



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS – GPT

O IMPACTO DA EFICIÊNCIA NA COGERAÇÃO COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS DE BIOMASSA

**Elaine Oliveira (*), Mônica Souza, João Carlos Mello, Guilherme Amaral
Andrade & Canellas**

**Antonio Dias
Norske Skog Pisa**

RESUMO

O objetivo deste trabalho é demonstrar o impacto da eficiência sobre os indicadores de atratividade em um sistema de cogeração com biomassa em uma fábrica de papel para uso final. A eficiência desempenha um papel importante neste caso, pois o custo do combustível é responsável por cerca de 70% do custo da energia.

Este artigo abordará uma análise abrangente das opções que se apresentaram para o projeto na sua fase de viabilidade. A variável eficiência, suas consequências e restrições práticas serão analisadas neste artigo.

PALAVRAS-CHAVE

Cogeração, Eficiência, Biomassa Florestal, Atratividade, Indústria de papel

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescente aumento no consumo de energia no país, atrelado às dificuldades em promover um aumento compatível na oferta, apresenta desafios importantes para o abastecimento de eletricidade no Brasil.

A necessidade de acompanhar esse crescimento de forma competitiva e segura, levando em conta os aspectos de preservação ambiental e o aquecimento global, representa grande oportunidade para as indústrias que produzem resíduos nos seus processos fabris, como a biomassa gerada nas indústrias de papel para uso final, que podem ser aproveitados para a geração de energia.

A disponibilidade de resíduos de processo de baixo custo aliada ao alto consumo de eletricidade e vapor pelo processo de produção de papel torna a cogeração de energia uma alternativa natural para redução de custos de energia e aumento da segurança energética.

O uso de biomassa como combustível para a geração de energia elétrica traz aspectos positivos tanto econômicos como sócio-ambientais. A biomassa queimada, além de gerar energia elétrica, reduz o volume de resíduos sólidos gerados pelas indústrias de papel.

Atualmente no Brasil existem 28 empreendimentos em operação e 5 em construção, somando mais de 338 MW de potência instalada utilizando resíduos de madeira para a geração de eletricidade (1). Este total representa cerca de 53% do potencial brasileiro, considerando apenas a biomassa florestal (sivilcultura) (2). Sendo assim, restam cerca de 300 MW a serem explorados para a geração de eletricidade (2).

O objetivo deste trabalho é demonstrar o impacto da eficiência sobre os indicadores de atratividade em um sistema de cogeração com biomassa em uma indústria de papel. Abordando as particularidades de suprimento e custo da biomassa florestal (seção 2), as tecnologias de cogeração com biomassa disponíveis no mercado (seção 3), o dimensionamento do sistema e o efeito do incremento de eficiência na geração de eletricidade e no investimento (seção 4) e uma breve análise econômico-financeira demonstrando a viabilidade dos projetos de

(*) Rua Alexandre Dumas, n° 2.100 – 13° andar – CEP 04717-004 – São Paulo – SP – Brasil
Tel: (+55 11) 2122-0442 – Fax: (+55 11) 2122-0440 – Email: elaine.oliveira@andradecanellas.com.br

cogeração com resíduos de madeira e o efeito do incremento da eficiência na taxa interna de retorno do projeto (seção 5).

2.0 - SUPRIMENTO DE COMBUSTÍVEL

Em um projeto de cogeração a partir de biomassa, a questão do suprimento de combustíveis é crítica. Deve-se inicialmente assegurar esse suprimento e dimensionar o sistema de cogeração de acordo com a quantidade de biomassa efetivamente disponível.

A biomassa considerada para este trabalho é proveniente de resíduos de uma indústria de papel composto por lodo, cascas de troncos picadas, resíduos florestais e cavacos de madeira.

Os diferentes tipos de resíduos com diferentes conteúdos energéticos e umidade foram analisados para o dimensionamento dos equipamentos, visando melhor adequação da queima ao combustível utilizado reduzindo assim perdas de eficiência na caldeira.

2.1 Biomassa Considerada

A biomassa florestal considerada é sustentável pois tem suprimento assegurado por contratos ou é proveniente do próprio processo produtivo de papel. Assim quantidade total de resíduos considerada para o dimensionamento do sistema de cogeração será os resíduos do processo e os contratos de suprimento.

