A. DE; et. All; **“Uma Contribuição para a Quantificação e Qualificação da Distorção Harmônica”**, II SBQEE, São Lourenço, 1997.

PADACA, V. F.; HESS, H. L.; **“ Resonant Interaction and Additive Harmonic Effects of Multiple Paralleled AC Drives in Forest Products Processing”**, University of Idaho, (powerquality.com, 1998)

PROCEL, Resultados do, **“Economia de Energia e Redução de Demanda na Ponta”**, Abril de 1997.

- PROCEL, **“Manual de Conservação de Energia Elétrica na Indústria – Alta Tensão”**, 1996.
- PROCEL, Dados Diversos, **“<http://www.eletrabras.com/procel>”**, 1998.
- PROCOBRE, Instituto Brasileiro do Cobre, **“Qualidade de Energia – Harmônicas”**, Manual de Referência, 1998.
- PROCOBRE, Instituto Brasileiro do Cobre, **“Dimensionamento Econômico de Condutores Elétricos”**, Catálogo de Publicação, 1998.
- R. R. VERDERBER, et. alli., **“Harmonics From Compact Fluorescent Lamps”**, IEEE Transactions - 1991
- REZEK, A.J.J., **“Harmônicos Controlados por Conversores Controlados pela Rede”**, Notas de Aula de Eletrônica de Potência, EFEI 1995.
- ROCHA, C. O. A.; MELLO, C. A. F.; GOMES, H. N.; **“Harmônicos causados pela operação simultânea de televisores”**; Rev. Eletricidade Moderna, Abril de 1997.
- SAMIR Datta, Senior Member, IEEE California Polytechnic State University - **“Power Pollution Caused by Lighting Control Systems”**, IEEE Transactions 1991.
- SEN, P.K., LANDA, H. A., **“Derating of induction motors due to waveform distortion”**, IEEE Trans., IA26, pp. 1777-1982, 1990.
- STRANGAS, ELIAS G.; **“Adjustable Speed Drive Power Quality Evaluation Program – Second Phase – 1995-1996 - Final Report”**, Michigan State University, East Lansing MI48824, June 1996.
- TABOSA, R. P. E SOARES, G. A., **“Ações Tecnológicas de Conservação de Energia em Motores e Acionamentos”**. Revista Eletricidade Moderna, nº 263, pp. 36-48, Fev. de 1996.
- TOM SHAUGHNESSY, **“Power Factor, Harmonics and Harmonic Filter”**, Power CET, Santa Clara, CA, 1998.
- VITRÚVIO, M. L.; **“Los diez libros de arquitectura”**. Ed. Iberia S.A., Barcelona, 1982.
- WAGNER, V. E., et. Alli., **“Effects of Harmonics on Equipment”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, Nº2, April 1993.
- WATANABE, E. H., et. alli., **“New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, Nº 2, April 1993.
- WILKINS, A. J., et. alli., **“Fluorescent Lighting, Headaches and Eye-Strain”**, presented at the National Lighting Conference, 1988.

YACAMINI, R.; **“Power System Harmonics – Part1 Harmonic Sources”**, Power Engineering Journal, August 1994, pps 193-198.

YACAMINI, R.; **“Power System Harmonics – Part3 Problems Caused by Distorted Supplies”**, Power Engineering Journal, October 1995, pps 233-238.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ANDERSEN, MARK, **“Getting “Power Bugs” Out of Your Facility”**; The Energy Management Training Series - Internet :<http://powerquality.com>, 1998

ARANGO, HECTOR; **“Transporte e Entrega de Energia Elétrica”**, CENÁRIOS – Curso de Especialização Sobre o Novo Ambiente Regulatório, Institucional e Organizacional do Setor Elétrico, Universidade de São Paulo - USP, 1997.

ARSENEAU, R.; QUELLETTE, M.; **“The Effects of Supply Harmonics of the Performance of Compact Fluorescent Lamps”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N° 2, April 1993, pps 473-479

BAGHZOUZ, Y.; TAN, O. T.; **“Harmonic Analysis of Induction Watt-hour Meter Performance”**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104 N° 2, February 1985, pps 339-406

BEGOVIĆ, M. M.; DJURIC, P. M.; DUNLAP, S.; PHADKE, A. G.; **“Frequency Tracking in Power Networks in the Presence of Harmonics”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N°2, April 1993, pps 480-486

BERNARDES, D. F.; JÚNIOR, A. S.; RODRIGUES, J. C. G.; VICENTE, J. M. E.; **“O Impacto do uso de Microcomputadores na Qualidade da Energia Elétrica”**, Artigo apresentado no II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - São Lourenço - M.G.. De 16 a 19 de Novembro de 1997

BOLETIM Conjuntura Energia, Coordenadoria do Sistema de Informações Energéticas e Informática, 1998

BRONZEADO, H. S., **“Principais Aspectos da Qualidade de Energia Elétrica”**, notas do Curso de Extensão Universitária, UFPE, agosto 1997. – 2

DKB - Desdner Kleinerwort Benson - Departamento de Pesquisa da Instituição Financeira DKB, **“The Millennium Files”** Latin America: Consumption Comes of Age, Londres, 1997

DNAEE, **“Manual de Implantação da Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica”**, Relatório do Grupo de Trabalho criado pela Portaria DNAEE 163/93, agosto 1997.

