

Marcelo Carlos Barbeli

*Centro Universitário Anhanguera
unidade Leme*

marcelo.barbeli@unianhanguera.edu.br

Anhanguera Educacional S.A.

Correspondência/Contato
*Alameda Maria Tereza, 2000
Valinhos, São Paulo
CEP. 13.278-181
rc.ipade@unianhanguera.edu.br*

Coordenação
*Instituto de Pesquisas Aplicadas e
Desenvolvimento Educacional - IPADE*

Informe Técnico
*Recebido em: 15/7/2008
Avaliado em: 19/11/2008*

Publicação: 8 de dezembro de 2008

INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE: ESTADO DA ARTE DAS TECNOLOGIAS DE CO- GERAÇÃO DE ENERGIA

RESUMO

Este trabalho aborda o planejamento energético da indústria brasileira de papel e celulose. A produção de papel e celulose no Brasil é uma atividade industrial complexa, verticalizada, altamente globalizada e intensiva em capital e recursos naturais, sendo importante na economia brasileira tanto em termos de mercado interno como de exportações. Tais atributos, somados as conseqüências desta atividade produtiva do ponto de vista energético e ambiental, motivaram o presente artigo. Para isso, fez-se uma análise do estado da arte das tecnologias disponíveis para geração e cogeração de energia no segmento industrial. O objetivo é mostrar a diversidade de opções para geração de energia em um segmento industrial que apresenta vastíssimo campo para autoprodução de energia através de inserção de tecnologias mais modernas.

Palavras-Chave: Energia, papel, celulose, planejamento.

ABSTRACT

The planning of the pulp and paper industry in terms of energy consumption and supply is the subject of this work. The production of pulp and paper in Brazil is a complex, vertically-integrated, global and capital and natural-resources-intensive industrial activity. It is important in the national economy in terms of both internal market and exports. Such attributes, added to the energy consumption and environmental consequences of this productive activity, motivated this study. A prospective analysis makes up the second part. Employing a range of alternative development scenarios, the possible behaviors, in the next years, of the pulp and paper production and exports and the consumption and production of energy and electricity in this industrial branch are evaluated, in the latter case including the simulation of new technologies.

Keywords: Energy, paper, pulp, planning.

1. INTRODUÇÃO

A produção de papel e celulose se constitui em uma atividade contextualizada em um mercado de alta competitividade e amplamente globalizado, cujas plantas produtoras lançam mão de processos tecnológicos relativamente consolidados. Pode-se dizer, com relativa segurança, que as principais mudanças tecnológicas ocorridas nos últimos anos foram decorrentes do aperfeiçoamento de equipamentos já consagrados pelo êxito de sua utilização.

A indústria de papel e celulose no Brasil apresentou um salto tecnológico a partir da década de 1950. Existem vários exemplos da evolução tecnológica pela qual este tipo de indústria vem passando no Brasil. O marco principal ocorreu em 1956, quando a Companhia Suzano de papel e celulose firmou um convênio com a Universidade de Jackson, nos EUA, com o objetivo de desenvolvimento de um processo de produção adaptado às peculiaridades florestais brasileiras (IE/UNICAMP 1993 a).

O resultado deste convênio foi a criação de um processo técnico e economicamente satisfatório para a produção de papel, que utilizou como matéria prima o eucalipto, que possui fibras curtas e se desenvolve de forma abundante no Brasil. A empresa também é pioneira na introdução do pré-branqueamento – o chamado processo O – que contribuiu para a implantação da produção de celulose ECF - *Elemental Chlorine Free* - no Brasil (IE/UNICAMP 1993a).

A necessidade de desenvolvimento de um novo processo de produção se deu em razão das dificuldades encontradas no país em se adaptar aos processos de produção e de tecnologias utilizados pelas indústrias de papel e celulose localizadas no hemisfério norte, que empregam basicamente matérias-primas de fibra longa, como as coníferas.

Um projeto da Aracruz, iniciado em 1967, constitui-se em um outro exemplo da capacitação tecnológica do setor de papel e celulose no Brasil. O desenvolvimento da tecnologia de reprodução assexuada por estaquia e de um modelo de manejo sustentado de florestas possibilitou um salto qualitativo no processamento do eucalipto, até então com problemas de adaptação no Estado do Espírito Santo, onde se localiza a unidade de processo da empresa. A produtividade florestal da Aracruz saltou de aproximadamente 25 m³/ha ano, no início da década de 1990, para 44 m³/ha ano em 1997 (AGRASIMONS, 2000).

A empresa Bahiasul, que iniciou sua produção em 1993, é um outro exemplo, sendo a primeira empresa a utilizar o digestor contínuo com base no processo MCC - *Modified Continuous Cooking*, que melhora a deslignificação e consome menos reagentes químicos no branqueamento, cuja base é o processo ECF (IE/UNICAMP, 1993b).

