Novas Tecnologias para Processos Industriais:

Eficiência Energética na Indústria

Introdução

A concorrência internacional vem exercendo sobre a indústria brasileira uma pressão crescente no sentido de que adote tecnologias inovadoras mais "limpas". É imperioso que se trabalhe com plantas industriais sustentáveis capazes de minimizar o consumo de energia e água e a emissão de efluentes e gases que causam o efeito estufa (GEEs), bem como o descarte de resíduos.

O presente trabalho foi elaborado para apoiar o processo de identificação e difusão de novas tecnologias nesse campo. Ele compreende uma síntese do documento intitulado "Identificação de Tecnologias Inovadoras para Processos Industriais", fruto de uma parceria da Confederação Nacional de Indústria (CNI) com a Eletrobras formada por intermédio do PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica e seu subprograma PROCEL INDÚSTRIA – Eficiência Energética Industrial.

Sete setores foram selecionados para integrar o estudo. São eles: (i) Siderurgia - segmento integrado; (ii) Químico - segmento de fertilizantes; (iii) Metais Não Ferrosos - segmento de Alumínio; (iv) Cimento; (v) Celulose e Papel - segmento integrado mais embalagens; (vi) Cerâmico - segmentos de revestimentos cerâmicos e cerâmica vermelha; e (vii) Alimentos

e Bebidas - segmento bioetanol e biocombustível. Essa seleção teve por base as seguintes considerações:

- Os setores de siderurgia, produtos químicos e metais não ferrosos, celulose e papel e alimentos e bebidas são os que apresentam os maiores consumos específicos da indústria tanto de energia térmica como elétrica.
- Os setores de siderurgia, produtos químicos e alimentos e bebidas são os que mais contribuem para o PIB do Brasil.
- Os setores de siderurgia, produtos químicos, metais não ferrosos, celulose e papel e produtos cerâmicos não só vêm ao longo dos últimos anos investindo significativamente na melhoria de seus processos produtivos como tiveram um comportamento econômico mais dinâmico, fato que abre boas perspectivas de manutenção de altas taxas de crescimento no futuro .

O trabalho foi dividido em três etapas. Na primeira foram identificadas as demandas em termos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) para os setores industriais selecionados. Na segunda etapa fez-se um levantamento do "estado da arte" dos equipamentos e/ou processos para cada um dos setores citados, incluindo as tecnologias inovadoras de uso geral. Na etapa final é feita uma análise da extensão e do uso efetivo das tecnologias inovadoras no curto, médio e longo prazos.

A análise dos processos de inovação tecnológica à disposição do setor industrial apresentados neste trabalho permite destacar os seguintes aspectos:

Setor Siderúrgico com Ênfase nas Plantas Integradas. Este segmento tem adotado práticas de gestão sustentável a fim de mitigar os principais impactos ambientais do seu processo industrial. Tais práticas constam do seguinte: consumo intensivo de materiais, recursos energéticos e água, produção de efluentes e geração de GEEs. Para tanto, as atividades e as estratégias das empresas têm privilegiado a responsabilidade social e o compromisso com a melhoria da qualidade de vida, a partir do domínio de toda a cadeia do aço.

Setor Químico com Ênfase no Segmento de Fertilizantes. Por meio de iniciativas próprias ou de parcerias com órgãos de fomento, entidades de pesquisa e universidades, este setor tem procurado melhorar o seu processo produtivo com foco no uso mais eficiente da energia, no emprego de novas tecnologias e na busca de alternativas para a redução de passivos ambientais.

Setor de Metais Não Ferrosos com Ênfase no Segmento de Alumínio. Por se tratar de uma indústria altamente energointensiva, seus investimentos estão voltados principalmente para a reciclagem e a adoção de novas tecnologias que ajudam a melhorar a recuperação ou a transformação de sucata, com vistas a reduzir o consumo energético -- fundamental para manter o preço do alumínio competitivo --, o impacto ambiental e a quantidade de resíduos colocados em aterros.

Setor de Cimento. A quase totalidade das plantas nacionais passou a utilizar uma

tecnologia inovadora denominada "processo por via seca", que permite uma significativa redução do consumo específico médio de energia térmica. Também o uso de tecnologias da informação (TI) tem proporcionado altos ganhos de produtividade, a partir da integração de equipamentos e *softwares*. No tocante à sustentabilidade, a indústria cimenteira brasileira insere-se no contexto da questão ambiental, está em conformidade com a legislação vigente ou busca soluções para a ela adequar-se.

Setor de Celulose e Papel com Ênfase nas Plantas Integradas. Ações governamentais e empresariais vêm sendo desenvolvidas com ênfase na busca de maior eficiência energética e de alternativas para a mitigação de passivos ambientais causados pela produção tanto de celulose como de embalagens de papel.

Setor Cerâmico com Ênfase nos Segmentos de Revestimentos Cerâmico e Cerâmica Vermelha. As empresas nacionais vêm procurando, em parceria com órgãos de fomento e centros de pesquisa, melhorar o processo produtivo com a adoção de metas de eficientização energética e alternativas para a mitigação de impactos ambientais. Vale destacar também que, para casos específicos, o segmento de cerâmica vermelha torna-se um receptor de resíduos gerados em outros processos industriais, tal como o setor cimenteiro.

Setor de Alimentos e Bebidas com Ênfase no Segmento de Bioetanol. São significativas as perspectivas de desenvolvimento tecnológico em processos de produção do bioetanol de cana de açúcar, com aumento da produtividade e do desempenho energético, incluindo a cogeração. Destacam-se, também, as rotas de hidrólise e gaseificação, passíveis de serem empregadas no incremento da produção de bioetanol e bioeletricidade. .

2. Tecnologias Inovadoras na Indústria: Energia, Água e Resíduos

2.1. Uso Geral (*Cross Technologies*)

O desenvolvimento e o emprego de tecnologias inovadoras em processos industriais capazes não só de reduzir o consumo de energia, a geração de resíduos e a emissão de GEEs, como de contribuir ainda para o aumento da competitividade das plantas, constitui um objetivo primordial da indústria na atualidade. É consenso geral que as reservas fósseis não serão baratas para sempre e que tampouco seu uso será feito sem prejuízos para o meio ambiente. Sabe-se, ademais, que os serviços indispensáveis – como iluminação, força motriz e climatização de ambientes -- podem ser oferecidos com menos consumo de energia, possibilitando ganhos econômicos e ambientais.

Nesse contexto, biorrefinarias, equipamentos eletroeletrônicos e softwares para controle de processos, equipamentos de alta performance e hábitos de uso passaram a ser analisados sob o ponto de vista de sua eficiência energética e são considerados "economicamente viáveis" quando o custo de sua implantação e/ou incorporação, via tecnologias inovadoras, é menor que o custo da energia evitada. A essa conclusão devem ser acrescidos os benefícios indiretos de mitigação ambiental, que sistemicamente acabam por potencializar o uso e as vantagens das tecnologias inovadoras, em programas de eficiência energética, refletindo positivamente no desenvolvimento sustentável do setor industrial.

Os nichos em que pesquisas e validações de novas tecnologias estão em andamento compreendem sistemas de bombeamento, sistemas hidráulicos, ventiladores, tecnologias de membrana, processos de secagem, sistemas de ventilação, compressores de ar comprimido, acionadores de velocidade variável, compressores de fluido refrigerante, sistemas de refrigeração, sistemas de manuseio de material e processamento, entre outros. A seguir, são citados exemplos dessas tecnologias inovadoras.

Computação em Nuvem *(cloud computing)*. Essa tecnologia, fornecida por empresas de TI, está voltada para a busca da eficiência energética em processos. Ela permite que um arquivo ligado a qualquer processo produtivo seja acessado de um celular ou notebook, independentemente do equipamento de que se trate, cujas informações de controle estarão guardadas em servidores na WEB. Grandes corporações industriais e financeiras terão à sua disposição, no futuro próximo, equipamentos e tecnologias para o controle e a gestão de processos que serão pagos conforme o uso feito. Nesse cenário, a realização dos objetivos de sustentabilidade e a competitividade industrial deverão ser mais factíveis.

Empresas de computação estão investindo centenas de milhões de dólares em infraestrutura, a fim de levar eficiência e rapidez aos usuários. O software, por sua vez, deixará de ser vendido como um produto. Na nova lógica da computação "em nuvem"

e com modelo centralizado, pagar-se-á uma taxa mensal pelo direito de uso, sendo os programas acessados pela internet, sem nenhum custo extra.

Rede Elétrica Inteligente *(smart grid)*. Trata-se de "uma rede de distribuição" que consegue integrar de forma inteligente as ações de todos os utilizadores a ela ligados (produtores, consumidores ou ambos), a fim de que um conjunto de bens e serviços seja disponibilizado eficientemente, a exemplo de sistemas de medição remota, gerenciamento de demanda, armazenamento de energia, uso de fontes alternativas, sensoriamento e comunicação de dupla direção, entre outros. Com essa tecnologia inovadora, as empresas, e em especial as de distribuição de energia, podem dispor de informações em tempo real sobre o uso final de seu produto em cada um de seus consumidores, o que lhes permite contar com eficiência energética sustentável e melhorar sua performance competitiva.

Light Emission Diode (LED). Os LEDs compreendem um componente eletrônico semicondutor capaz de converter energia elétrica em luz com muito mais vantagens do que as lâmpadas incandescentes e halógenas. Cabe citarm entre tais vantagens, a maior vida útil, os menores custos de manutenção, a maior eficiência energética, a menor tensão de operação e a maior resistência a impactos e vibrações, além da possibilidade de controle dinâmico de cor e intensidade. Os LEDs são também ecologicamente corretos, pois não utilizam mercúrio ou qualquer outro elemento que cause dano à natureza e tampouco emitem radiação ultravioleta ou infravermelha.

Sistemas de Iluminação. Uma gama de lâmpadas avançadas, reatores, luminárias e tecnologias light pipe pode reduzir significativamente o consumo de energia e os gastos com manutenção associados à iluminação de instalações industriais. Além de sua maior durabilidade, os novos sistemas de iluminação proporcionam redução de calor nas áreas internas, resultando em menor carga de refrigeração, melhoria da segurança pela eliminação da iluminação relacionada com a fiação elétrica e os equipamentos instalados em áreas molhadas ou explosivas, possibilidade de utilização de outras fontes de luz não convencionais mais eficientes, mais específicas e esteticamente agradáveis, além de instalações e custos de manutenção reduzidos.

O *light pipe*, por exemplo, compreende um sistema de tubos ópticos de policarbonato cristal que confere uniformidade e suavidade à propagação da luz, além de evitar todo tipo de sombreamento ou aquecimento ambiental. Lâmpadas de indução magnética combinam, por sua vez, alta qualidade com alta eficácia e vida longa. Em comparação com a lâmpada incandescente, a lâmpada de indução magnética é cerca de quatro vezes mais eficiente e sua durabilidade é no mínimo 20 vezes maior.

Motor Elétrico de Alto Rendimento. Desde 1993, os rendimentos nominais dos motores elétricos no Brasil são obrigados a apresentar índices mínimos de desempenho a fim de atender à Lei de Eficiência Energética (Brasil, 2001). A partir de 2010, todos os motores fabricados ou comercializados no País deverão ser de "alto rendimento". Estima-se que essa medida resultará em uma economia de energia equivalente à produzida por uma hidrelétrica de cerca de 380 MW (Brasil, 2007). Os índices de eficiência propostos no Brasil

para motores elétricos estão próximos dos praticados em outros países, a exemplo dos EUA, do Canadá, da União Européia e da China. É possível, porém, avançar ainda mais, mediante a criação, por exemplo, da classe *premium*, que congrega motores elétricos de altíssima eficiência.

Acionadores de Velocidade Ajustável (AVAs). Compreendem conversores de frequência que, ao serem utilizados no acionamento de cargas centrífugas, com fluxo variável, podem proporcionar uma economia de energia entre 15% e 50% (Brasil, 2007). Além disso, a aplicação de AVAs gera outros benefícios, como melhor controle do processo; diminuição de ruído; redução da manutenção necessária graças às partidas e paradas mais suaves não só da bomba e do motor, mas de todo o sistema hidráulico, por evitar os golpes de aríete. Sua utilização requer, entretanto, atenção específica, em virtude de alguns problemas que podem ocorrer, como a geração de harmônicos na rede e o sobreaquecimento do motor.

Tecnologias de Membranas. As membranas são meios filtrantes, produzidos em geral a partir de materiais poliméricos, que apresentam poros de dimensões variadas. Esses poros servem tanto para separar partículas como para fracionar moléculas de diferentes massas molares. Na condição de barreiras seletivas que atuam como uma espécie de filtro, as membranas são capazes de promover separações em sistemas nos quais os filtros comuns não são eficientes.

A tecnologia de membranas é utilizada, sobretudo, na separação de contaminantes da água e para a recuperação de substâncias e subprodutos. De um modo geral, as membranas separam os contaminantes insolúveis de soluções, removem totalmente os microrganismos do ar ou de soluções, e possibilitam a separação, diálise ou concentração de macromoléculas. Elas são utilizadas para separar componentes de correntes líquidas e também de correntes gasosas no tratamento de águas industriais e efluentes, no reuso e na potabilização de água do mar.