ELETOBRÁS, **“Critérios e Metodologias para o Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais”**, Relatório SCEL/CENC - 01/78, 1978.

ELETOBRÁS, **“Critérios e Metodologias para o Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais”**, Relatório SCEL/GTEE - 03/84, 1984.

ELETOBRÁS, **“Parecer sobre a Avaliação dos Critérios do GCOI para o Atendimento a Cargas Especiais Aplicados a Consumidores Existentes no Sistema”**, Relatório SCEL/GTEE - 05/84, Outubro 1984.

ELETOBRÁS, **“Análise dos Comentários sobre a Minuta de Portaria Regulamentando os Critérios para Atendimento de Consumidores com Cargas Especiais”**, Relatório SCEL/GTEE - 02/86, janeiro 1986.

EMANUEL, A. E.; LEVITSKY, F. J.; GULACHENSKI, E. M.; **“Induction Watthour Meter Performance on Rectifier / Inverter Circuits”**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100 N°11, November 1981, pps 4422-4427

FLEISHMAN, BARRY; DICKSTEIN SHAPIRO; **“Power Quality and Products Liability Law Emerging Issues and Concepts”**, Et Al Whashington D.C., 1998-1; Internet: <http://www.powerquality.com>

FLEISHMAN, BARRY; ANDERSON KILL OLICK & OSHINSKY; **“Whose Fault Was It”**, Whashington D.C., 1998-2; Internet: <http://www.powerquality.com>

GAMA, PAULO HENRIQUE R. P. GAMA; et. alii; **“Interferência no Sistema Elétrico Causado pela Utilização de Lâmpadas Fluorescentes Compactas em Consumidores Residenciais”**, II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, EFEI, 1997

GOLDBERG, S.; HORTON, W. F.; **“Induction Watthour Meter Accuracy with Non-Sinusoidal Currents”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2 N° 3, July 1987, pps 683-690

HENDERSON, R. D., **“Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformes”**, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30 N° 3, May/June 1994

LU, S.; LIU, Y.; REE, J. DE L.; **“Harmonics Generated From a DC Biased Transformer”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N°2, April 1993, pps 725-731

MAKRAM, E. B.; WRIGHT, C. L., GIRGIS, A. A.; **“A Harmonic Analysis of the Induction Watthour”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7 N° 3, July 1992, pps 1080-1088

MILLER, A. J. V.; DEWE, M. B.; **“The Application of Multi-Rate Digital Signal Processing Techniques to the Measurement of Power System Harmonic Level”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N°2, April 1993, pps 531-539

RAMOS, ÁLVARO J. P. – CHESF; DANIEL DE LIRA – Politécnica/UPE; HERVELTO S. BRONZEADO – CHESF; **“Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica – Aspectos Práticos”** – II SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, 1997

RICHARD REDL; PAOLO TENTI; J. DAAN VAN WYK; **“Power Electronics Polluting Effects”**; IEEE Spectrum, May 1997.

SECRETARIA de Energia do Estado de São Paulo, Comissão de Serviços Públicos de Energia, **“Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica – Indicadores, Padrões e Penalidades – Versão 2”**, Julho de 1997

SICREE, R. M.; RAUCH, G. B.; DIETRICH, F. M.; **“Comparison of Magnetic Flux Density Meter Responses Over a Database of Residencial Measurements”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N°2, April 1993, pps 607-619

WILLIAMS, S. M.; BROWNFIELD, G. T.; DUFFUS, J. W.; **“Harmonic Propagation on a Electric Distribution System: Field Measurements Compared with Computer Simulation”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 N° 2, April 1993, pps 547-552

YACAMINI, R., **“Power System Harmonics - Part 2: Measurements and Calculations”**, Power Engineering Journal, February 1995, pps 51-56

YAMACHITA, ROBERTO AKIRA; **“Conservação de Energia Elétrica Utilizando-se Sistemas de Iluminação”**, Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, Março de 1998.

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA
Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações

COORDENAÇÃO

Milton César Silva Marques (Eletrobrás/PROCEL)
Jamil Haddad (Universidade Federal de Itajubá)
André Ramon Silva Martins (Universidade Federal de Itajubá)

AUTORES

Afonso Henriques Moreira Santos
Alexandre Augusto Simões
André Ramon Silva Martins
Augusto Nelson Carvalho Viana
Cláudio Ferreira
Edson da Costa Bortoni
Eduardo Crestana Guardia
Electo Eduardo Silva Lora
Fábio José Horta Nogueira
Flávio Neves Teixeira
Jamil Haddad
José Antônio Cortez
Luiz Augusto Horta Nogueira
Manuel da Silva Valente de Almeida
Marcelo José Pirani
Marcos Vinícius Xavier Dias
Milton César Silva Marques
Oswaldo Venturini
Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama
Pedro Paulo de Carvalho Mendes
Roberto Akira Yamachita
Valberto Ferreira da Silva



Minas e Energia
Ministério de Minas e Energia

Educação
Ministério da Educação



ISBN 856036900-7

**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE ITAJUBÁ**



9 788560 369003