Os valores médios de poder calorífico inferior (PCI) e umidade assim como os valores de disponibilidade e preço da biomassa florestal utilizada estão na Tabela 1 (3).

Tabela 1 – Valores médios da biomassa florestal para o sistema de cogeração.

Dados	Valores
PCI médio (kcal/kg)	2.200
Umidade média (%)	50
Disponibilidade (ton/ano)	510.850

A biomassa considerada apresenta algumas particularidades, devido a utilização do lodo gerado no processo fabril o sistema de queima deve ser muito controlado para que a caldeira não perca eficiência. Com isso, a verificação junto a fabricantes para se verificar das limitações da caldeira se faz necessária.

3.0 - COGERAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PAPEL

A disponibilidade de resíduos de processo de baixo custo aliada ao alto consumo de eletricidade e vapor pelo processo de produção de papel torna a cogeração de energia uma alternativa natural para redução de custos de energia e aumento da segurança energética.

A cogeração possibilita ganhos de eficiência com a produção simultânea de energia térmica (calor e/ou frio) e elétrica a partir de um mesmo combustível, que nesse caso provém de fonte de energia renovável e relativamente limpa, a biomassa. Além disso, geração de energia a partir dessa fonte resulta em emissões praticamente nulas de dióxido de carbono, o que possibilitaria a obtenção de créditos de carbono.

Como a tecnologia utilizada para sistemas de cogeração com bagaço de cana é a mesma aplicada a resíduos de madeira. A evolução tecnológica na indústria de equipamentos nacionais, trazida pela geração com biomassa da cana-de-açúcar, fez com que os sistemas de cogeração com biomassa estejam cada vez mais eficientes e economicamente viáveis.

Para o dimensionamento de um sistema de cogeração, além da disponibilidade de combustível, o requerimento de energia elétrica e vapor da indústria são determinantes. A fábrica de papel analisada apresenta um elevado consumo de eletricidade, sendo assim optou-se por dimensionar o sistema a partir da biomassa disponível e da necessidade de vapor da fábrica. A energia elétrica que não for atendida pelo sistema de cogeração será comprada no mercado.

Como a quantidade de eletricidade que pode ser gerada a partir da biomassa está condicionada principalmente à tecnologia adotada, uma discussão a respeito é conduzida a seguir.

3.1 Tecnologias de Cogeração com Biomassa

Uma vez determinada a disponibilidade de biomassa e o requerimento de vapor, a planta de cogeração pode ser dimensionada. Para uma melhor compreensão do processo, alguns detalhes sobre a tecnologia são apresentados a seguir.

3.1.1 A Turbina

De uma forma geral duas tecnologias, determinadas pelo tipo de turbina que utilizam, podem ser empregadas na geração de eletricidade a partir da biomassa:

- a. Turbina de contrapressão (Ciclo Convencional);
- b. Turbina de extração condensação (Ciclo CEST).

A principal diferença entre os dois ciclos é que a turbina de contrapressão expande o vapor até a pressão de processo, enquanto que a turbina de extração-condensação expande o vapor até uma pressão bem inferior, abaixo da atmosférica (0,12 bar), sendo este vapor então condensado. Desta forma, a turbina de extração-condensação possibilita uma maior geração de eletricidade por tonelada de biomassa.

Pode-se dizer que no caso da turbina de contrapressão, a geração é determinada pela demanda de vapor do processo, enquanto para a turbina de extração-condensação, a geração é limitada pela quantidade do combustível.

A Figura 1 e a Figura 2 apresentam os desenhos esquemáticos dos sistemas de contrapressão e condensação. Com relação à eficiência, a turbina de condensação apresenta uma eficiência um pouco menor que a turbina de contrapressão para o mesmo porte, pois a quantidade de água no último estágio da turbina prejudica o rendimento termodinâmico. A eficiência da turbina também varia com o porte e a pressão. A eficiência nominal de uma turbina moderna fica em torno de 85%.