A Champion (atualmente International Paper) produzia em 1998 cerca de 600.000 mudas por ano de eucalipto pelo processo de micro-propagação. Ela é pioneira na produção de mudas pelo processo de micro-estacas. Em seu processo industrial, adotou a deslignificação com oxigênio e substituiu o cloro elementar pelo dióxido de cloro (processo ECF), reduzindo a carga de cloro de 0,25 kg/t celulose para 0,1 kg/t de celulose (AGRASIMONS, 2000).

A Klabin foi a empresa que construiu a primeira planta integrada do país, em 1934, no Paraná. Ela pesquisou a utilização da araucária, mas problemas de ordem técnica forçaram-na a optar pelo pinus. Nos anos 1950, introduziu as então modernas caldeiras de recuperação integradas ao processo, aumentando a produtividade (IE/UNICAMP, 1993 b).

O último exemplo, dentre os mais importantes, é o da VCP, que utiliza a técnica de clonagem para a reprodução de suas florestas e usa máquinas que descascam as árvores na própria floresta. No setor industrial, ela utiliza o ozônio no processo de branqueamento, em processos ECF e TCF (*Total Chlorine Free*). Além disso, ela também usa digestores *Low Solid* contínuos e máquinas secadoras de celulose com tela dupla e filtros de licor verde, aumentando a eficiência do processo (IE/UNICAMP, 1993b).

2. O SETOR DE PAPEL E CELULOSE E A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A preocupação do setor de papel e celulose com conversão de energia não é recente. Cita-se, como exemplo, um estudo contratado no início da década de 1980 pelo setor de papel e celulose da então Comunidade Econômica Européia (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 1983), motivado pelos níveis crescentes de competição com os produtores escandinavos e norte-americanos. O resultado deste estudo revelou uma despreocupação das empresas da comunidade para com a conservação de energia e apontou algumas medidas a serem tomadas, dentre as quais cita-se: recuperação de calor do ar úmido da seção de secagem da máquina de papel, melhorias das técnicas de medida do grau de umidade da folha de papel na seção das prensas e entre esta seção e a de secagem, melhoria no sistema de controle da seção de secagem, utilização de água

quente ao invés de vapor vivo no tratamento de efluentes, emprego da recompressão mecânica de vapor, otimização do processo de refino da pasta, otimização da utilização de recicláveis e aparas, maior utilização de unidades de co-geração de energia, entre outras medidas sugeridas.

No início da década de 1990, cerca de dez anos após este estudo, voltou-se a promover uma série de debates e seminários sobre a energia no setor de papel e celulose europeu, envolvendo agora, fora a produção mais eficiente, do ponto de vista do consumo de energia, da celulose, papel e papelão, também a autoprodução de eletricidade e questões ambientais. Foram relatados, nesses eventos: adaptações das caldeiras de recuperação para queima de licor negro com alto teor de cálcio; otimização dos evaporadores de múltiplos estágios do licor negro; otimização do refino de celulose; uma maior retirada de água na seção de prensagem do papel; monitoramento e modelagem da seção de secagem; comparação das diversas técnicas de secagem de papel por radiação, uma maior utilização de sistemas de co-geração de energia, principalmente utilizando turbinas a gás, através da queima de gás natural em ciclos simples ou combinados e a utilização de biodigestores otimizados no tratamento de efluentes.

Um estudo publicado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1990) revela a existência de um grande potencial de conservação de energia pouquíssimo explorado, que se fosse bem aproveitado poderia se traduzir em ganhos de eficiência para o setor de papel e celulose no país. As principais medidas de conservação recomendadas foram: (i) a substituição da caldeira de recuperação e do forno de cal (no processo Kraft) por um único reator, que proporcionaria a recuperação direta dos reagentes alcalinos; (ii) a adoção de sistemas de compressão mecânica do vapor nas operações de evaporação; (iii) a pré-secagem de cavacos de lenha através de um sistema integrado secador/caldeira; e (iv) a racionalização e otimização do uso de evaporadores de múltiplo estágio. Boa parte destas medidas sugeridas, entretanto, ainda não foi adotada pelo setor.

Conforme já mencionado anteriormente, o segmento industrial de papel e celulose em suas atividades industriais tem, nas últimas décadas, investido no aperfeiçoamento de tecnologias e processos maduros. É pouco provável que ocorra um incremento substancial de produtividade nestas atividades sem haver mudanças sensíveis no processo. Atualmente estão sendo pesquisadas algumas novas rotas para os processos de produção, sendo que as mais promissoras são a polpação biológica, a polpação química com fermentação e a polpação com solvente orgânico (etanol) (OVEREND;

CHUM, 2001). Estes três processos envolvem a integração de um processo de fermentação em um processo convencional de polpação. Em termos de consumo de energia isso é conveniente, pois além deste arranjo promover uma maior integração de processos, ele possibilita uma maior recuperação e aproveitamento do calor residual de processo.