A tecnologia de membranas, dado o seu alto desempenho, tem sido vista como um grande negócio e uma solução eficiente numa série de aplicações. Sua sustentabilidade está associada ao fato de não ser poluente nem gerar efluentes, ter alto rendimento, ser de fácil operação, requerer um curto tempo de parada para a limpeza dos meios filtrantes e ser de instalação compacta. Além disso, seu custo operacional é baixo, graças à redução significativa da geração de lodo, pois durante a filtração não se adicionam produtos químicos. Ao longo de sua vida útil, pode-se perder um pouco a capacidade de filtração, mas não a qualidade do que é filtrado.

Tecnologia de Membranas Líquidas. A membrana líquida oferece uma alternativa para a extração líquido-líquido, utilizando muito menos energia. Essa tecnologia pode ser usada para separar as misturas aquosas e orgânicas. No caso, por exemplo, da separação de uma mistura de álcool isopropílico e água, utiliza 60% menos combustível do que o processo líquido-líquido. Separadores por membrana também tendem a apresentar um custo aproximadamente 10% menor do que o de outras unidades tradicionais de separação. Os custos operacionais anuais das membranas líquidas tendem entretanto, a ser um pouco

mais elevados do que os de outros separadores, pelo fato de que elas agregam muita sujeira e precisam ser substituídas com frequência.

No caso das membranas líquidas, uma das maiores barreiras enfrentadas é a sua limitada produção, uma vez que se trata de produtos altamente específicos no que diz respeito aos compostos que podem separar. Diferentes processos exigem, portanto, diferentes membranas.

Equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado. Na indústria de transformação, diversas instalações de alta tecnologia, a exemplo de laboratórios, utilizam uma quantidade significativa de energia para colocar em funcionamento os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC - *heating, ventilation, and air-conditioning equipment*). A intensidade da energia utilizada por essas instalações costuma ser no mínimo cinco vezes maior do que a solicitada por edifícios comerciais. Em alguns casos, as cargas de HVAC chegam a responder por 40%-50% da energia total consumida por uma planta industrial.

Existem várias tecnologias de HVAC que, quando combinadas, possibilitam economias significativas de energia. Atualmente, uma grande quantidade de energia é gasta em aquecimento, refrigeração e filtragem de ar que é depois liberado para a atmosfera. Minimizando esse fluxo, reduz-se a quantidade de ar que precisa ser filtrado. Uma tecnologia desenvolvida pelo Lawrence Berkeley National Laboratory, dos EUA, denominada *Laboratory Fume Hoods*, baseada na utilização de pequenos sistemas de HVAC, permite economizar até 75% de energia, quando comparada com os sistemas tradicionais.

A recirculação do ar é outro sistema de HVAC consumidor de energia. Se a ocupação do ar que necessita ser filtrado é reduzida, menos ar é necessário para manter os níveis de limpeza. Sensores e contadores de partículas baseados em laser são duas tecnologias que podem ser aplicadas de forma eficiente para reduzir o fluxo de ar. Além disso, determinados equipamentos, como os grandes ventiladores de velocidade reduzida e as unidades de filtros mais eficientes, podem ser combinados para diminuir ainda mais a recirculação. Dentre as novas tecnologias de filtros de ar, merecem destaque o *High Efficiency Particulate Air* (HEPA) e o *Ultra Low Penetration Air* (ULPA) (Tschudl, 2000). O dimensionamento correto dos sistemas de exaustão, a melhor concepção dos dutos de ventilação e a limitação da área a ser tratada com ar mais limpo também são medidas fundamentais para reduzir o consumo de energia via sistema HVAC.

Síntese. Todas as *cross technologies* acima analisadas impactam, em maior ou menor medida, os processos industriais, posto que permitem reduzir o consumo de energia, a geração de resíduos e a emissão de GEEs, com reflexos para o aumento de competitividade industrial, conforme mostrado na Tabela 1, a seguir.

FIGURA 1

Matriz de Tecnologias Inovadoras de Uso Geral

Magnitude dos Impactos sobre o Processo Produtivo

Tecnologia	Maturidade da Tecnologia	Redução do Consumo de Energia	Redução do Consumo de Água	Redução da Geração de Resíduos	Redução da Emissão de GEEs	Aumento da Competitividade
Tecnologia de LEDs	Nova					
Motor elétrico de alto rendimento	Comercial					
Sistemas de iluminação	Comercial					
AVAs	Comercial					
Tecnologia de membranas	Nova					
Membranas líquidas	Piloto					
Equipamentos de HVAC	Nova/Comercial					

Legenda: Magnitude do impacto - Alto; Médio; Baixo; Não se aplica.

2.2. Água

A indústria responde por cerca de 20% do consumo total de água no Brasil, e uma parte significativa dessa demanda é extraída diretamente dos corpos d'água. Nos últimos anos, as empresas vêm despertando para a reutilização da água mediante a incorporação de tecnologias inovadoras no tratamento tanto da água bruta como dos efluentes de seus processos, que podem ser transformados em matéria-prima. Ocorre, porém, que mais da metade da água consumida pela indústria no Brasil continua a ser tratada de forma inadequada ou, o que é ainda pior, não recebe tratamento algum.

Um estudo do Centro Internacional de Referência em Reuso de Água (CIRRA), vinculado à Universidade de São Paulo (USP), revelou que é possível, mesmo sem grandes investimentos, reusar aproximadamente 60% da água total consumida em uma planta industrial. Em virtude da sistemática de outorga e cobrança pelo uso da água que vem sendo implementada pela Agência Nacional de Águas (ANA), a indústria será duplamente penalizada, em termos tanto de captação de água como de lançamento de efluentes. O reuso e a reciclagem na indústria passam a constituir, portanto, ferramentas de gestão fundamentais para a sustentabilidade da produção industrial. A prática de reuso industrial pode ser adotada na produção de água para caldeiras, em sistemas de resfriamento como água de reposição, em lavadores de gases e como água de processos.

2.3. Reciclagem

De uma forma geral, a proteção ambiental está em franco desenvolvimento no Brasil graças à promulgação de leis importantes, aos controles mais rigorosos e à crescente disposição

da indústria de reduzir seus impactos ambientais pela consciência da responsabilidade social e por exigências do mercado.

Os resíduos de processos industriais – o caso da produção de plásticos, da usinagem de peças, de produtos químicos, da fabricação de papel etc. --, podem seguir a via da reciclagem por meio de diversos processos. Dentre esses, os mais utilizados são os aterros; a incineração, que é feita em cimenteiras; a compostagem e os processos específicos, como, por exemplo, o papelão e o papel através da repolpação via hydra pulping; a refusão para o vidro; a seleção e a extrusão para os plásticos; a trituração e o enchimento para a madeira; o ferro velho como carga de alto forno; a refusão de latas para o alumínio, etc. É certo que alguns desses processos só são economicamente possíveis quando são subsidiados ou quando a mão de obra, principalmente para a segregação, não é qualificada.

Hoje, o grande desafio tecnológico da reciclagem é o aumento da quantidade de material que pode retornar à cadeia produtiva por meio da reciclagem primária ou secundária. Entre as tecnologias inovadoras disponíveis e passíveis de uso imediato pela indústria estão as que envolvem plasmas. Várias aplicações de plasma vêm-se tornando cada vez mais importantes pelo fato de reduzirem, em muitos casos, a produção de resíduos e o consumo de energia, em vários processos industriais.

3. A Utilização de Tecnologias Inovadoras em Segmentos Selecionados

3.1. Siderurgia

As mudanças tecnológicas têm proporcionado bons resultados para a indústria siderúrgica, especialmente na redução do ferro, com desenvolvimento de novos métodos: tecnologia de oxigênio básico, redução direta (DRI), briquetes de ferro (HBI), redução direta utilizando gás como agente redutor e redução direta com carbono.

Altos Fornos. A tecnologia dos altos fornos permite a obtenção de diferentes níveis de eficiência energética, tendo em vista a diversidade dos energéticos usados e a qualidade do ferro utilizado. Fatores como tamanho do alto forno e uso do oxigênio (empregado nos fornos do tipo BOF - *Basic Oxygen Furnaces*) são também importantes e dependem da tecnologia adotada e da estratégia de produção. A média de produção de um alto forno oscila em torno de 3.500 a 6.500 t/dia, enquanto fornos menores podem ajustar-se melhor a pequenas produções locais, resultando em menor consumo de energia. Para minifornos, por exemplo, um aumento de 50 a 55% no ferro contido no minério reduz o consumo de combustíveis em 20%, enquanto um aumento na produtividade diária desses fornos (750 a 600 kg/t de metal), de 1,0 a 5,0 t/m³, também reduz o consumo.

A tecnologia dos fornos de arco elétrico (EAF – *Electric Arc Furnaces*) permite um processamento de cargas com 100% de sucata. Os fornos do tipo BOF também admitem esse processamento, mas a adição, no caso deles, é geralmente de menos de um terço da carga total. Os fornos EAF no Brasil apresentam um consumo médio de energia elétrica da ordem de 320 kWh/bat.

Uma das maiores preocupações da indústria integrada tem sido o melhoramento do processo de coqueificação, mediante o emprego de tecnologias inovadoras que incluem o uso de carvão como matéria-prima. Essas tecnologias visam ao melhoramento da rota de produção que inclui a coqueificação, a produção de ferro gusa, a pelotização e sinterização e a operação do alto forno. Os novos desenhos de altos fornos têm permitido um melhor aproveitamento energético por tonelada de mineral, métodos de combustão mais aprimorados e um controle mais rigoroso de poluentes atmosféricos. Muitas plantas têm conseguido avanços no aproveitamento da sucata de ferro e nos processos de lingotamento e laminação.

Em rotas de produção, a adaptação de queimadores de ar combustível para oxigênio combustível visa à redução do consumo de combustível, dos custos operacionais e das emissões dos fornos. Essa melhoria, denominada *Dilute Oxygen Combustion* (DOC), separa, em alta velocidade, o combustível e o oxigênio para gerar uma forte recirculação de gás dentro do forno, produzindo combustão entre o combustível e o oxigênio altamente diluído na mistura de gases do forno. Esses queimadores oxicombustível têm sido demonstrados

comercialmente para utilização em fornos de reaquecimento e fornos de fusão. Essa tecnologia aumenta a produtividade, com baixas emissões de NOx (70 a 90%), reduz o consumo de combustível e as despesas com manutenção. Em fornos de reaquecimento, economias substanciais de energia têm sido obtidas e espera-se para os próximos anos economias da ordem de 30%, passando do atual 1,27 GJ/t para 0,77 GJ/t, além de um aumento de produtividade de 25%. Projetos estão sendo desenvolvidos também em sistemas de reaquecimento, a fim de reduzir perdas por oxidação (1 a 2% do aço produzido) associadas ao processo de fabricação do aço, e serão testados em plantas norte-americanas.

Outra tecnologia inovadora para altos-fornos é a injeção de carvão pulverizado (PCI – *Pulverized Coal Injection*) que pode reduzir o consumo energético e as emissões pela minimização do uso de coque e do custo total da produção do metal.

Algumas plantas têm obtido bons resultados com o emprego do processo de pré-redução do ferro, que consiste na utilização do gás excedente de tanques de fusão. Devido às diferentes condições das reações e à integração das operações de produção de ferro e aço, a demanda de energia no processo é muito menor que a demanda nos altos fornos, estimada em torno de 20% a 30% da energia exigida na rota convencional.

Processos de Redução de Ferro. O Circofer e Circored são dois novos processos de redução que utilizam uma série de reatores de leito fluidizado para reduzir o minério de ferro (Lurgi, 2009). O primeiro usa o carvão como combustível e o segundo usa gás natural, mas ambos geram produtos livres de carbono. Um terceiro processo é o Corex, que combina um conjunto de fornos de coque em uma única unidade e produz pelotas de minério com 93% de pureza na redução direta. Esse processo apresenta vantagens ambientais muito atraentes, na medida em que permite a produção de ferro gusa livre de resíduos, podendo o excesso de calor ser usado para gerar eletricidade para a planta. Siderúrgicas russas vêm investindo em um processo denominado Romelt, baseado no Corex, que busca otimizar o uso de matéria-prima na coqueificação e em altos fornos.

A Voest-Alpine e a Exxon desenvolveram, respectivamente, dois outros processos de redução direta, chamados Finmet e Fior, com gás natural. Em ambos os casos, os finos de minério ou pelotas têm custo menor e são processados em uma série de quatro reatores de leito fluidizado. O IDI - *Iron Dynamics*, desenvolvido pela Steel Dynamics, reduz o tempo de aciaria ao utilizar fornos rotativos. O nível elevado de enxofre produzido exige, porém, a execução de uma segunda fase em um forno a arco, aquecido por energia elétrica, que retira o enxofre do aço.

Existe ainda um outro processo de redução que utiliza hidrogênio e gás natural, ao invés de carvão, reduzindo-se o ferro em um reator de leito fluidizado. Obtém-se um produto com 80% a 90% de carboneto de ferro, uma substância com 8% de conteúdo de carbono, estável para transporte e que não requer pelotização. O carbono extra presente é utilizado para gerar calor no forno a arco elétrico e ajuda a conservar a energia elétrica. Atualmente, estima-se que o carboneto de ferro poderia substituir de 20% a 25% da carga de sucata nos fornos a arco elétrico, embora um equipamento de injeção deva ser instalado adicionalmente, para completar o processo.