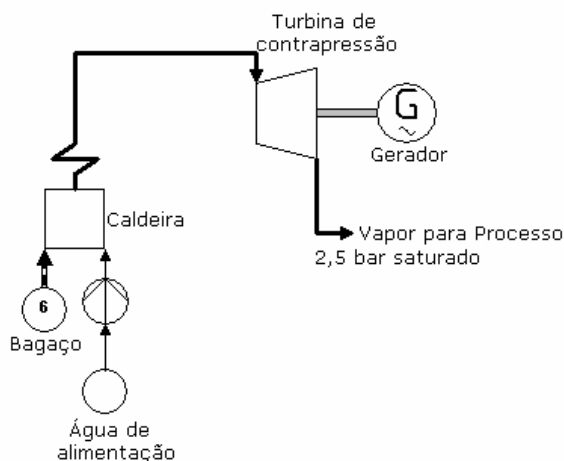


Figura 1 - Esquemático do sistema de Contrapressão.

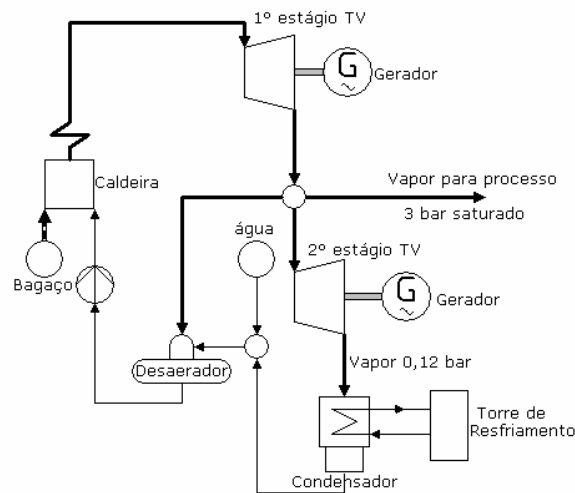


Figura 2 - Esquemático do sistema de Extração & Condensação.

3.1.2 A Caldeira

Para geração de vapor com combustão de biomassa, utiliza-se caldeira grelha fixa ou móvel. Busca-se atualmente o aumento na eficiência das caldeiras com a melhoria do processo de combustão. O próximo passo no aumento de eficiência seria a adoção de caldeiras com leito em suspensão ou leito fluidizado.

No Brasil, o principal fabricante de caldeiras e recuperadores de calor é a empresa Dedini Indústrias de Base em São Paulo, que fabrica caldeira de até 92 Bar a temperaturas de até 520 °C, com eficiências médias bruta da ordem de 88% (4).

Com a adoção de caldeiras com leito em suspensão ou fluidizado a eficiência pode chegar a 90% (4).

A tecnologia considerada para o sistema é de caldeira com grelha móvel e turbina de extração-condensação.

4.0 - DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Para o dimensionamento deste sistema de cogeração foram feitas algumas simulações visando verificar os possíveis ganhos de eficiência.

Pode-se verificar que quanto mais extrações intermediárias são realizadas na turbina maior é a potência gerada com a mesma quantidade de combustível e conseqüentemente maior o ganho de eficiência do ciclo.

Conforme dito anteriormente o mix de biomassa aqui considerado inclui o lodo gerado no processo de fabricação de papel. Este lodo contém elevada umidade e apresenta enxofre na sua composição. A existência do enxofre (SO_2) no combustível pode trazer graves problemas de corrosão. O SO_2 reage e gera ácido sulfúrico (H_2SO_4) que se condensado corroerá a caldeira. Sendo assim a temperatura de saída da chaminé não poderá ser inferior a 138 °C (4).

Devido a complexidade de queima da biomassa foram feitas consultas a fabricantes para se determinar a pressão, temperatura e capacidade que a caldeira poderá ter, tendo em vista todos os problemas com umidade, enxofre e variações na biomassa queimada. Após conversas com os fabricantes dos principais equipamentos chegou-se as premissas técnicas a serem consideradas no dimensionamento inicial do sistema, estas premissas estão detalhadas a seguir:

- Atendimento completo da constante demanda de vapor da fábrica;
- Utilização de caldeira tipo grelha rotativa (65 bar e 490 °C) – capacidade máxima limitada a 130 toneladas por hora de vapor devido à heterogeneidade da biomassa;
- Temperatura dos gases da chaminé será de 138 °C – para evitar problemas com corrosão;
- Utilização de turbina de extração-condensação, com apenas uma extração de vapor (processo), e geração

- constante;
- Disponibilidade, fator de capacidade e consumo específico típicos.