3. A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA E AS QUESTÕES ENERGÉTICA E AMBIENTAL

Tem ficado cada vez mais claro, no mundo todo, que as questões energética e ambiental podem se transformar em problemas ou soluções para o setor de papel e celulose.

Segundo um estudo realizado pelo Instituto de Economia da UNICAMP (IE/UNICAMP, 1993 a,b), um número crescente de grupos e entidades ambientalistas vem exercendo pressão sobre os governos e a indústria de papel e celulose no que se refere à exigência de produtos que não agridam o meio ambiente e a adoção de processos de produção que façam uso de “tecnologias limpas”, além de campanhas para uma maior utilização de recicláveis e aparas como suprimento de fibras.

Assim, as empresas que desejam progredir no mercado internacional globalizado, hoje bastante competitivo, devem focar seus objetivos na busca de estratégias que possibilitem uma maior integração produtiva e que resultem em melhorias de seu processo produtivo, matérias primas, produtos e equipamentos, sempre visando a proteção ambiental, a eliminação de desperdícios de energia e a valorização crescente de seus resíduos oriundos da biomassa.

O setor de papel e celulose apresenta desperdícios de energia que podem ser sanados sem o emprego de tecnologias modernas ou grandes investimentos. O potencial de aumento da geração de energia a partir de resíduos da biomassa também é grande, havendo a necessidade, neste caso, da realização de investimentos pesados em equipamentos modernos mais eficientes.

Basicamente, as tecnologias para conversão da biomassa em energia térmica e/ou eletricidade envolvem a combustão direta, a gaseificação e a pirólise (CRAIG et al., 1998). A combustão direta é o processo da oxidação completa da biomassa, gerando gases quentes usados para a produção de vapor em caldeiras. Esse vapor pode ser utilizado na produção de eletricidade, através de sua passagem por turbinas a vapor. Na gaseificação, a biomassa é parcialmente oxidada em presença de quantidades subestequiométricas de oxigênio. Este processo normalmente ocorre na presença de vapor,

para proporcionar energia para a conversão térmica da biomassa remanescente, transformando-a em gases quentes e vapores orgânicos. A pirólise consiste em um aquecimento indireto da biomassa, para transformá-la em uma mistura de líquidos e vapores orgânicos.

4. O ESTADO DA ARTE DAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS E NOVAS PERSPECTIVAS: PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA

Das três tecnologias para conversão da biomassa, a sua queima direta é a que há mais tempo vem sendo utilizada no setor de papel e celulose. Os geradores de vapor com grelhas fixas são equipamentos tradicionais para queima de madeira. Eles possuem baixa eficiência - entre 50 e 60%, características operacionais cíclicas (em razão da remoção das cinzas) e ciclos de combustão de difícil controle. Por outro lado, eles têm a vantagem de serem simples e permitirem a operação com combustíveis de baixa qualidade.

As fornalhas de grelhas móveis tem como característica a eliminação de operações cíclicas, através da remoção das cinzas por tal tipo de grelha. Introduzida em 1920 para carvão e modificada em 1940 para uso com madeira, dispõe-se, atualmente, de grelhas móveis modernas do tipo Kabliz e grelhas resfriadas à água (BAJAY, 1998).

Geradores de vapor com leito fluidizado (borbulhante ou circulante) já funcionam em algumas fábricas e sua tecnologia está em fase de maturação (CRAIG et al., 1998).

Nos geradores de vapor com leito fluidizado borbulhante, uma corrente de gás passa em um leito fluidizado gás-sólido com material granular com velocidade tão alta que as partículas sólidas são amplamente separadas e circulam livremente através do leito. Na combustão da biomassa, o gás é o ar e o leito é geralmente de areia ou calcário. Nestes equipamentos, a temperatura de ignição da biomassa é de cerca de 540°C. Durante o funcionamento ela atinge temperaturas entre 790 e 870°C. Os gases de combustão podem atingir, no entanto, cerca de 980°C. Este tipo de gerador de vapor aceita um variado mix de combustíveis, possui altas taxas de transferência de calor e, conseqüentemente, elevada eficiência de combustão, e geram baixos níveis de NOx. Ele necessita, porém, do acoplamento de ciclones ou filtros para o controle de particulados.

Já os geradores de vapor com leito fluidizado circulante diferem do leito fluidizado borbulhante em razão de não haver uma separação distinta entre a zona sólida densa e a zona de sólidos diluídos.

Nos países em que a indústria de papel e celulose é bastante forte e desenvolvida, como nos Estados Unidos, Canadá e Finlândia, as plantas industriais já utilizam amplamente alguns equipamentos tecnologicamente mais adiantados. É o caso da Finlândia onde, durante a década de 1990, as indústrias de papel e celulose investiram na instalação de geradores de vapor de leito fluidizado. Esses tipos de geradores propiciam a queima de vários tipos de combustíveis, de uma maneira eficiente e com baixos níveis de emissão de poluentes. Uma prática bastante adotada na Finlândia é a queima do licor negro em tais caldeiras, cujas maiores vantagens são a redução da emissão de poluentes, principalmente do dióxido de enxofre e uma maior estabilidade do processo de combustão. Para que o licor negro possa ser queimado com uma eficiência elevada, deve-se aumentar o seu teor de sólidos, o que pode ser conseguido com a adição de mais um evaporador na seção de evaporação (CRAIG et al., 1998).