Outros processos de redução incluem a tecnologia japonesa *Direct Iron Ore Smelting* (DIOS), com dois estágios de fornos baseados em carvão e finos de minérios; o HIsmelt, desenvolvido pela CRA australiana e a Klockner alemã, também baseado em carvão e finos de minérios em fornos do tipo "*shaft*"; o Hylsa, baseado em gás natural, pelotas de ferro e fornos do tipo "*shaft*"; o INMETCO, que faz a pelotização do minério com carvão e utiliza gás natural para a queima em fornos rotativos; o Midrex, que utiliza gás natural, pelotas e fornos do tipo "*shaft*", assim como o processo Purofer, desenvolvido pela Thyssen-Hutte; e um processo resultante de parceria internacional de empresas, o SL/RN, baseado em carvão, pelotas de ferro e fornos rotativos.

Aciaria. Algumas tecnologias para incrementar a produção da aciaria em plantas do Grupo Gerdau vêm sendo levadas a efeito desde 2005. A implantação de um triturador de sucatas do tipo *Shredder*, capaz de processar sucatas de obsolescência em geral, promove o adensamento e a limpeza do material, gerando ganhos de produtividade e diminuindo os custos de produção de lingotes; minimiza a dependência de ferro gusa e produz ganhos ambientais mediante a geração de resíduos menos agressivos (os resíduos podem ser retirados sob a forma de escória antes de serem fundidos), além de proporcionar economia de energia. Melhora, ademais, as condições operacionais do forno de fusão, uma vez que mais sucata pode ser carregada por ciclo, diminuindo também a produção de escória.

A tecnologia *Vacuum Pressure Swing Adsorption* (VPSA) vem sendo empregada em unidades produtoras de oxigênio de baixa pureza cuja função é atender às lanças injetoras de oxigênio e aos queimadores do forno, bem como aos aquecedores de panela de aciaria. Essa tecnologia consiste na absorção de pressão para produzir oxigênio gasoso com purezas tipicamente de 90% a 93% (Sales, 2005).

Para unidades de aciaria, atualizações tecnológicas em inversores de média tensão utilizados no sistema de exaustão dos convertedores – tecnologia *Yaskawa* (Japão) – têm promovido economia de energia elétrica e redução dos custos de manutenção.

O reaquecimento do aço é uma das atividades que mais consome energia na indústria siderúrgica. Projetos recentes têm sido adotados em fornos de reaquecimento, utilizando técnicas de uso de 100% de oxigênio ou ar enriquecido com 35% a 45% de oxigênio e ar preaquecido para combustão de gás natural. A Steel Manufacturing Association juntamente com a Steel Dynamics participaram do programa que permitiu substancial redução no uso de energia, melhoria da qualidade do aço e vantagens significativas nos custos operacionais. Essa tecnologia promoveu uma redução total de 0,375 MM Btu/bat e um aumento na produção de aço em torno de 1% a 2%. Uma nova fase desse projeto será conduzida por esses parceiros e, entre outras tarefas, verificará a performance dos fornos e identificará novos potenciais de conservação.

Laminação. O setor de conformação mecânica se desenvolveu nos últimos anos em ritmo mais veloz do que o de outros processos. A tendência que vem se mantendo é a de aumento da produtividade com redução de custos e menos efeitos ambientais, justificando os investimentos em novas tecnologias e a qualificação de processos e mão-de-obra.

Com papel importante no processo, os cilindros laminadores vêm recebendo especial atenção, com avanços notáveis, juntamente com os estudos sobre o desgaste de materiais que os constituem, aumentaram a produtividade do laminador e melhoraram a qualidade dos produtos laminados. Os materiais atualmente utilizados nos cilindros destinados aos laminadores de tiras a quente (LTQ) procuram reduzir o desgaste abrasivo por meio de melhorias na sua microestrutura cristalina (Cornelio; Guimarães, 2006). Também com o objetivo de aumentar a capacidade produtiva, várias empresas têm investido em sistemas automatizados de controle e rastreamento da laminação contínua.

O processo de laminação a frio tem adotado uma nova técnica para a etapa de acabamento cuja refrigeração e lubrificação em geral utiliza nas regiões de contato entre cilindros e material, uma mistura volumosa de óleo lubrificante com água por aspersão. Essa nova técnica implica a utilização de nitrogênio em substituição à emulsão aquosa. Desenvolvida pela *alemã C.D. Waelzholz*, a técnica denominada LIN *(Liquid Nitrogen*) apresenta ótimos resultados para uma larga faixa de qualidade de aços laminados, inclusive os de baixo e alto teor de carbono, bem como revestidos e temperados, e vem sendo empregada pela empresa brasileira Brasmetal Waelzholz (BW) (Filho; Bielskiz, 2008). O processo permite eliminar rejeições causadas pela oxidação ou manchas na superfície, um sério problema e de alto custo, bem como a obtenção de materiais com superfícies mais limpas e homogêneas quanto à rugosidade superficial. O aumento da velocidade de processamento, que eleva os ganhos de produtividade e elimina a etapa de pós-tratamento, e os ganhos econômicos em insumos como óleo de proteção e cilindros de proteção são outras vantagens obtidas com essa tecnologia inovadora.

O uso de TI em controle de processos. O papel da "nuvem computacional" através do emprego de TI representa um aprimoramento no desempenho global de produção da indústria siderúrgica. Grupos como o Gerdau, por exemplo, dotaram suas plantas de redes de computadores em ambientes ERP e *web* que permitem a troca de informações em tempo real, com isso favorecendo uma visão mais clara dos processos e da cadeia de negócios. A TI é destaque dentre as ações estratégicas de grupos siderúrgicos, com o desenvolvimento de sistemas para consolidação de dados em âmbito mundial, do *e-procurement* e da gestão da produção.

Síntese. No presente contexto, é fundamental para o setor siderúrgico, em que pese a sua maturidade tecnológica, a criação de centros de pesquisa e a formação de parcerias com universidades e governo, para um retorno tecnológico mais rápido, uma difusão mais eficaz de tecnologias mais limpas e a certeza da incorporação de tecnologias inovadoras e melhoramentos na produção. O foco na sustentabilidade deve nortear as atividades e estratégias das empresas, com a elaboração de diretrizes orientadas para o domínio de toda a cadeia do aço, a responsabilidade social, as mudanças no comportamento e o compromisso com a melhoria da qualidade de vida com ganhos sociais e coletivos. O impacto das principais tecnologias inovadoras avaliadas no presente trabalho é apresentado na tabela a seguir.

FIGURA 2

Matriz de Tecnologias Inovadoras para o Setor Siderúrgico – Plantas Integradas

Magnitude dos Impactos sobre o Processo Produtivo

Tecnologia	Maturidade da Tecnologia	Redução do Consumo de Energia	Redução do Consumo de Água	Redução da Geração de Resíduos	Redução da Emissão de GEEs	Aumento da Competitividade
Coqueificação em fornos "slot ovens"						
Redução com queimadores oxi-combustíveis						
Redução com injeção de carvão pulverizado						
Redução direta em fornos com carvão gaseificados						
Redução – Circofer e Circored						
Redução – Finmet e Fior						
Redução direta – IDI						
Redução com reator de leito fluidizado						
Redução DYOS						
Redução HYL						
Redução – Midrex e Purofer						
Redução SL/RN						
Aciaria – SREDDER						
Aciaria – VPSA						
Controle combustão de fornos						
Laminação – LIN						

Legenda: Magnitude do impacto - Alto; Médio; Baixo; Não se aplica.

3.2. Químico - Fertilizantes

3.2.1. Adubos e Fertilizantes

Um dos principais insumos utilizados no país para a produção de adubos e fertilizantes é a rocha apatita. A transformação desse material pouco eficaz no seu estado *in natura* em um produto mais solúvel e com maior eficiência de aplicação no solo, o superfosfato, é efetuada por duas vias principais, a térmica e a úmida, a primeira das quais permite a obtenção de um produto mais puro. Ambos os processos apresentam, porém, problemas tanto no aspecto ambiental quanto no processo de manufatura dos fertilizantes fosfatados.

A produção desse tipo de fertilizante gera muitos rejeitos em todas as suas etapas. Esses rejeitos, sobretudo o fosfogesso, ficam geralmente armazenados em pesados volumes nos

pátios das fábricas, o que favorece a produção de grandes passivos ambientais para o seu entorno. Além disso, problemas no processo de manufatura não permite a recuperação de produtos de grande valor comercial, como os Elementos Terras Raras, e resultam em vultosas perdas de fósforo durante o processo de concentração. Com isso, grandes volumes de matérias-primas minerais deixam de constituir jazidas, e porções significativas do material lavrado são desprezadas como rejeitos de beneficiamento.

Vários autores propõem o uso de métodos ou técnicas inovadoras para minimizar os problemas encontrados nas tecnologias atualmente em uso pela indústria de fertilizantes. Uma alternativa, por exemplo, é a utilização do processo por rota nítrica (Righi; Lucialli e Bruzzi, 2005), que gera como produtos finais nitrato de cálcio e ácido fosfórico. São estas as suas vantagens: (i) a formação de fertilizantes complexos (como Nitrogênio e Fósforo), não só que têm grande demanda no mercado como maior valor agregado; (ii) a produção de fosfogesso é evitada, minimizando-se com isso o impacto no meio ambiente; e (iii) a redução da poluição radioativa gerada pela produção de fertilizantes, devido a elementos como urânio e cádmio, entre outros.

Outro método alternativo centrado na utilização de rochas fosfáticas consideradas pobres para a produção convencional de fertilizantes propõe a mistura a seco da rocha fosfática com fertilizantes solúveis, o que possibilita um processo mais eficiente e com melhor resultado na aplicação no solo do que quando o fertilizante ou a rocha fosfática são aplicados isoladamente (Begun et al, 2004). Um terceiro método de produção de fertilizantes que pode ser considerado inovador é o processo Humifert, que propõe a alternativa da elaboração de um novo fertilizante orgânico-fosfatado por meio de técnicas simples, a partir de fosfatos naturais brutos e de materiais orgânicos, tais como turfas, bagaços, palhas, etc., e de uma série de reações químicas.

Em comum, todas as técnicas acima citadas como inovadoras buscam alternativas que visam à melhoria dos processos produtivos, diminuindo o desperdício e a geração de resíduos, além da proposta que alguns desses processos fazem de fusão nos usos entre fertilizantes orgânicos e inorgânicos.

3.2.2. Produtos Intermediários (Matérias-Primas) para a Fabricação de Adubos e de Fertilizantes

O segmento da indústria química mais energointensivo é o de produção de matéria-prima (ureia, amônia, ácido fosfórico e fosfato de amônia, entre outros), para o processo de beneficiamento de adubos e fertilizantes (Bajay, 2008). Com efeito, a produção de adubos e fertilizantes consome entre 1% e 2% da produção mundial de energia, de cujo total 80% é gasto na produção de amônia (Rune Ingels, 2007). Logo, não basta ressaltar apenas os métodos que melhoram a eficiência da produção de fertilizantes como insumo final. É necessário avaliar também a problemática do melhoramento da cadeia produtiva de seus intermediários (matérias-primas), como se faz a seguir.

Ácido Sulfúrico. No que respeita à produção de ácido sulfúrico, um fator favorável à otimização das plantas é a capacidade que elas têm de se tornarem autossuficientes em

energia elétrica e de chegar até mesmo a exportar excedentes (Rocha Junior e Kulay, 2006), o que denota as grandes vantagens tanto energéticas quanto ambientais do reaproveitamento energético (calor residual) disponíveis nas plantas de ácido sulfúrico. O reaproveitamento do calor gerado pelo processo exotérmico de obtenção de ácido sulfúrico viabiliza a montagem de uma planta cogeradora integrada, uma vez que o processo de reaproveitamento do calor resultante da conversão dos gases residuais e o processo de dupla absorção atualmente utilizado para produzir o ácido sulfúrico podem atingir um nível de eficiência de aproximadamente 99,7%. A utilização dessa configuração fabril possibilita inúmeras vantagens, dentre as quais cabe destacar as seguintes: (i) melhor qualidade de energia produzida; (ii) recuperação e reaproveitamento de todo o vapor eliminado anteriormente no ambiente e as consequentes perdas de energia e de água; (iii) redução de produtos químicos para o tratamento da água: potável (sulfato de alumínio, hipocloreto de sódio e soda cáustica) e desmineralizada para utilização nas caldeiras (regeneração das resinas catiônicas e aniônicas – ácido sulfúrico e soda cáustica, respectivamente); (iv) redução da geração de efluentes líquidos, permitindo também a redução de "torta" pela estação de tratamento de efluentes; menor custo da energia elétrica, com a possibilidade até mesmo de exportação da energia elétrica excedente; e (v) maior confiabilidade de fornecimento, transmissão e distribuição de energia elétrica para a planta produtiva. Outra vantagem importante na utilização de plantas cogeradoras integradas é a possibilidade de formação de um ciclo hídrico semifechado para uso da água, que em plantas convencionais tem caráter "aberto" e resulta geralmente em desperdício de água no processo produtivo do ácido sulfúrico.