A partir destas premissas foi definido um caso base para a comparação dos ganhos em eficiência na potência gerada e na atratividade do projeto.

4.2 Casos Analisados

O Cenário Base foi definido a partir da disponibilidade total de biomassa. Esta disponibilidade de combustível determina a geração de energia de 36 MW médios, que com um fator de capacidade de 90% resulta em uma capacidade instalada de 40 MW. A geração foi determinada por simulação em software termodinâmico (*Cycle Tempo*), a Figura 3 ilustra o esquemático do sistema simulado, e a Tabela 2 apresenta as premissas e resultados obtidos da simulação.

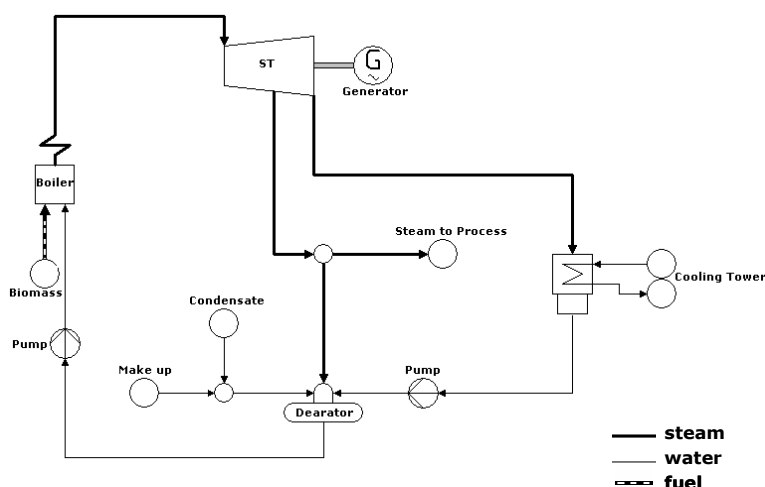


Figura 3 - Esquemático do sistema considerado.

Tabela 2 – Premissas e resultados da simulação do caso base.

Dados	Valores
Eficiência das Caldeiras	85%
Eficiência das Turbinas	83%
Vapor para o Processo – 10 bar/260 °C	53 ton/h
Fator de Capacidade	90%
Energia Total Gerada	36 MWmédio
Consumo Interno	10%
Energia Disponível	32,4 MWmédio
Capacidade Instalada	40 MW
Consumo Específico	1,74 ton/MWh

Para avaliar do incremento da eficiência no sistema proposto, foi realizada uma nova simulação termodinâmica mantendo as premissas anteriores de disponibilidade de biomassa e vapor para o processo, incrementando em 3% apenas a eficiência da caldeira, este caso foi denominado de caso 1. A Tabela 3 apresenta as premissas e resultados da simulação do caso 1.

Tabela 3 – Premissas e resultados da simulação do caso 1.

Dados	Valores
Eficiência das Caldeiras	88%
Eficiência das Turbinas	83%
Vapor para o Processo – 10 bar/260 °C	53 ton/h
Fator de Capacidade	90%
Energia Total Gerada	38,7 MWmédio
Consumo Interno	10%
Energia Disponível	34,83 MWmédio
Capacidade Instalada	43 MW
Consumo Específico	1,62 ton/MWh

Como alternativa para alcançar melhores eficiências neste sistema, pode-se considerar caldeiras com leito fluidizado, aumento na temperatura do vapor, trocadores de calor, entre outros.

Tais alternativas para melhorar a eficiência da caldeira refletem em aumentos nos investimentos da caldeira. A disponibilidade de combustível se manteve a mesma em ambos os casos, logo, o custo do combustível em R\$/tonelada se manteve o mesmo. Assim, o incremento na eficiência resultou numa maior geração de energia, com isso acréscimos de investimento devido a capacidade dos equipamentos devem ser considerados além do acréscimo no preço da caldeira devido a alteração de tecnologia de queima e/ou inclusão de trocadores de calor. Sendo assim, uma breve descrição das considerações feitas no investimento é dada a seguir.