A gaseificação de combustíveis provenientes de biomassa é bastante interessante do ponto de vista energético para o setor de papel e celulose. Os gaseificadores podem ser de leito fixo ou de leito fluidizado. Os primeiros, por seu turno, podem ser de fluxo ascendente, descendente ou misto, enquanto os gaseificadores de leito fluidizado podem ser do tipo recirculante, borbulhante ou com duas câmaras.

Uma limitação desta tecnologia refere-se à qualidade do gás obtido, ou seja, os níveis de limpeza do gás, já que tanto os motores de combustão interna quanto, principalmente, as turbinas a gás exigem gases com teor muito baixo de impurezas para um perfeito funcionamento e durabilidade.

Os gaseificadores de leito fixo e fluxo descendente produzem gases com baixo teor de alcatrões. Por outro lado, eles exigem combustíveis de boa qualidade e sua utilização em plantas de grande porte não é economicamente viável. Segundo Bridgwater (1995), eles são economicamente inviáveis em unidades com capacidade superior a 500 kWe.

No final da década de 1980 aconteceram experiências nos Estados Unidos, Suécia e Finlândia com gaseificadores de leito fixo e fluxo ascendente conectados em turbinas a gás, mas os resultados não foram satisfatórios em razão da qualidade do gás obtido e do elevado teor de alcatrões presente (RENSFELD, 1991). Na saída dos gaseificadores de leito fixo as temperaturas situam-se na faixa de 500 a 600°C e os metais alca-

linos presentes se condensam em particulados. Isso pode acarretar problemas para as turbinas, já que os metais alcalinos tendem a causar problemas de corrosão nas pás e os materiais particulados podem causar o fenômeno de erosão nas mesmas. Nesta faixa de temperaturas os alcatrões encontram-se na fase de vapor e, desde que o gaseificador esteja conectado próximo à turbina ou motor de combustão interna, estes alcatrões podem ser queimados nesses equipamentos sem problemas de condensação, o que é, inclusive, vantajoso, pois os alcatrões promovem um aumento do poder calorífico do gás oriundo da biomassa (WILLIANS; LARSON, 1993).

Os gaseificadores de leito fluidizado operam com capacidades mais elevadas, se comparados aos de leito fixo, e podem empregar uma grande variedade de combustíveis sem pré-tratamento mais elaborado. No entanto, o controle da qualidade do gás obtido é mais difícil de ser conseguido, já que na saída dos gases são encontradas temperaturas bem mais elevadas, na faixa entre 800 a 900°C. Nesta faixa de temperaturas os metais alcalinos encontram-se na fase gasosa e a formação de particulados é mais intensa. Segundo Rensfeld (1991), no início da década de 1990 plantas de produção de papel e celulose na Suécia utilizavam gaseificadores de leito fluidizado recirculante sob pressões próximas à pressão atmosférica, alimentados com cavacos de madeira e produzindo gás para geração de energia elétrica em motores de combustão de ciclo Diesel.

As unidades geradoras, conforme já foi mencionado, podem ser compostas de motores de ciclo Diesel turbo-alimentados, ou turbinas a gás associadas a ciclos termodinâmicos combinados, seja em plantas termoeletricas ou de co-geração de energia.

Em plantas de pequeno porte a utilização de motores de ciclo Diesel é economicamente mais viável, enquanto que para unidades de grande porte a turbina a gás passa a ser uma opção interessante. A turbina a gás pode ser do tipo industrial ou aeroderivativa. Esta última é mais compacta e eficiente, em parte por conta do elevado aporte de recursos em P&D de que dispõe, em razão de seu uso pela indústria aeronáutica, enquanto que a turbina a gás do tipo industrial é mais robusta e resistente. Tanto a Asea Brown Boveri (ABB) quanto a Mitsubishi Heavy Industries produzem turbinas a gás que operam com relativo sucesso utilizando gases de baixo poder calorífico em plantas siderúrgicas.

Um outro fabricante de turbinas, a General Electric (GE), realizou testes em turbinas aeroderivativas nas décadas de 1980 e 1990 com relativo sucesso. Dotadas de combustores mais compactos, elas ainda assim mantiveram uma combustão estável com gases pobres (BAJAY, 1998).