Ureia. Na produção de uréia há pouca utilização de energia térmica e energia elétrica. Inexistem, portanto, perspectivas significativas para a promoção de ações de eficientização energética. Com a água, entretanto, é diferente, dado que o processo produtivo se caracteriza pela alta intensidade de consumo de água. Há, também, contaminação por contato direto e emissões de gases poluentes para a atmosfera. Vale, porém, destacar que desde 2008 a empresa alemã Sandvik Materials Technology passou a disponibilizar no Brasil um equipamento inovador, capaz de transformar ureia líquida em sólida, sem contaminação da água do processo e com reduzida emissão de gases poluentes. (H_2O – Uso inteligente da Água, 2008). Trata-se de uma boa oportunidade para as empresas conferirem maior sustentabilidade a seus processos e reduzirem custos operacionais, agregando valor ao produto final.

Amônia. O processo de produção de amônia é grande consumidor tanto de energia térmica quanto de energia elétrica, além de utilizar gás natural não só como matéria-prima (onde está o maior consumo), mas também como combustível para preaquecimento de metano, com a geração de vapor para conversão da amônia. Desse modo, a redução do consumo de combustíveis fósseis e o aumento da eficiência do processo produtivo passam, principalmente, pelo uso de tecnologias inovadoras associadas a queimadores e fornos. A substituição de motores elétricos antigos por motores de alto rendimento, conforme a padronização adotada no Brasil por meio do Selo de Eficiência Energética PROCEL/ INMETRO, é a melhor alternativa para reduzir a energia elétrica consumida no processo

produtivo desse segmento. Com o emprego de membranas de paládio na separação do hidrogênio, o consumo específico de energia pode chegar a uma redução de até 3,4 GJ/t de NH_3 produzida (Bajay, 2008a).

Ácido Fosfórico. Mais de 90% da produção nacional de ácido fosfórico é orientada para o segmento de fertilizantes, apesar de o Brasil se encontrar em desvantagem na produção de fertilizantes fosfatados pelo fato de a concentração de fósforos no seu minério ser muito baixa (entre 5% e 15%), em comparação com a encontrada em outros países (cerca de 36%). Essa desvantagem impõe a necessidade não só de desenvolvimento de tecnologias de concentração do minério de fósforo nacional, como de eliminação da alta concentração de impurezas presente no minério brasileiro. O processo mais amplamente utilizado hoje no mundo é o de "flotação", que permite a concentração de fluorapatita entre 70%-80% no concentrado fosfástico. A eficiência global do processo de aproveitamento do fósforo permanecem entretanto, abaixo dos 85%, o que faz com que a obtenção do ácido fosfórico ou do seu produto final, os fertilizantes simples, não ultrapasse os 30% de aproveitamento (Dias; Fernandes, 2006).

A indústria de intermediários ganhou muito com o desenvolvimento da tecnologia de flotação. Entretanto, como todo processo industrial, essa tecnologia possui desvantagens no que respeita aos impactos ambientais. Ela trabalha com a adição de produtos químicos na água e gera como subproduto o gesso. O descarte desses resíduos no Brasil é regulado pela Lei nº 9.443 de 1997, conhecida como a "Lei das Águas". A norma legal exige que não só o gesso seja disposto adequadamente em depósitos, como os efluentes líquidos e gasosos oriundos da obtenção do ácido fosfórico sejam tratados.

Síntese. As tecnologias inovadoras acima mencionadas buscam minimizar os vários problemas técnicos, energéticos e ambientais enfrentados pelo segmento de fertilizantes, como mostrado na Figura 3 a seguir. Para tanto, contemplam desde a melhoria dos processos produtivos e a redução do consumo de energia e água, até a redução da geração de rejeitos industriais e o aumento de eficiência na aplicabilidade e absorção dos fertilizantes no solo. Tanto instituições de pesquisa como o setor privado vêm trabalhando no sentido de melhorar o processo produtivo dos fertilizantes e seus intermediários. Resta, contudo, um longo caminho percorrer, no âmbito tanto nacional quanto mundial, para atingir a sustentabilidade com patamares mais elevados de produtividade, eficiência técnica e energética, redução de consumo de água e geração de rejeitos de processo com a máxima mitigação dos impactos ambientais.

FIGURA 3

Matriz de Tecnologias Inovadoras para o Setor Químico – Fertilizantes

Magnitude dos Impactos sobre o Processo Produtivo

Tecnologia	Maturidade da Tecnologia	Redução do Consumo de Energia	Redução do Consumo de Água	Redução da Geração de Resíduos	Redução da Emissão de GEEs	Aumento da Competitividade
Processo por rota nítrica						
Mistura a seco da rocha fosfática com fertilizantes solúveis						
Aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de fertilizantes						
Processo Humifert						
Ácido sulfúrico – processo de oxidação						
Ácido sulfúrico - Planta co-geradora integrada						
Transformação de uréia líquida em sólida						
Ácido fosfórico – flotação						
Amônia – processo HEBER						

Legenda: Magnitude do impacto - Alto; Médio; Baixo; Não se aplica.

3.3. Metais Não Ferrosos

O segmento de metais não ferrosos, que engloba alumínio, cobre, cromo, manganês, níquel e zinco, entre outros metais, é altamente intensivo em energia. Todavia, ele conta com estas quatro tecnologias que apresentam maior potencial de redução de custos, melhoria na produtividade e qualidade, redução de emissões e consumo energético: (i) o Processo de *Near-Net-Shape Casting*, (ii) as reformas em células de redução, (iii) as tecnologias de reciclagem, e (iv) os ânodos e cátodos.

O Processo de *Near-Net-Shape Casting*. A substituição quase total do antigo processo de produção de placas através do lingotamento convencional mais laminação desbastadora pelo lingotamento contínuo tem sido praticamente inevitável, dadas as melhores características de qualidade e os menores custos proporcionados por essa nova rota. Nesse sentido, **n**ovos processos têm sido desenvolvidos nos últimos anos com o objetivo de otimizar as propriedades de ligas metálicas produzidas por lingotamento contínuo. Um dos processos em desenvolvimento é o da solidificação das placas finas com redução da espessura quando o seu núcleo ainda está na fase líquida (*Near-Net-Shape Casting*). Trata-se de uma nova tecnologia que integra a fundição e laminação a quente do alumínio em um único processo, reduzindo, assim, a necessidade de voltar a aquecer o lingote de alumínio antes de laminar. Em consequência, o consumo de energia desse processo é significativamente menor que o do processo atual, em que várias etapas são eliminadas

desde o preaquecimento. Estima-se que a economia de combustível é de 0,4 MBtu/t (0,5 GJ/t de alumínio laminado a quente), e a economia de energia elétrica, de 20 kWh/t.

O processo acima assinalado ainda precisa superar alguns desafios técnicos relacionados com o funcionamento das máquinas *thin strip casting* com ligas mais resistentes. No curto prazo, há oportunidades significativas para tiras e chapas finas (Martin et. al, 2000).

Reformas em Células de Redução. Não apenas uma nova geração de tecnologias de fundição de alumínio está sendo desenvolvida (ânodos inertes, por exemplo), com também se conta com uma série de tecnologias que poderiam melhorar significativamente as atuais células de redução de alumina em alumínio em operação e baixar o consumo de energia elétrica. Essas opções estão voltadas principalmente para a melhoria da eficiência da célula atual (ou seja, aproximar o espaçamento ânodo-cátodo) e a redução das perdas de calor. As opções incluem materiais de melhor condutividade para o ânodo, revestimento do chão, aumento do isolamento dos fornos, controles avançados, melhor concepção dos componentes elétricos e melhorias no banho químico. Outras tecnologias melhoradas incluem modelagem, controle do processo por redes neurais, sensores contínuos e análise do sinal de tensão (Martin et. al, 2000). Vários estudos têm documentado reduções potenciais de 14% a 16%, entre as melhores e as piores práticas, em modernas células de fundição.

Além de melhorias no consumo de energia, a modernização tecnológica da célula existente também pode reduzir significativamente os custos de produção (através do aumento da produtividade em até 30%) e diminuir os custos de substituição do ânodo. Nos Estados Unidos observou-se uma redução média de 10 dólares/tonelada de alumínio com o funcionamento das novas instalações das células e sua manutenção.

Tecnologias de Reciclagem. Como a procura por produtos reciclados de alumínio é grande, novas tecnologias que ajudam a melhorar a recuperação ou a transformação de sucata ou ajudam a reduzir a utilização da energia na preparação e fusão de sucata surgiram nos últimos anos

Uma parte crucial do processo de reciclagem de alumínio é a remoção de orgânicos (como petróleo, borracha, plásticos, vernizes e tintas) a partir da sucata de alumínio. Esse processo, denominado "decoating", tem grande impacto tanto na qualidade final do alumínio reciclado quanto na utilização da energia e nas emissões geradas durante o processo. A fim de melhorar o processo tradicional de "decoating", foi desenvolvido nos Estados Unidos um modelo novo de forno, denominado IDEXTM, que reduz em 41% a utilização da sua energia, ao mesmo tempo em que melhora a qualidade dos produtos e aumenta a produtividade do metal em até 1% (Martin et. al, 2000).

Outra tecnologia é o *Vertical Flotation Melter* (VFM), um processo avançado de refusão que é energeticamente eficiente e ambientalmente amigável. Ele ajudará a indústria de alumínio a cumprir metas de desempenho energético e ambiental. Essa tecnologia também se aplica a outras indústrias, como as de recipientes de vidro, fibra de vidro e aço.

Ânodos e Cátodos. Cátodos umedecidos e ânodos inertes apresentam, potencialmente, vantagens significativas sobre as células utilizadas atualmente na produção mundial de alumínio, por possibilitarem uma redução de 15% a 30% na energia necessária para produzir esse material. A substituição do ânodo inerte de carbono convencional elimina, adicionalmente, as emissões de GEEs associadas à produção de alumínio primário. Todavia, a adoção desses eletrodos avançados em larga escala é prejudicada pela rápida corrosão, particularmente do cátodo, quando se opera a uma temperatura convencional de 960°C.

As células de eletrólise a baixa temperatura (LTE), que operam a cerca de 200°C, uma temperatura muito inferior à convencional, oferecem um ambiente mais adequado para eletrodos avançados. Pesquisadores das empresas norte-americanas Argonne National Laboratory e Noranda Falconbridge conseguiram desenvolver um novo processo produtivo, ainda em fase de teste, que baixa em quase 300ºC a temperatura em que o alumínio é produzido. Seu objetivo é substituir os ânodos de carbono, que se desgastam continuamente, por outros, mais duráveis, desde que capazes de baixar a temperatura da reação, a fim de otimizar o desempenho das células eletrolíticas. Os pesquisadores descobriram que podem substituir os ânodos de carbono, que se desgastam continuamente, por outros, mais duráveis, desde que consigam baixar a temperatura da reação. Uma temperatura mais baixa abre a possibilidade de consideração de outros materiais (a exemplo de uma liga de alumínio e bronze) para o ânodo. Além de tornar o processamento do alumínio mais barato, o novo processo libera oxigênio ao invés do dióxido de carbono e perfluorcarbono, dois gases que causam o efeito estufa (Inovação, 2009).

Síntese. As novas tecnologias orientadas para o segmento de metais não ferrosos, com ênfase no alumínio, possibilitam, sobretudo, uma gestão energética mais eficiente dos processos, como visto na Figura 4. Estudos para o desenvolvimento de novas ligas e o aumento da utilização do alumínio também vêm evoluindo no setor.

FIGURA 4

Matriz de Tecnologias Inovadoras para o Setor de Não-Ferrosos – Alumínio

Magnitude dos Impactos sobre o Processo Produtivo

Tecnologia	Maturidade da Tecnologia	Redução do Consumo de Energia	Redução do Consumo de Água	Redução da Geração de Resíduos	Redução da Emissão de GEEs	Aumento da Competitividade
Processo Near Net Shape Casting						
Reformas em células de redução						
Tecnologias de reciclagem						
Ânodos e Cátodos						

Legenda: Magnitude do impacto - Alto; Médio; Baixo; Não se aplica.

3.4. Cimento

É crescente a incorporação de tecnologias inovadoras em matéria de TI em plantas de cimento. Várias etapas do processo já alcançaram níveis elevados de automação, a exemplo da hidratação da cal, da moagem e da britagem de pó de calcário, bem como dos sistemas supervisórios dos processos remotos. A integração de equipamentos dos sistemas produtivos, aplicando-se Controladores Lógicos Programáveis "high techs", com equipamentos de laboratório e emissão de relatórios, tem possibilitado ganhos significativos de produtividade, além do controle total do processo em tempo real.

Diversos equipamentos de britagem e moagem também têm evoluído bastante em termos tecnológicos, aumentando a eficiência global das operações. Incluem-se nesse caso os britadores de eixos dentados e os britadores de impacto com eixo vertical. Moinhos autógenos e semiautógenos são amplamente empregados em grandes plantas, por serem maiores e mais eficientes, o que permite aumentar a sua potência instalada. Com relação aos fornos de clínquer, a introdução de preaquecedores e precalcinadores reduz o consumo energético nos processos de produção de clínquer-cimento

Novos processos produtivos, como o *Cement Kiln Dust* (CKD), vêm sendo propostos como tecnologias alternativas ao processo tradicional de produção de cimento. Por meio deles, a totalidade dos resíduos do forno são reciclados em outros fornos, o que reduz consideravelmente as emissões de CO_2 (Huntzinger e Eatmon, 2008).

A tecnologia inovadora do coprocessamento de resíduos na produção de clínquer tem utilizado matérias-primas e combustível fóssil (*blend*) que introduzem um aporte extra dos elementos traços presentes na composição, com isso enriquecendo seletivamente o clínquer coprocessado. A qualidade ambiental do clínquer portland coprocessado deve abranger a sua propriedade de reter elementos traços em solução sólida, a manutenção da integridade das relações texturais e a garantia da imobilidade de componentes tóxicos no produto final, através de um controle sistemático dos clínqueres e também dos cimentos (Universia, 2009).

As plantas brasileiras de cimento estão adotando tecnologias inovadoras que contemplam as melhores tecnologias e técnicas primárias de otimização e controle do processo disponíveis, bem como sistemas gravimétricos de alimentação de combustíveis sólidos e sistemas de gestão da energia. Essa incorporação resulta em melhoria da qualidade, menores custos e redução dos consumos energéticos e das emissões para a atmosfera. As tecnologias inovadoras para a redução de emissões de NO_x são uma combinação de técnicas primárias e de queimadores de baixo NO_x denominada combustão por etapas escalonadas e redução seletiva não catalítica (SNCR). O nível de emissões com a incorporação tecnológica está situado entre 500 e 1.200 mg NO_x/Nm^3, sendo de 500-800 mg NO_x/Nm^3 para instalações novas e de 800–1.200 mg NO_x/Nm^3 para instalações existentes.

A utilização de combustíveis alternativos nos fornos de clínquer tem sido um dos maiores desafios da indústria de cimento no que respeita à redução do consumo de energia e dos custos ambientais. Um novo procedimento para a queima de combustíveis alternativos

consiste em recolocações parciais de combustível – aproveitamento de restos cerâmicos, de matérias-primas ou mesmo de clínquer. Tal tecnologia explora a reatividade e a queima de misturas cruas do cimento e resíduos do forno, combinando com os restos cerâmicos (vermelhos ou brancos) que alimentam esse forno, e mostra-se eficiente ao fornecer uma qualidade mineralógica de clínquer aceitável. Outro processo de pirólise de combustíveis alternativos, com bom aproveitamento energético, envolve o aproveitamento de resíduos de alumínio baseado na transferência de calor entre materiais dentro do forno (Marias, 2005).

No Brasil, das unidades cimenteiras destinadas à moagem e fabricação do cimento, apenas 32 estão autorizadas por órgãos ambientais estaduais para realizar o co-processamento. A geração anual de resíduos industriais é estimada em 2,7 milhões de toneladas, 800 mil das quais são processadas na indústria de cimento. Várias tecnologias inovadoras têm sido desenvolvidas para tratar a incineração de resíduos em fornos de maneira adequada e segura e têm apresentado vantagens nas adições, substituindo uma parte do clínquer. Todas as tecnologias visam à estabilização da mistura vis-à-vis os métodos tradicionais, à adequação dos níveis de hidratação, à compressibilidade adequada do material quando em utilização, à análise da lixiviação e à avaliação do impacto ambiental, bem como à garantia de elementos fundamentais da composição do cimento. Métodos como "tratamento das cinzas voláteis", "mistura crua alternativa com resíduos industriais" e "*Remelting* – tratamento de escórias", já estão sendo utilizados na indústria do cimento.

A produção de cimento baseada no uso de carbonato de magnésio em substituição ao carbonato de cálcio pode ser uma tentativa promissora de diminuir os impactos da indústria do cimento no meio ambiente, uma vez que esse cimento absorveria até 400 kg de CO_2 em meses e não em séculos, como o faz o cimento tradicional. Além disso, sua fabricação exigiria temperaturas da ordem de 600ºC contra os cerca de 1.200 ºC necessários para o cimento *portland*. A gestão de energia também tem destaque nessa indústria, com aplicação conjunta de técnicas de recuperação do calor de caldeiras, bem como de novos queimadores de fornos (Observatório de Energia, 2009). Os motores elétricos também são uma prioridade nesse setor, com a substituição por máquinas de alto rendimento.

Síntese. A sustentabilidade do setor depende fortemente das questões ligadas à queima de combustíveis alternativos e ao coprocessamento de materiais e resíduos para a obtenção dos diversos tipos de cimento (Figura 5). O esforço em ações e projetos inclui o estabelecimento de diretrizes para a utilização de combustíveis e matérias-primas, conferindo-se ao produto e à própria indústria a sustentabilidade e competitividade desejada. Outro ponto de interesse é o estabelecimento de processos de avaliação do impacto ambiental e social que permitam às empresas envolver a comunidade e buscar a integração de ações que favoreçam medidas para sua permanência no longo prazo. A transferência e difusão de conhecimentos tecnológicos e serviços por meio de investimentos em P&D e a participação junto aos centros de pesquisa constituem uma demanda fundamental para a solução de problemas ligados à indústria do cimento.

FIGURA 5

Matriz de Tecnologias Inovadoras para o Setor de Cimento

Magnitude dos Impactos sobre o Processo Produtivo

Tecnologia	Maturidade da Tecnologia	Redução do Consumo de Energia	Redução do Consumo de Água	Redução da Geração de Resíduos	Redução da Emissão de GEEs	Aumento da Competitividade
Britagem – VSI						
Britagem – moinhos autógenos e semi-autógenos						
Clinquerização – via seca com preaquecedor e precalcinador, 5 estágios						
Clinquerização – via seca com preaquecedor e precalcinador, 6 estágios						
Moagem do clínquer – CKD						
Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer						
Controle de emissões de GEEs						

Legenda: Magnitude do impacto - Alto; Médio; Baixo; Não se aplica.

3.5. Celulose & Papel

3.5.1. Celulose

Certas tecnologias são consideradas indispensáveis a qualquer nova planta de papel e celulose. Dentre elas, cabe destacar o cozimento *kraft* modificado com pré-impregnação dos cavacos, deslignificação com oxigênio, branqueamento ECF e TCF, lavagem eficiente da polpa, uso de caldeira de recuperação do tipo "*low odor*", evaporação com multiestágios para sólidos no licor preto concentrado, tratamento secundário ou terciário no efluente, uso de biomassa em substituição a combustíveis fósseis, caldeira de força de leito fluidizado, sistema de destilação de condensados e queima dos gases voláteis, entre outras. Além disso, por conta das pressões ambientais e dos mercados que exigem produtos "verdes", novas tecnologias têm surgido a fim de possibilitar uma produção mais limpa e viável economicamente, bem como de prevenir, reusar, segregar, fechar circuitos e atacar o problema na origem e não no "fim de tubo". Existem hoje suficientes tecnologias inovadoras que podem ser introduzidas tanto em plantas novas como no *retrofit* de fábricas em operação.

Uso de TI em controle de processos. A utilização da TI e de suas derivações tanto em software quanto em hardware, acopladas ou não em equipamentos, é intensa no controle de processos industriais empregados em plantas integradas de papel e celulose. A área de utilidades em planta integrada faz uso de sistemas inteligentes de controle de equipamentos, como caldeiras e digestores, que além da complexidade para sua operação exigem um alto grau de confiabilidade em termos de segurança.

Nas plantas integradas, a produção de eletricidade baseada na biomassa é feita a partir das caldeiras auxiliares de recuperação. Nesse contexto, a TI faz o gerenciamento local e remoto da produção de vapor, em regime de paridade térmica, utilizando, em geral, turbinas de contrapressão e, com menos frequência, turbinas de extração-condensação. O contínuo aumento de escala das caldeiras de recuperação tem sido possível com a incorporação da TI embarcada em tecnologias inovadoras. Quanto a esse alto grau de tecnologia, se por um lado ele permite o aumento da complexidade das caldeiras e instalações periféricas – lavadores de gases, colunas de destilação, queimadores de gases e incineradores -, pelo outro, acaba por proporcionar ganhos de produtividade e sustentabilidade dotados de um grau de segurança que influenciará as apólices de seguro. Além disso, nessas novas configurações, aumenta-se a recuperação de produtos químicos que seriam perdidos e diminui-se o impacto ambiental das instalações, tornando as plantas mais harmoniosas com as comunidades do seu entorno.

São inúmeras as tecnologias baseadas na TI incorporadas na área de utilidades visando à melhoria da performance nas caldeiras de recuperação. A lavagem e incineração dos gases do tanque de dissolução na caldeira e o sistema *multilevel* de ar de combustão que proporcionam o abatimento de emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos reduzidos de enxofre (TRS) são exemplos. A adoção de tecnologia que utiliza mais de quatro níveis de ar na fornalha tem proporcionado bons resultados em termos de eficiência energética e ambiental, resultando na conciliação de emissões de CO e NO_x, com níveis abaixo de 120 ppm.

Controles evaporativos possibilitam o aumento do teor de sólidos do licor negro, o incremento da troca térmica e a eficiência das caldeiras a partir da incorporação de reaquecedores e de preaquecedores, de novos materiais e da modulação do ponto de fusão das cinzas.

Sistemas de monitoramento e detecção de vazamentos baseados em tecnologias inovadoras e derivados do uso de TI possibilitam a execução de balanços térmicos, traceamento químico e monitormento acústico, visando a evitar sinistros relacionados com o contato *smelt*/água – riscos de explosão durante as operações -; e, ainda, vazamentos de água em tubos da região inferior da fornalha, em consequência de corrosão ou de trincas na tubulação produzidas por ataque químico e estresse térmico ou mecânico do material.

Finalmente, merece destaque o Controle Preditivo Multiváriavel Avançando (CPMA), uma tecnologia inovadora e passível de sua implementação em processos de polpação. Por meio dessa tecnologia, pode-se prever o comportamento da planta baseado em modelos heurísticos, a fim de que sejam adotadas ações preventivas e corretivas imediatas, com isso assegurando a otimização da planta em termos da maximização da produção de celulose, racionalização na utilização de produtos químicos e minimização dos custos energéticos e do uso de água por tonelada de celulose produzida (Lopes, 2008).

Tecnologias de Cogeração. Uma das tecnologias inovadoras usadas em escala comercial para elevar o rendimento dos processos de cogeração em plantas integradas é o *Condensing Extraction Steam Turbine Cycle*, que proporciona o aumento de pressão nas caldeiras (60 a

80 bar) e a introdução de turbinas de extração-condensação (Velásquez, 2006). Apesar das perdas em consequência da condensação, a maior potência produzida pela turbina, graças à pressão de saída mais baixa, aumenta o rendimento do processo, cujo vapor é extraído em pressões intermediárias (4 e 12 bar), conforme se faça necessário.

A gaseificação é a tecnologia tido como mais promissora no caso dos sistemas de recuperação e geração de energia, por eliminar riscos de explosão, diminuir os efeitos ambientais, reduzir os custos e aumentar o aproveitamento energético do licor negro. As turbinas com injeção de vapor (*Steam Injected Gas Turbine* - STIG) têm um alto rendimento e já se encontram em fase de comercialização, representando uma alternativa para a utilização de turbinas a gás, em que parte do vapor produzido na caldeira de recuperação, a partir dos gases de exaustão, é injetado na câmara de combustão da turbina a gás.

Outras alternativas tecnológicas também utilizam turbina a gás, porém em outras configurações, levando em conta o fato de que não só a gaseificação do licor negro produz gás a elevada temperatura (superior a 1000 °C), em comparação com a temperatura do vapor gerado em caldeiras (500°C a 550°C), como a eficiência das turbinas a gás em ciclo combinado é maior do que a eficiência das turbinas a vapor. O sistema de gaseificação do licor negro acoplado a uma turbina a gás é chamado de tecnologia *Biomass Integrated Gasifier/Gas Turbine* (BIG-GT). Para que a produção de eletricidade seja eficiente, os gases de exaustão da turbina a gás devem ser aproveitados em sistemas de cogeração, na produção de vapor para alimentar a turbina de vapor e constituir o ciclo combinado, tecnologia *Biomass Integrated Gasifier/Gas Turbine Combined Cycle* (BIG-GTCC).

A tecnologia BIG-GT é a que tem maior probabilidade de se tornar comercial. Todavia, ainda existem problemas a serem equacionados no tocante à limpeza do gás, a modificações na câmara de combustão da turbina a gás e à alimentação nos gaseificadores pressurizados.

Tecnologias ECF e TCF de Branqueamento. As plantas de celulose trabalham com duas tecnologias: a Elemental Chlorine Free (ECF), que emprega dióxido de cloro no processo de branqueamento da polpa, e a Total Chlorine Free (TCF), que não utiliza compostos de cloro como agentes oxidantes. Ambas possuem impacto ambiental, pois utilizam grandes quantidades de água e de reagentes químicos. Dependendo dos químicos utilizados, das suas dosagens e dos residuais nos filtrados, do fechamento de circuitos ou do tratamento dos efluentes, as duas tecnologias poderão ter maior ou menor impacto.