Os ciclos combinados são basicamente sistemas integrados gaseificador/turbina e são comumente conhecidos como sistemas BIG/GT, ou BIG/CC - *Integrated Biomass Gasification - Combined Cycle*. Segundo Malinen e Halynen (1995), tais sistemas podem elevar ao dobro a relação entre a potência elétrica conseguida/potência térmica utilizada, se comparados aos sistemas utilizados atualmente. De acordo com Willians e Larson (1993), a vantagem da utilização das turbinas a gás se deve à sua alta eficiência, pois a temperatura de entrada nestes equipamentos chega a ser superior a 1200°C, enquanto que nas turbinas a vapor não se consegue nem a metade desta temperatura. Comparativamente, as tecnologias empregadas na construção de turbinas a vapor estão amplamente dominadas e encontram-se estagnadas. Pesquisas relativas a novas técnicas de resfriamento e novos materiais para as pás tem produzido resultados animadores, permitindo que as turbinas a gás resistam a um aumento de temperatura de cerca de 20°C/ano, acarretando uma melhoria em sua eficiência. Por outro lado, o comportamento do acoplamento gaseificador/turbina em unidades de grande porte ainda não é satisfatório.

Prevê-se que o sistema baseado em ciclos BIG/CC - *Biomass Integrated Gasifier/Combined Cycles* deverá competir técnica e economicamente com sistemas tradicionais a partir do ano 2015 (FAAIJ et al., 2000). Testes realizados com cavacos de madeira indicaram rendimentos da ordem de 55% em plantas com capacidade de 100 MWe. As estimativas para esses sistemas, atualmente, sinalizam para custos de instalação dessas plantas da ordem de U\$ 2500 a 5000/kWe. Para o ano de 2015, para esta mesma capacidade, a previsão de custo é da ordem de U\$ 1000 a 1500/kWe (FAAIJ et al., 2000).

Em relação à gaseificação de biomassas, as atividades de pesquisa e desenvolvimento tem se concentrado na busca de equipamentos que operem a pressões mais altas. A operação em pressões mais elevadas permite a utilização de gaseificadores mais compactos com elevado rendimento na conversão em energia elétrica em plantas de ciclo combinado, devido a menores perdas termodinâmicas associadas à compressão do agente fluidizante em sistemas pressurizados. O problema de se trabalhar em altas pressões, no entanto, é que o sistema de alimentação de combustível é mais complexo e caro e a limpeza dos gases precisa ser feita a quente. Se comparados a gaseificadores que operam próximos à pressão atmosférica, podem ser considerados inviáveis economicamente. Os custos unitários de unidades piloto ou em projeto são muito superiores ao de gaseificadores que operam a pressões próximas à atmosférica (BRIDGWATER, 1995).

A Inatran Voima Oy, empresa concessionária de energia elétrica finlandesa, trabalhou no desenvolvimento de um ciclo BIG-GT para operar com combustíveis com alto teor de umidade (até 70%). A principal característica deste sistema é a secagem direta do combustível com vapor e posterior utilização da umidade evaporada para injeção em uma turbina a gás, conseguindo-se elevados índices de eficiência (CONSONNI; LARSON, 1994a).

A Ahlstrom Oy (Foster Wheeler) e a Sydkraft AB instalaram e operaram, durante vários anos, em Värnamo, Suécia, uma planta experimental seguindo o ciclo IGCC - *Integrated Gasification Combined Cycles*, a partir de um gaseificador de leito fluidizado circulante de pressão e temperatura elevadas (18 bar e 950°C). Por razões econômicas, a planta deixou de operar em 2000.

Esta instalação integrava uma planta de gaseificação e uma unidade de ciclo combinado; seu combustível principal era a biomassa. A capacidade de processamento era de 90 toneladas de cavaco de madeira por dia. Utilizava-se filtros cerâmicos para uma limpeza a quente do gás produzido. A planta em ciclo combinado operava com uma turbina a gás da série European Gas Turbine Typhoon, com capacidade de 4 MWe. Em ciclo *bottoming* produzia cerca de 2 MWe. Era produzido, ainda, 9 MWt para aquecimento distrital (BAIN; OVEREND; CRAIG, 1998).

O início de funcionamento desta planta de demonstração ocorreu em 1996 e, após 3600 horas de operação da turbina a gás e 8500 horas de operações de gaseificação, os testes com diferentes tipos de madeira e resíduos, incluindo, palha de milho, não revelaram nenhum problema. Os principais resultados desta planta experimental, que apresentou um rendimento global de 83%, gerou vapor a 40 bar e 455°C e produziu gases com um poder calorífico inferior de 5 MJ/Nm³, foram:

- possibilidade de gaseificação a altas pressões e temperaturas;
- queima estável do gás produzido;
- sistema eficiente e seguro de filtragem dos gases de alta temperatura;
- capacidade de gaseificação de combustíveis “difíceis” de ser gaseificados;
- baixas emissões de poluentes, principalmente de hidrocarbonetos e dioxinas;
- constatação da competitividade da tecnologia IGCC com as tecnologias convencionais para biomassas.

Os dados de operação da planta indicaram um custo unitário de instalação de € 1500/kWe para uma planta de 55 MWe e um custo de € 2300/kWe para uma planta de 15 MWe (STAHL et al., 2000).

Segundo Stahl et al. (2000) o Battelle Columbus Laboratory (EUA) projetou um sistema, como parte do programa de biomassa do US Department of Energy (DoE), com dois gaseificadores de leito fluidizado circulante, aquecimento indireto e curto tempo de residência, onde uma unidade de combustão com leito fluidizado, trabalhando à pressão atmosférica, queima o alcatrão proveniente de um gaseificador instalado em paralelo, com as mesmas características e, através de areia que circula entre as duas unidades, fornece um gás de médio poder calorífico.

Também conhecido como Battelle High Throughput Gasification Process, ou tecnologia Ferco, neste sistema, parte do vapor e do gás produzidos são empregados como agentes de fluidização.

Depois de um longo período de testes, a McNeil Power Generating Station, sediada em Vermont, EUA, opera este sistema, que possui capacidade para processar 182 t/dia de cavacos de madeira, acoplado a uma turbina a gás que pode gerar 50 MWe (PAISLEY et al., 2000). Este projeto foi desenvolvido através de uma parceria entre a Ferco, Burlington Electric, Battelle, US DoE e National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Uma outra empresa norte americana, a Manufacturing and Technology International, desenvolveu pesquisas na área de gaseificação de biomassa com o projeto de um gaseificador de leito borbulhante com transferência de temperatura através de um trocador de calor imerso no leito. A combustão por pulsos de parte do gás produzido supre calor para o trocador e o gás recirculado ou vapor funcionam como agente de fluidização.

Após um longo período de testes com combustíveis oriundos de biomassa, a empresa apostava na utilização do sistema pela indústria de papel e celulose, em plantas que utilizam o processo Kraft. Neste sentido, um projeto piloto foi desenvolvido em uma planta de celulose instalada na Carolina do Norte, no qual cerca de 3t/h de líxivia era gaseificada com relativo sucesso (CONSONNI; LARSON, 1994a).

Willians e Larson (1993) analisaram uma planta hipotética de produção de celulose, sugerindo algumas melhorias tecnológicas. Tal planta processa 1000 t/dia de celulose consumindo para isto 16,3 GJ vapor/t. celulose e produzindo aproximadamente

700 kWh/t celulose de eletricidade em unidades de co-geração a partir de tecnologia atualmente disponível e utilizando somente resíduos industriais como combustível. A simples substituição das turbinas de contrapressão por turbinas de condensação (ciclo CEST) com utilização de resíduos agrícolas poderia aumentar a produção específica de eletricidade para 1.200 kWh/t. de celulose. O emprego dos ciclos BIG/STIG incrementaria ainda mais a produção de eletricidade para cerca de 2.500 kWh/t. de celulose. A metodologia utilizada pelos autores para os cálculos considera uma produtividade florestal média, tomando como base o sudeste americano, para estimar a disponibilidade de resíduos agrícolas, e assume um consumo específico de vapor da ordem de 9,6 GJ/t celulose para o ciclo CEST e BIG/STIG.

A gaseificação do licor negro é outra alternativa que, no futuro, poderá gerar ganhos de energia na indústria de papel e celulose. Segundo Maunsbach *et alii* (1999), os gases obtidos nesta operação de gaseificação pode ser usado em:

- sistemas de co-geração com turbinas a gás, em ciclos combinados, cuja eficiência situa-se entre 40 e 60%;
- sistemas com turbinas a gás evaporativas (EVGT), cuja eficiência situa-se entre 50 e 60%;
- sistemas de turbinas a gás com injeção de vapor (ciclo STIG), cuja eficiência situa-se entre 40 e 50%.

Como alternativa a esses sistemas, turbinas a gás operando com queima externa poderiam ser utilizadas. Neste caso, o calor dos gases é transferido a um fluido de trabalho que circula em um trocador de calor acoplado à turbina.

No caso do licor negro gaseificado, a previsão de produção de eletricidade a partir da utilização de turbinas a gás é de cerca de 1700 kWh/tonelada de celulose, obtida a partir do processo químico (MAUNSBACH *et al.*, 1999).

Finalmente, o emprego da pirólise de biomassa vem suscitando interesse dos estudiosos do setor. Há perspectivas da tecnologia penetrar no segmento de papel e celulose, uma vez que o combustível líquido gerado poderia ser consumido em motores de combustão interna ou turbinas a gás. Neste caso, seria possível o desacoplamento físico entre a planta de pirólise e a planta termoelétrica, além de que haveria boas perspectivas de viabilização de centrais (termoelétricas ou de co-geração) com capacidades de até 10 MW (BRIGWATER, 1995).

A inserção de novas tecnologias de produção de eletricidade ocorre na medida em que os equipamentos antigos começam a caminhar para o final de vida útil, quando as intervenções de manutenção atingem custos proibitivos.