Qualquer das tecnologias inovadoras citadas, visando ao branqueamento da celulose, apresenta vantagens e desvantagens. As pesquisas realizadas pelo setor caminham no sentido de buscar um misto de ECF e TCF. Com isso, a expectativa é que surjam, no médio prazo, tecnologias de catalisadores (molibdato, complexos de manganês, polioxometalatos, etc.) de preservação da alvura (estágio final de peróxido de hidrogênio em condições adequadas de pH e temperatura). Os impactos ambientais deverão ser ainda mais minimizados e o consumo de água reduzido. Nesse particular, as lavagens entre estágios desempenham um papel importantíssimo, e as prensas lavadoras ganharam o status de "melhor tecnologia disponível" para esse serviço. Quanto mais se aproximar da tecnologia TCF, ou quanto menor for o uso do dióxido de cloro, mais fácil será o fechamento dos

circuitos de águas na linha de fibras. Isso sem recorrer a tecnologias de "final de tubo", como a nanofiltração (tecnologia de membranas).

O ideal em relação à qualidade ambiental, segundo especialistas, seria uma redução no nível de alvura dos papéis, e consequentemente na celulose, a partir do entendimento entre os principais atores envolvidos: produtores, ambientalistas e consumidores. Os impactos ambientais seriam menores, os custos de produção diminuiriam e o próprio preço do papel poderia baixar para os consumidores finais, tudo de forma sustentada.

Fechamento de circuito. Os fechamentos de circuitos, que pressupõem a reciclagem máxima de água de processo da planta, vêm ocorrendo com maior intensidade, dado que novas tecnologias inovadoras para evitar o acúmulo de contaminantes nas plantas também estão sendo criadas. Já se consegue produzir celulose branqueada de eucalipto com geração de cerca de 20m^3 de efluentes/t de celulose final. Fecha-se o sistema de águas com a incorporação de novas tecnologias que impedem o acúmulo de cloretos, potássio, oxalatos e *pitch* nos sistemas de fabricação, inclusive com ganhos energéticos.

Consegue-se, em média, economia de 0,5% (603 kWh) no consumo de eletricidade e 2% a 3% de vapor (máximo 5,15 toneladas vapor). O fechamento de circuitos possibilita maior recuperação e conservação de energia, maior eficiência operacional e maiores escalas de produção. Como resultado, o impacto ambiental diminui, bem como a necessidade de investimentos, resultando em custos de produção ainda mais competitivos.

Uma segunda opção para minimizar o uso de água nos processos industriais é o aumento da incorporação de tecnologias inovadoras que possibilitem maior consistência da massa nos principais estágios do processo. Essa possibilidade requer novos dimensionamentos para os sistemas de bombeamento, inclusive o controle de remotos baseado em controles lógicos programáveis e inversores de frequência. Plantas com tecnologias inovadoras em processos com alta ou média consistência ainda não resultaram em aplicações no Brasil.

Uma terceira opção para que a fabricação de papel minimize o uso de água é resultante de um projeto de P&D da Universidade de Tecnologia de Helsinque, através da tecnologia *Air Dynamic Forming* (ADF). Com esse sistema é possível dispersar a massa em fibras úmidas de madeira em uma corrente de ar, eliminando-se o uso da água nessa etapa do processo de fabricação do papel. Com essa tecnologia inovadora, todo o transporte de fibras no circuito de aproximação, bem como a formação ocorrem por fluxo de ar, em um sistema pneumático.

O fechamento de circuito pode ser alavancado com a utilização da tecnologia de micropolímeros, que possibilita o equilíbrio na retenção e formação da folha desejada, especialmente em sistemas com altos teores de carga mineral que estejam produzindo papéis ou cartões em equipamentos de alta velocidade e grande efeito de cisalhamento. Nesse contexto, a tecnologia de sapatas (*shoe presses*) constitui um avanço, quando empregada em lugar da tecnologia por impulso (*impulse drying*), uma vez que, com a associação da tecnologia de sapatas ao uso de micropolímeros, consegue-se um teor de umidade da folha de papel de 38%, ou menos, antes de ela entrar na seção de secagem evaporativa.

Tecnologia da Biorrefinaria Florestal. Uma biorrefinaria é uma estrutura que integra processos de conversão de biomassa e equipamentos para produzir combustíveis, energia e produtos químicos a partir da biomassa. O conceito de biorrefinaria é análogo ao de uma refinaria de petróleo, que produz múltiplos combustíveis e produtos a partir do petróleo.

A biorrefinaria tem sido apontada como o caminho tecnológico mais promissor para a criação de uma nova indústria baseada na biomassa (virgem ou resíduos). A partir de matérias-primas fibrosas, podem-se obter produtos químicos, plásticos, bioetanol, biogás, calor, eletricidade, carvão e outros combustíveis. As biorrefinarias permitem a produção de produtos com maior valor agregado, a partir de tecnologias inovadoras sustentadas e de produtos flexíveis que utilizem os diferentes subprodutos e produtos intermediários do processo.

No caso do setor de papel e celulose, a proposta de uma biorrefinaria florestal contempla:

i. Processos de separação e conversão, intercambiáveis, ou seja, a possibilidade de que uma biorrefinaria seja utilizada com vários materiais derivados da biomassa;
ii. Biotecnologia desenvolvida no setor de papel e celulose que serve de alavanca na ampliação dos mercados e na criação de novas fontes de receita;
iii. Valorização de fibras celulósicas recuperadas e geração de lodos nas plantas das estações de tratamento de água (ETA);
iv. Sinergia com outros setores, como o agropecuário e o químico; e
v. Minimização de impactos ambientais com geração de emprego e renda.

3.5.2. Embalagens de Papel

No presente, as empresas de embalagens estão buscando a modernização de seu complexo produtivo com o auxílio da TI, que oferece amplos recursos de alta tecnologia e desempenho, englobando desde o controle eletrônico de luzes, temperatura e umidade, até o monitoramento em tempo real (*online*), por computadores, de todo o processo produtivo em que também controlam, por exemplo, a geração de resíduos e seu tratamento, o consumo de água e o tratamento de efluentes.

Em face da atual situação tecnológica do setor de embalagens de papel no Brasil, dos problemas que enfrenta e dos bons exemplos existentes da aplicação de tecnologias inovadoras na busca de melhoria do processo produtivo, excelência de qualidade e mitigação dos impactos gerados no meio ambiente, afirma-se que o País está preparado para os desafios que virão com os novos conceitos de sustentabilidade na produção.

Síntese. Por conta das pressões ambientais e dos mercados que exigem produtos "verdes", tecnologias inovadoras estão cumprindo o objetivo de possibilitar à indústria de papel e celulose uma produção não só mais limpa como economicamente viável. O foco consiste em prevenir, reusar, segregar, fechar circuitos e atacar o problema na origem e não no "fim de tubo". Existem hoje suficientes novas tecnologias inovadoras que podem ser introduzidas tanto em plantas novas como no retrofit de plantas em operação (Figura 6).

FIGURA 6

Matriz de Tecnologias Inovadoras para o Setor de Celulose e Papel

Magnitude dos Impactos sobre o Processo Produtivo

Tecnologia	Maturidade da Tecnologia	Redução do Consumo de Energia	Redução do Consumo de Água	Redução da Geração de Resíduos	Redução da Emissão de GEEs	Aumento da Competitividade
Uso de TI em controle de processos						
CPMA						
Tecnologia de co-geração						
Tecnologia ECF e TCF						
Tecnologia Micro Polímero						
Tecnologia ADF						
Evolução multi-estágios lodo negro						
Cadeia de recuperação low odor						
Tecnologia Long Nipe Press						
Biorefinaria florestal						

Legenda: Magnitude do impacto - Alto; Médio; Baixo; Não se aplica.

3.6. Cerâmico

Nos últimos 30 anos ocorreram grandes transformações no processo produtivo de revestimentos cerâmicos, graças principalmente à incorporação de tecnologias inovadoras relacionadas com os equipamentos, havendo-se conseguido resultados positivos em termos de produtividade, qualidade e otimização energética.

A área de TI, apesar de ainda ser incipiente no setor, já tem propiciado retornos como o incremento da flexibilidade e qualidade do produto final, aumentando a competitividade das empresas. A dificuldade em incorporar ao setor cerâmico o controle dos processos através da TI se deve ao fato de que esse setor trabalha com sólidos, e o nível de conhecimento existente sobre as operações unitárias que envolvem sólidos é ainda bastante limitado. O segundo aspecto que dificulta esse controle automático deriva da natureza estrutural do produto cerâmico, que exige numerosas e complexas características finais, tais como baixa porosidade e resistência ao desgaste. Um terceiro aspecto que dificulta a incorporação da automação nesse tipo de indústria é a ampla variedade de produtos que uma mesma empresa deve hoje fabricar (Gasch, 2007).

As diferentes operações unitárias que constituem o processo cerâmico, como a moagem, a secagem por atomização, a prensagem, etc., não são independentes. A execução incorreta de qualquer das etapas do processo afeta não só o desenvolvimento das etapas seguintes, mas também as características dos produtos intermediários (porosidade, permeabilidade,

etc.), bem como as dos produtos acabados. O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos deve ser considerado como um conjunto de etapas interconectadas que vão progressivamente transformando as matérias-primas em produtos acabados. Nesse sentido, a incorporação de tecnologias inovadoras para o controle automático dos processos industriais utilizados na fabricação de revestimentos cerâmicos não pode nem deve limitar-se às etapas individuais.

Na moagem, a principal dificuldade do controle automático é a seleção de elementos de medidas confiáveis da densidade e da viscosidade, dadas as exigentes condições industriais de operação. No momento, a medida da densidade industrial de suspensões pode ser considerada como um problema resolvido com o emprego dos densímetros de efeito Coriolis. A tendência do controle nessa etapa passaria futuramente pelo projeto de um sistema de controle avançado capaz de medir a densidade, a viscosidade e, inclusive, o resíduo. A incorporação de resíduo, ainda que tecnicamente possível, gera dificuldades cuja solução não está prevista no curto prazo.

Na secagem por atomização, a distribuição de tamanhos dos grânulos (DTG) determina a fluidez do pó, a qual incide no seu comportamento, fundamentalmente durante o preenchimento das cavidades da prensa. Gasch (2007) afirma que projetos desenvolvidos pelo Instituto de Tecnologia Cerâmica (Castela, Espanha) permitiram um importante avanço no controle das variáveis de temperatura especificadas dos gases e a umidade do pó atomizado, por meio de medidores de infravermelhos, juntamente com um coletor de amostra de pó atomizado. A DTG pode ser medida automaticamente. Cumpre, entretanto, ressaltar o elevado custo dos sensores e o fato de que, com o *design* atual dos atomizadores, e em particular das boquilhas, não se pode facilmente modificar a distribuição granulométrica.

Para o controle automático da secagem podem ser utilizadas sondas de temperatura que são introduzidas no secador e fornecem dados sobre a curva de temperatura dos gases ou a superfície das peças. A informação da curva de temperatura dentro de um secador permite detectar zonas onde a secagem é excessivamente lenta, com a consequente perda de rendimento e a elevação do consumo de energia, ou excessivamente rápida, suscitando problemas de trincas e de qualidade do revestimento cerâmico. A temperatura na saída do secador só é medida por pirômetros óticos dotados de um indicador em que o operário pode ler o grau instantâneo da temperatura. Ressalte-se que um software que permite combinar a informação sobre a temperatura média da peça na saída do secador com a sua posição dentro dele foi desenvolvido.

Na operação de prensagem, nas plantas de revestimentos, a medida da densidade aparente é realizada, via de regra, de forma manual ou semiautomática, mediante o procedimento de imersão em mercúrio. Emprega-se, por exemplo, o ultra-som para esta finalidade com resultados muito promissores (Gasch, 2007). Além disso, vem-se incorporando a instalação de sensores extensiométricos na punção da prensa, a fim de medir a distribuição da pressão no suporte durante a sua compactação, juntamente com sensores infravermelhos destinados a determinar a umidade do pó.

Na etapa da esmaltação e decoração podem ser incorporadas ao processo industrial células de carga, acopladas ou não, com um medidor de vazão eletromagnético que registra a vazão do esmalte aplicado e corrige os desvios, atuando sobre uma válvula motorizada.

A etapa da queima, em que ocorre o maior consumo de energia térmica, tem na distribuição da temperatura longitudinal e transversal, na pressão e na composição dos gases as principais variáveis a serem controladas no forno. No controle do processo da queima, utiliza-se o rolo multitermopar, que permite medir os perfis de temperatura de forma continua.

O estado da arte da incorporação de tecnologias inovadoras nas diferentes etapas do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos está resumido na tabela abaixo.