5. OUTROS AVANÇOS TECNOLÓGICOS QUE PROPICIAM GANHOS ENERGÉTICOS E/OU AMBIENTAIS

Bruce e Wilson (1999) destacam nove medidas que têm contribuído, nos últimos anos, para a economia de energia térmica e eletricidade, e/ou ganhos ambientais, nas plantas de papel e celulose canadenses. Elas são:

- i. Reciclagem dos resíduos provenientes da operação de branqueamento em plantas de celulose que operam segundo o processo KRAFT;
- ii. Otimização do consumo energético específico entre os diversos estágios do processo termomecânico de produção de polpa de celulose;
- iii. Aumento na reciclagem do papel jornal, com destintamento e remoção de contaminantes deste papel através de lavagem ou flotação;
- iv. Tratamento secundário de efluentes das plantas;
- v. Diminuição do grau de umidade das cascas e cavacos utilizados nas caldeiras de biomassa em pelo menos 20%;
- vi. Branqueamento da pasta de celulose através do tratamento seqüencial OZEDP (Oxigênio-Ozônio-Extração Alcalina- Dióxido de Cloro-Peróxido de Hidrogênio);
- vii. Eliminação da água com posterior queima dos resíduos do destintamento do papel reciclado em caldeiras de biomassa;
- viii. Queima em suspensão dos resíduos de lenha e cavacos para aumentar a eficiência das caldeiras de biomassa;
- ix. Melhora da consistência da mistura entre fibra e água, do usual 1% para cerca de 10%, com o objetivo de se evitar movimentação desnecessária de água.

Um relatório elaborado pelo World Energy Council (1995) indica as tecnologias que constituíam o estado da arte no processo químico da fabricação de celulose em meados da década de 1990:

- i. Utilização de digestores contínuos em plantas de grande porte e o aquecimento por deslocamento em plantas de menor porte;
- ii. Uso de recuperadores de calor na polpação termomecânica;
- iii. Utilização, na seção de polpação, da antraquinona, sulfito alcalino de antraquinona (ASAQ) e sulfito neutro de antraquinona (NSAQ).

Este relatório menciona, também, que a pré-deslignificação com oxigênio, o branqueamento com oxigênio no primeiro estágio de extração e o branqueamento por deslocamento são processos promissores capaz de proporcionar economias de até 40% no consumo de energia elétrica, se comparados aos processos convencionais.

A recuperação de reagentes químicos é uma outra etapa de grande importância no processo de produção de papel e celulose. O estado da arte de tecnologias para

recuperação de reagentes químicos envolve recuperadores de calor residual do forno de cal e sistemas compactos que promovem a queima de licor negro, com recuperação dos reagentes químicos através de reações químicas (WORLD ENERGY COUNCIL, 1995).

Outras tecnologias que constituem o estado da arte do setor de papel e celulose incluem as novas técnicas de secagem mecânica com a utilização de rolos compressores côncavos acoplados a secadores elétricos de radiação infravermelha que promovem a correção da variação transversal do grau de umidade da folha de papel, possibilitando um aumento de produtividade e podendo acarretar uma economia de cerca de 32% de energia na fase de fabricação do papel. A utilização de prensas de deslocamento e a secagem por impulsão podem promover uma economia de 10% no consumo de energia elétrica (WORLD ENERGY COUNCIL, 1995).

Toda planta moderna de produção de papel e celulose emprega sistemas de controle integrado da manufatura. A Asea Brown Boveri (ABB), por exemplo, fabrica um sistema integrado de controle e automação chamado *TMP Plant Control*, que controla toda a planta através de sensores, instalados em pontos estratégicos, que checam parâmetros e emitem informações a uma central de comando. O controle da planta não se limita a máquinas e equipamentos, mas estende-se ao processo de produção como um todo, promovendo otimizações no processo de refino e garantindo uma maximização na capacidade de produção (ABB PROCESS AUTOMATION INC., 1992).

O setor de papel e celulose é um segmento industrial privilegiado em termos da possibilidade de aproveitamento de tecnologias de uso geral na indústria. Dentre estas tecnologias, pode-se mencionar:

- i. melhorias nas caldeiras e sistemas de geração de energia elétrica;
- ii. maior utilização de gás natural em substituição ao óleo combustível;
- iii. uso de sistemas de co-geração;
- iv. emprego de motores elétricos de alta eficiência e motores elétricos com rotação controlada por inversores de frequência;
- v. emprego de digestão anaeróbia no tratamento de efluentes com o posterior aproveitamento do gás metano produzido para produção de energia térmica e, eventualmente, eletricidade.

6. CONCLUSÃO

As mudanças nas tecnologias ligadas diretamente ao sistema de produção geralmente são lentas, pois, por vezes, implicam em intervenções severas em linhas de produção. A substituição de maquinários, principalmente em plantas produtoras de papel, normalmente só acontece em um cenário no qual os níveis exigidos de produção, exportação e qualidade do produto justificam tal troca.

REFERÊNCIAS

ABB PROCESS AUTOMATION INC. ABB Automation. **Catálogo 3BFI102000R0101**. Geórgia, USA, 1992.

AGRASIMONS Limited Consulting Engineers. **A guide to energy savings in the Kraft pulp industry**. Vancouver, BC, ISBN 1-896742-51-3. Canadá. 2000.

BAIN, R. L., OVEREND, R. P., CRAIG, K. R. Biomass-fired power generation. In: **Fuel Processing Technology**, v. 54, 1998, p. 1-16.

BAJAY, S. V. A indústria de papel e celulose: Seu consumo energético, por usos finais e tipos de plantas, evolução tecnológica e perspectivas de conservação de energia. In: Congresso Latino-Americano sobre Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 3. Campos de Jordão, SP, 1998. **Anais...** v. 2. UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, p. 699-704.

BRIDGWATER, A. V. The technical and economics feasibility of biomass gaseification for power generation. In: **Fuel**, v. 74, 1995, p. 631-653.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **Energy Audit n° 3 – Pulp, Paper and Board industry in the European community**, Luxemburgo, 101 p., 1983.

CONSONNI, S.; LARSON, E. D. Biomass-gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles. Part A: Technologies and performance modeling. In: **Cogen Turbo Power 94, Proceedings: ASME**, Portland, Oregon, USA, 1994a.

_____. Biomass-gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles. Part B: Performance calculations and economic assessment. In: **Cogen Turbo Power 94, Proceedings: ASME**, Portland, Oregon, USA, 1994b.

CRAIG, K. R.; BAIN, R. L.; OVEREND, R. P. Biomass-fired power generation. In: **Fuel Processing Technology**, v. 54. Proceedings. NREL, Golden, USA, 1998, p. 1-16.

FAAIJ, A.; MEULEMAN, B.; VAN REE, R. **Long term perspectives of biomass integrated gasification/combined cycle technology and a comparison with combustion**. 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Espanha, jun. 2000.

IE/UNICAMP. **Estudo de competitividade da indústria brasileira: competitividade da indústria de celulose**. Nota técnica setorial do complexo papel e celulose. UNICAMP, Campinas, 156 p., 1993a.

_____. **Estudo de competitividade da indústria brasileira: competitividade da indústria de papel**. Nota técnica setorial do complexo papel e celulose. UNICAMP, Campinas, 91 p., 1993b.

IPT, 1990. Desenvolvimento e implantação do sistema integrado de planejamento energético. **Estudos setoriais**. v. 2 – papel e celulose, ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, 90 p., 1990.

MALINEN, H. O.; HALYNEN, S. A. Possibilities for increasing power production with biofuels in the finnish forest industry – Present and future technologies and their effects on emissions. In: **Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry**. n. 2. Portland. Oregon, USA, 1995. Proceedings. NREL, CO, USA, p. 1272-1290.

MAUNSBACK, K.; MARTI, V.; SVEDBERG, G. Opportunities for efficient use of biomass in the pulp and paper industry. In: OVEREND, Ralph P.; CHORNET, Esteban (Eds.). **Proceedings of the 4st biomass conference of the Americas**. Oakland, CA, USA. v. 1, ago. 1999.

OVEREND, R. P., CHUM, H. L., Biomass and renewable fuels. In: **Fuel Processing Technology**. v. 71, 2001, p. 187-195.

PAISLEY, M. A.; FARRIS, M. C.; BLACK, J. W.; IRVING, J. M.; OVEREND, R. P. Preliminary operating results from the battelle/Ferco gaseification demonstration plant in Burlington. Vermont, USA. **1st World Conference on Biomass and Industry**. Sevilla, Espanha, jun. 2000.

RENSFELD, E. Gaseification for power productions. In: GASSI, G. (Ed.). **European Forum on Eletriciry Production from Biomass and solid wastes by Advanced Technologies**. Itália, 1991. Proceedings: Comission of the European Communities, Brussels, p. 65-79.

STAHL, K.; NEEGARD, M.; NIEMINEN, J. Varnamo demonstration programme – final report. **1st World Conference on Biomass for Energy and Industry**. Sevilla, Espanha, jun. 2000.

WILLIANS, R. H.; LARSON, E. D. Advanced gaseification based biomass power generation. In: JOHANSSON, T. B.; KELLY, H.; REDDY, A. K. N.; WILLIANS, R. H. (Eds). **Renewable Energy Sources for Fuels and Eletriciry**. Washington, DC: Island Press, 1993, p. 729-785.

WORLD ENERGY COUNCIL. **Energy efficiency improvement utilising high technology** – An assessment of energy use in industry and buildings, London, UK, 1995.

Marcelo Carlos Barbeli

Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Coordenador e docente do curso de Engenharia de Produção Mecânica do Centro Universitário Anhanguera - UNIFIAN, Limeira/Pirassununga.