FIGURA 7

Tecnologias Inovadoras em Revestimentos Cerâmicos

Etapa	Variáveis medidas	Medida*	Tecnologia de medida contínua	Variável manipulada	Manipulação*	Grau de implantação
Moagem	Densidade de suspensão	A	Sensor de efeito Coriolis	Vazão de água	A	Baixo
	Viscosidade da suspensão	A	Sensor vibrante	Vazão de defloculante	M	-
	Resíduos	M	-	-	M	-
Atomização	Vazão da suspensão	A	Sensor eletromagnético	Pressão das bombas	M	-
	Umidade do pó atomizado	A	Sensor infravermelho	Válvula de queimador - temp. gases	A	Médio
Prensagem	Umidade do suporte	A	Sensor infravermelho	Pressão máxima	A	Baixo
	Densidade aparente do suporte	M	-	Pressão máxima	M	-
Secagem	Temperatura do suporte	A	Pirômetro óptico	Temperatura - distribuição dos gases	M	-
	Umidade do suporte	A	Sensor infravermelho	Temperatura dos gases - ciclo de secagem	M	-
Esmaltação	Vazão do esmalte	A	Sensor eletromagnético	Abertura da válvula	A	Baixo
	Densidade do esmalte	M	-	Quantidade de água	M	-
	Vicosidade do esmalte	M	-	Qtde água-aditivos	M	-
Decoração	Aspecto visual da peça decorada	A/M**	Câmara CCD	Várias	M	-
	Várias	M	-	Várias	M	-
Queima	Dimensões da peça	A	CCD Linear	Temperatura - outras	M	-
	Curvatura da peça	A	Telêmetros laser e ultrasons	Temperaturas - outras	M	-
	Aspecto visual da peça	M	-	Temperatura - ciclo-ar-queimadores	M	-
Classificação	Dimensões e curvatura da peça	A	CCD linear e telêmetros	-	A	Alto
	Aspecto visual da peça	A/M***	Câmaras CCD	-	A	Médio

* A: Automática: M: Manual; ** a inspeção automática na linha de decoração se encontra em uma fase incipiente de desenvolvimento; e *** em alguns casos a classificação automática não é completamente confiável

Fonte: Gasch (2007).

A incorporação de tecnologias inovadoras, com vistas à busca de novos usos e aplicações que permitam ampliar os mercados atuais para os produtos cerâmicos, bem como a necessidade premente de permanecer nesses mercados, tem sido outra estratégia das plantas de revestimentos cerâmicos. Além das cerâmicas avançadas para aplicações especiais constata-se a incorporação de tecnologias inovadoras para aprimorar e agregar valor aos produtos tradicionais e para os resíduos de processo. No caso dos produtos tradicionais, vale destacar três opções tecnológicas, a saber:

i. Revestimentos com novas coberturas catalíticas que podem ser ativados por radiação ultravioleta e hidrofóbica. Tem-se a formação de superfícies aptas a destruir matéria orgânica que nelas se deposita ou que as toca, a aumentar a molhabilidade superficial e a facilitar o escorrimento de água que é depositada, natural ou artificialmente, nessas superfícies;

ii. Revestimentos com reguladores de umidade ambiente. Esse revestimento apresenta pequenos poros aparentes e com distribuição controlada que, juntamente com a natureza específica da sua composição, permitem a troca de umidade com o ambiente circundante; e

iii. Revestimentos equipados com elementos funcionais. Nesse caso, os avanços da TI por meio da tecnologia de sensores e da miniaturização podem ser acoplados com relativa facilidade aos revestimentos cerâmicos, proporcionando-lhes funcionalidades novas e não-tradicionais. Esses sensores podem ser instalados em peças de variadas formas e gerar sinal elétrico que pode ser transmitido para vários sistemas, como iluminação, sistemas acústicos ou de outra natureza, telemetria com transmissão via ondas de rádio, etc. (Berto, 2008).

Merece destaque a utilização da tecnologia Hot Isostatic Pressing (HIP) no setor cerâmico, posto que possibilita a produção de um novo produto de alto valor agregado a partir de resíduos gerados durante a fabricação de revestimentos. A tecnologia da compactação isostática a quente é uma técnica de metalurgia do pó para produção de pré-formas ou peças. Na indústria cerâmica, essa tecnologia vem sendo adotada na fabricação de cerâmica celular, que tem ampla aplicação na indústria de metais fundidos, na petroquímica, na eletrônica e na biomedicina, além da construção civil, como isolantes térmicos, isolantes acústicos, preenchimentos leves para lajes e, ainda, por se tratar de uma cerâmica resistente a chamas. Na fabricação da cerâmica celular usam-se rejeitos obtidos no tratamento de efluentes de uma planta cerâmica de revestimentos -- o caso do carbeto de silício. Nessa tecnologia empregam-se pós atomizados com gás inerte e prensados isostaticamente a quente, em temperatura e pressão da ordem de 1100ºC e 100 MPa, respectivamente. No Brasil, o uso dessa tecnologia inovadora ainda é limitado, não obstante a existência de expertise nacional em centros de pesquisas, como é o caso do Departamento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

3.7. Alimentos e Bebidas - Bioetanol

Para a identificação de tecnologias inovadoras na indústria sucroalcooleira, esta deve ser analisada em um contexto de integração caracterizado por um processo complexo, que conta com sistemas de evaporação, colunas de destilação e rede de trocadores de calor. Investimentos em sistemas modernos de cogeração têm propiciado um aproveitamento energético mais eficiente do bagaço de cana. O consumo de energia térmica (uso de vapor) deve, entretanto, integrar-se melhor ao processo de produção de bioetanol, possibilitando maior aproveitamento da energia das correntes do processo, evitando o consumo de vapor e minimizando a necessidade de água de refrigeração.

Vários países têm voltado a sua atenção para a produção e consumo de biocombustíveis. Tal interesse decorre, fundamentalmente, de fatores como a necessidade de mitigação das emissões de dióxido de carbono, principal componente dos GEEs, das oscilações no preço do petróleo e do desenvolvimento da agroindústria. Todavia, há questionamentos sobre o real benefício dos biocombustíveis. Por um lado, ataca-se a eficiência que lhes é atribuída na mitigação de emissões dos GEEs. Pelo outro, levantam-se dúvidas quanto à pressão sobre a oferta de alimentos, à perda de biodiversidade, aos riscos de redução da qualidade e da disponibilidade dos recursos hídricos e à queda da qualidade de vida da população afetada por essa indústria.

Questões como as acima apontadas levaram algumas nações, principalmente na União Européia, a estabelecer critérios de sustentabilidade aplicáveis aos combustíveis oriundos de biomassa (Nogueira et al, 2008). A partir desses critérios, estima-se que será criada, brevemente, uma certificação internacional para a produção de biocombustíveis. Isso mostra que a efetiva sustentabilidade da cadeia produtiva do bioetanol de cana de açúcar é um aspecto essencial para a consolidação do Brasil no mercado internacional e doméstico. Nesse contexto, revestem fundamental importância o desenvolvimento tecnológico e os programas de P&D que mostram que a produção de biocombustíveis somente se justifica se os impactos econômicos e ambientais forem favoráveis, quando comparados às outras fontes energéticas com fins similares, e se existirem benfeitorias reais para todos os atores envolvidos.

Em face desse cenário, é mister que haja frentes de pesquisa e geração de tecnologias inovadoras que abranjam desde o desenvolvimento genético de microrganismos, passando pela transformação comercial viável da biomassa lignocelulósica em bioetanol e aumentem a produtividade da conversão dessa biomassa em bioetanol em 40% relativamente aos padrões atuais da tecnologia de fermentação. Essas ações poderiam reduzir os impactos ambientais (menor uso de água e geração de resíduos) e chegar ao nível de otimização das plantas, inclusive com a incorporação de TI.

Encontram-se em estágio avançado os estudos de tecnologias inovadoras que permitem a utilização mais eficiente da cana como insumo industrial e energético. Existem claras oportunidades de emprego do bioetanol como insumo básico para a indústria petroquímica (ou alcoolquímica). À medida que toda a cana, com seus açúcares e fibras, se converte

em uma fonte de materiais de interesse passível de ser utilizada numa ampla gama de produtos em processos integrados e interdependentes, as usinas de bioetanol vão se inserindo, cada vez mais, no contexto das chamadas biorrefinarias. Todavia, quando se depara com questionamentos sobre o uso consuntivo de água pela indústria do bioetanol, vê-se que esse recurso natural começa a ter o seu devido equacionamento por conta da sustentabilidade propalada dos bicombustíveis.

A cultura da cana de açúcar no Brasil, tradicionalmente, não utiliza a irrigação. A água entra nas usinas com a cana (cerca de 70% do peso dos colmos) e com a captação para uso na indústria. A água captada é usada em distintos processos, com diferentes níveis de reutilização; uma parcela é devolvida aos cursos d'água, após os tratamentos necessários, e outra parte é destinada, juntamente com a vinhaça, à fertirrigação. A diferença entre as águas captada e lançada é a água consumida internamente (processos e distribuição no campo). Pesquisas estão sendo desenvolvidas no sentido de zerar o uso de água captada. Seu objetivo é levar a cabo todo o processamento industrial da cana, até a produção, com a água existente nos colmos.

Especificamente nas refinarias, com a racionalização do consumo da água (reutilizações e fechamentos de circuitos e algumas mudanças de processo, como a redução da lavagem da cana), a captação tem diminuído. Os circuitos fechados de água são os principais responsáveis pela queda no consumo, por permitirem o reuso da água. A lavagem da cana, por exemplo, é uma das etapas da produção que consome muita água. Há duas maneiras de reduzir o consumo da água nesse caso: uma é adotar o circuito fechado; a outra é, simplesmente, parar de lavar a cana. E, para que isso seja possível, é necessário outro avanço das usinas no sentido da proteção ao meio ambiente: a eliminação gradativa da queima da cana na colheita. A cana crua, obtida com a mecanização da colheita, não pode ser lavada porque há muita perda de açúcar no processo. Por isso, as usinas que já adotam a colheita da cana crua contribuem para o menor uso de água na produção.

Outras tecnologias inovadoras estão sendo pesquisadas e testadas em relação à hidrólise, aos novos sistemas de cogeração e à gaseificação do bagaço.

Hidrólise de resíduos lignocelulósicos. Nos últimos 20 anos, essa tecnologia tem sido proposta para atender ao mercado de combustíveis. Os principais programas de P&D são conduzidos nos EUA e na Europa, basicamente em escalas experimentais de produção, mas seu sucesso poderia transformar o bioetanol em um biocombustível passível de ser produzido em quase todas as regiões do mundo, aproveitando a alta disponibilidade de resíduos orgânicos de diversas fontes. Praticamente todos os resíduos de biomassa produzidos nas atividades agrícolas e industriais, e mesmo o lixo urbano, apresentam elevados teores de materiais lignocelulósicos.

As tecnologias para a obtenção de bioetanol com base em materiais lignocelulósicos envolvem a hidrólise dos polissacarídeos da biomassa em açúcares fermentescíveis e a sua posterior fermentação para a produção do bioetanol. Para executar essa tarefa, a hidrólise utiliza tecnologias complexas e multifásicas, com base no uso de rotas ácidas e/

ou enzimáticas para a separação dos açúcares e a remoção da lignina. Na tabela abaixo são apresentados dados dos principais resultados de estudos recentes sobre processos em desenvolvimento para a produção de bioetanol por hidrólise.

FIGURA 8

Comparação das estimativas de rendimentos
e custos para produção de bioetanol por meio da hidrólise

Referëncias	Processo	Rendimento (litro/t)	Custo da biomassa	Custo do etanol	Disponibilidade
Hamelinck et al. (2005)	SSF com pré-tratamento com ácido diluído	~300	3 €/GJ	0,98 €/litro	Curto prazo
	SSCF com pré-tratamento com explosão de vapor	~340	2,5 €/GJ	0,58 €/litro	Médio prazo
	CBP com termoidrólise	~400	€/GJ	0,39 €/litro	Longo prazo
Aden et al. (2002)	SSCF com pré-tratamento com ácido diluído	374	33 US$/t	0,28 US$/litro (preço mínimo)	Curto prazo
Wooley et al. (1999)	SSCF com pré-tratamento com ácido diluído	283	44 US$/t	0,38 US$/litro	Curto prazo
	Idem	413	28 US$/t	0,20 US$/litro	Longo prazo

Fonte: SEABRA (2008)
Obs: Processo SSF – simultaneous saccharification and fermentation). Processo SSCF – simultaneoussaccharification and co-fermentation) ainda está sendo testada em escala-piloto e deve ser o foco de desenvolvimento para médio prazo. O final da evolução da tecnologia parece ser o estabelecimento do bioprocesso consolidado (CBP – consolidated bioprocessing), no qual as quatro transformações biológicas envolvidas na produção do bioetanol (produção de enzimas, sacarificação, fermentação de hexoses e fermentação de pentoses) ocorrem em uma única etapa.

Sistemas de cogeração. A geração de excedente de eletricidade ou bagaço de cana numa usina sucroalcooleira é fortemente influenciada pelo consumo de vapor na produção de açúcar e bioetanol. As caldeiras e turbinas apresentam, hoje, uma limitação operativa para a geração de vapor vivo entre 60 e 65 bar de pressão e temperatura entre 480 ºC e 520ºC. Constata-se a tendência ao emprego de parâmetros mais altos, com pressão de 88 bar e temperatura de 520ºC, o que aumenta a eficiência na geração de energia elétrica. Para as caldeiras, especificamente, a capacidade de produção atual é de 150 a 250 t/h de vapor, com a perspectiva de atingimento, graças às novas tecnologias, do nível de 300 a 450 t/h (Dedini, 2009).

Em todo o mundo, entretanto, com raras exceções, os sistemas com turbinas de contrapressão são os mais comuns em plantas de cogeração. Nesses sistemas, a geração de energia elétrica acompanha as variações da demanda de calor de processo (na operação em paridade térmica, que é a mais usual).

Atualmente são aplicáveis, ainda, sistemas de cogeração em cascata (com dois níveis de pressão), em que se busca a uniformização tanto da pressão de geração de vapor como do processo. A eficiência elétrica média oscila em torno de 15% a 30%.

Outros sistemas existentes fazem uso da tecnologia de turbinas com dupla extração (extração-condensação): a primeira, no nível de pressão do vapor requerido pelas turbinas

de acionamento mecânico – entre 1,0 e 2,0 MPa --,e a segunda, no da pressão em que o vapor é consumido no processo de produção. Esse processo, também com eficiência elétrica entre 15% e 30%, é o mais indicado para a produção e venda de excedentes de eletricidade em larga escala, pois permite o controle automático da utilização da turbina de extração-condensação e viabiliza a operação ao longo de todo o ano em relação à estabilização da energia comercializável.

O sistema conhecido como tecnologia *Biomass Integrated Gasifier – Gas Turbine – Combined Cic*le (BIG-GT-CC) visa a operar as usinas em ciclo combinado, gaseificando a biomassa sob alta pressão. Esse sistema possibilita alta eficiência elétrica (acima de 40%), além de maximizar o uso do bagaço – diminuindo o consumo de vapor nos processos na planta. Pouco empregado, com custos totais de instalação estimados em US$ 1.000/kW instalado (considerando que a turbina de gás de baixo valor calorífico tenha atingido a sua maturidade comercial), o sistema requer eficiência econômica e minimização de perdas agrícolas, com a completa integração à usina e com a quantidade certa de colheita da palha de cana.

4. Conclusões

Numa economia globalizada, todo setor industrial que almeje permanecer competitivo, deve procurar desenvolver meios que visem à redução de custos e/ou à melhoria da qualidade de seus produtos ambientalmente compatíveis. Isso se faz mediante investimentos em P&D, como sugestão pode ser firmada parcerias entre empresas e universidades para criação de um programa de P&D de longo prazo, com metas e prazos definidos, para desenvolver e aplicar no país as novas tecnologias e processos estudados neste trabalho. As pesquisas de base ligadas à matéria-prima devem ser priorizadas. As pesquisas industriais devem associar qualidade de matéria-prima e desempenho, com vistas à maximização do rendimento e a qualidade do produto final. Outros temas que podem ser pesquisados são os testes de novos insumos, a melhoria de processos e os novos processos. Esses estudos podem ser desenvolvidos em associação com centros de pesquisas e universidades.

Considerando que o ciclo de vida dos produtos não é eterno, a criação de novos produtos e a incorporação de tecnologias inovadoras são fundamentais para atender às novas preferências do consumidor. O monitoramento ao longo do ciclo de vida dos produtos pode, estrategicamente, permitir que se vislumbrem novos métodos e alternativas que inicialmente não foram cogitados mas que podem proporcionar interessantes retornos econômicos ou ambientais.

Considerando ainda o crescente interesse pela questão ambiental e o impacto atribuído ao setor industrial, estudos visando a minimizar tal impacto devam ser implementados. A divulgação dos benefícios ambientais pode ser utilizada como *marketing*. Reduções de consumos específicos, quer de água ou de energia, quer de outros recursos que entram no processo produtivo, podem ser obtidas mediante programas contínuos de P&D. Estes, além de se refletirem em economia de produção, podem ajudar as plantas industriais a alcançar o conceito de impacto mínimo, promover *marketing* ambiental positivo para a empresa e, desse modo, repercutir favoravelmente nas transações comerciais.

Em consequência da integração e de maior sinergia das ações entre a entidade corporativa - planta industrial – e o consumidor, adequações tecnológicas inovadoras podem assegurar e ampliar as perspectivas de mercado. O setor industrial deve estar atento às novas estratégias tecnológicas, em nome da sobrevivência setorial e da maior competitividade. Dessa forma, o uso de tecnologias inovadoras e de novas formas de gestão nos setores industriais avaliados dão testemunho da preocupação com a redução dos custos, enquanto, paralelamente, o reuso dos subprodutos derivados do processo industrial se torna cada vez mais intenso.

Referências

ANA: Agência Nacional de Águas. Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em: fev 2009.

BAJAY, S.V. et al. **Caracterização energética dos setores industriais**: relatório técnico do projeto versando sobre "análise e desenvolvimento de metodologia visando a implementação de projetos de eficiência energética na indústria". [Campinas]: CNI; Universidade Estadual de Campinas, 2008, 125 p.

_____. **Relatório da etapa II.f**: caracterização econômica dos setores industriais: projeto: analise e desenvolvimento de metodologia visando a implementação de projetos de eficiência energética na indústria. [Campinas]: CNI; FUNCAMP; Unicamp, 2008a, 113p.

_____. **Relatório da etapa II.j**: seleção dos segmentos da indústria: projeto: análise e desenvolvimento de metodologia visando a implementação de projetos de eficiência energética na indústria. [Brasília]: Confederação Nacional da Indústria, 2008, 13p.

_____. **Relatório de caracterização da indústria química**. projeto: potencial de utilização térmica e prêmio pago pelo gás natural nos segmentos industriais em substituição ao óleo combustível. [s.l.]: Petrobrás, 2008a, 141p.

BEGUN, M.; NARAYANASAMY, G.; BISWAS, D.R. **Phosphorus supplying capacity of phosphate rocks as influenced by compaction uit water-soluble p fertilizers**: nutrient cycling in agroecosystems. [s.l.], 2004.

BERTO, A. M. Revestimentos cerâmicos: acima e além das aplicações tradicionais. In: **Revista Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 6, nov./dez. 2008, p. 7-12.

BRASIL. Lei n. 10.295 de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia e dá outras providências. Disponível em: <https://legislacao.planalto.gov.br/LEGISLA/Legislacao.nsf/0/E808598265074D308325767100698ED3?OpenDocument&seq=2>.

CORNÉLIO, G.T.; GUIMARÃES, V.A. Comportamento mecânico de materiais utilizados na fabricação de cilindros de laminação submetidos ao desgaste abrasivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2006, Foz do Iguaçu. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17Cbecimat-310-012.pdf>.

DEDINI. **Indústrias de base**. Disponível em: <http://www.dedini.com.br/pt/energia.html>. Acesso em: abr. 2009.

DIAS, Victor Pina; FERNANDES, Eduardo. Fertilizantes: uma visão global sintética. **BNDES Setorial**, n. 24, Rio de Janeiro, 2006, 42p.

FILHO, A. F.; Bielskiz, M. F. **Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 3 p. 30-36, jan./mar. 2008.

GASCH, J. G. M., Controle e automação na indústria cerâmica: evolução e perspectivas. In: **Revista Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 6, nov./dez. 2008, p. 25-27.

HUNTZINGER, D.N.; EATMON, T.D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**. 2008 Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/jclepro>. Acesso em: abr. 2009.

H2OAGUA. Sandvik lança tecnologia de solidificação de uréia ecologicamente correta. **H2Oágua – Uso inteligente da Água/Notícias**, 27de outubro de 2008. Disponível em: <http://www.h2oagua.com.br/noticia.asp?noticia=497>. Acesso em: abr. 2009.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Noticia de 24 de junho de 2005**. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010170050624>. Acesso em: abr. 2009.

LURGI. **Site**. Disponível em: <http://www.lurgi.com/website/fileadmin/pdfs/brochures/Br_MegaMethanol.pdf>. Acesso em: abr. 2009.

LOPES, Afredo Sheid. Ciência garante alimentos saudáveis tanto nas lavouras convencionais quanto nas orgânicas. **Informativo CRA-IV**, jul./ago. 2006. Disponível em: <http://www.crq4.org.br/informativo/agosto2006/pagina02.php>. Acesso em: fev. 2009.

MARIAS, F.; Roustan, H.; Pichat, A. Modelling of a rotary kiln for the pyrolysis of aluminium waste. **Chemical Engineering Science**. 2005. Disponível em: <http://elsevier.com/locate/ces>. Acesso em: abr. 2009.

NOGUEIRA, L.A.H. et al. **Bioetanol de cana-de-açúcar:** energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

OBSERVATÓRIO DE ENERGIA. Site. Disponível em: <http://www.observatóriodeenergia.com/boaspraticas.htm>. Acesso em: abr. 2009.

RIGHI, S.; LUCIALLI, P.; BRUZZI, Herth and environmental impacts of a fertilizer plant – part i: assessment of radioactive pollution. **Journal of Environmental Radioactivity**, p. 167-182.

ROCHA JUNIOR, Edson Carvalho; KULAY, Luiz Alexandre. Reaproveitamento energético (vapor) para produção de energia elétrica em unidades de ácido sulfúrico. In: Workshop Gestão Integrada: Riscos e Sustentabilidade, 2., São Paulo: Centro Universitário Senac, 2006.

RUNE INGELS, Yara. Technology transfer and mitigation of climate change: the fertilizer industry perspective. In: IEA Workshop on Energy Effiency and CO_2 Reduction, Paris, 2007.

SALES, I. R. B. 2005. Disponível em: <http://www.poli.br/arquivos/DOWNLOADS/RELAT/F3rio.pdf>.

TSCHUDI, W. **Draft roadmap for high tech buildings**. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2000

UNITED STATES. Department of Energy. **Site**. 2008. Disponível em: <http://www.energy.gov/>.

UNIVERSIA. **Site**. Disponível em: <http://biblioteca.universia.net/ficha.do?id=3903947>. Acesso em: mar. 2009.

VELÁSQUEZ, S. M. **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseficação/turbina a gás**. [s.l.]: IEE/USP, 2006. Tese de doutorado.

Siglas e abreviaturas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais

Al – Alumínio

ANDA – Associação Nacional para Difusão do Adubo

B – Boro

bat – batelada

BEN – Balanço Energético Nacional

Ca – Cálcio

$CaNO_3$ – Nitrato de Cálcio

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Cl – Cloro

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Co – Cobalto

CO_2 – Gás Carbônico (Dióxido de Carbono)

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós–Graduação

CSI – *Cement Sustainable Initiative*

CTC – Capacidade de Troca de Catódicos

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira

Cu – Cobre

DAP – Di–Amônio Fosfato

DoE – *Department of Energy*

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária GROENERGIA o IAC – Instituto Agronômico de Campinas

ESALQ – Escola de Agronomia Luiz de Queiroz

ETRs – Elemento Terras Raras

FAITER – Faculdades Integradas Interamericanas

Fe – Ferro

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro

FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola

FIBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

FOC – Faculdades Oswaldo Cruz

GEE – Gases de Efeito Estufa

GJ/t – Giga Joule por tonelada

GWh – Giga Watt hora

H – Hidrogênio

H_2SO_4 – Ácido Sulfúrico

H_3PO_4 – Ácido Fosfórico

HNO_3 – Ácido Nítrico

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia

IEA – *International Energy Agency*

IFA – *International Fertilizer Industry Association*

IMAM – Inovação e Melhoramentos na Administração Moderna

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade

INPM –	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
IPCC –	*Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPEA –	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPT –	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ITAL –	Instituto de Tecnologia de Alimentos
K –	Potássio
Kg –	Quilograma
kWh –	Quilo Watt hora
l –	litro
m^3 –	Metro Cúbico
MAP –	Mono–Amônio Fosfato
Mb –	Molibdênio
Mg –	Magnésio
ml –	Mililitro
Mn –	Manganês
MWh –	Mega Watt hora
N –	Nitrogênio
NH_3 –	Amônia
NH_4 –	Hidróxido de Amônia
NPK –	Nitrogênio – Fósforo – Potássio
OECD –	*Organisation for Economic Co–operation and Development*
P –	Fósforo
P&D –	Pesquisa e Desenvolvimento
P_2O_5 –	Pentóxido de Fósforo
PAC –	Programa de Aceleração do Crescimento
PIB –	Produto Interno Bruto
PITCE –	Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior
R$ –	Reais
RIDESA –	Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro
S –	Enxofre
SENAI –	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Si –	Silício
SiO_2 –	Óxido de Silício
SNIC – do Cimento	Sindicato Nacional da Indústria
SSP –	Superfosfato Simples
t –	tonelada
tEP –	tonelada Equivalente de Petróleo
TI –	Tecnologia da Informação
TSP –	Superfosfato Triplo
UFLA –	Universidade Federal de Lavras
UFOP –	Universidade Federal de Ouro Preto
UFSCar –	Universidade Federal de São Carlos
UFV –	Universidade Federal de Viçosa
UNEP –	*United Nations Environment Programme*
UNESP –	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
UNICAMP –	Universidade Estadual de Campinas
US$ –	Dólar Americano
USP –	Universidade de São Paulo
WWF –	*World Wide Fund for Nature*
Zn –	Zinco