4.2 Investimento Considerado

A análise do incremento da eficiência na taxa interna de retorno depende do custo do combustível e do investimento. O custo de combustível manteve-se o mesmo tanto para o caso base como para o caso 1, isto porque não se considerou diminuição do consumo de biomassa e sim incremento na geração com a mesma disponibilidade de combustível.

O investimento do caso base foi determinado através da cotação de equipamentos principais e da estimativa dos auxiliares, obras e serviços com base em *breakdown* típico para uma planta de cogeração a biomassa desse porte resultando num investimento final da ordem de R\$ 2.700/kW instalado.

Para se atingir o incremento de 3% na eficiência, considerou-se para o caso 1 a utilização de caldeira com leito fluidizado. As caldeiras a leito fluidizado são, em média, 30% mais caras do que as caldeiras a grelha convencionais. No investimento final, além do aumento devido ao incremento na capacidade instalada (40 MW para 43 MW), foi considerado o acréscimo de 30% no valor da caldeira, resultando num investimento final da ordem de R\$ 2.900/kW instalado.

Deve-se ressaltar que a data base dos valores de investimento aqui considerados é de janeiro de 2008, antes da crise mundial. Com o desaquecimento do mercado os preços dos equipamentos apresentam uma tendência de queda.

Visando avaliar o efeito do incremento da eficiência na taxa interna de retorno do projeto uma análise econômico-financeira foi realizada.

5.0 - ANALISE ECONÔMICO-FINANCEIRA

O presente tópico tem por objetivo apresentar a metodologia da análise econômico-financeira realizada, considerando para isso a ótica do custo evitado.

A análise da atratividade do projeto foi baseada na ótica do custo evitado para as instalações industriais existentes, ou seja, aqueles que ocorreriam caso fosse necessária a compra de eletricidade e vapor. Os custos evitados considerados são:

- Custo de geração de vapor para atendimento do processo;
- Preço de Energia Elétrica comprada no mercado;
- Encargos Setoriais incidentes sobre o consumo de energia elétrica;
- Encargos de conexão ao sistema de distribuição;
- Impostos incidentes sobre a fatura de energia.

O método da Taxa Interna de Retorno (TIR) não tem como finalidade a avaliação da rentabilidade absoluta a um determinado custo de capital, mas objetiva encontrar uma taxa intrínseca de rendimento. Por definição, a taxa interna de retorno é a taxa de desconto para a qual o valor presente líquido dos fluxos de caixa do projeto é igual a zero.

A análise econômico-financeira dos projetos tem como data-base Janeiro de 2008. Os fluxos de caixa são projetados em valores nominais, entretanto, os resultados serão apresentados em Reais constantes. O número de anos do fluxo de caixa para o empreendimento analisado está vinculado à vida útil dos equipamentos estimada em 25 anos.

O custo da energia para esta cogeração ficou atraente vis a vis os insumos de mercado atuais e obteve uma taxa interna de retorno (TIR) de aproximadamente 20%. É demonstrada uma grande sensibilidade da atratividade do projeto com variações no preço da biomassa. Com variações de $\pm 5\%$ no preço da biomassa a TIR varia em $\pm 2,5\%$, as mesmas variações para o investimento fazem a TIR variar em $\pm 0,5\%$.

O preço do combustível em R\$/tonelada se manteve o mesmo, contudo a maior geração de energia faz com que este valor em R\$/MWh gerados seja menor. O investimento se comporta de maneira inversa com a melhora na eficiência o investimento aumenta em cerca de R\$ 200/kW instalado. Por outro lado a geração de energia é maior e a necessidade de compra de eletricidade da rede diminui. Com esses dados foi realizada e modelagem econômico-financeira descrita anteriormente. A Tabela 4 apresenta as premissas consideradas e os resultados da TIR encontrada para o caso base e o caso 1.

Tabela 4 – Premissas consideradas no modelo e o resultado da TIR para o caso base e o caso 1

Dados	Caso base	Caso 1
Capacidade Instalada	40 MW	43 MW
Geração Total	36 MWmédio	38,7 MWmédio
Geração Líquida	32,4 MWmédio	34,8 MWmédio
Consumo de Biomassa	1,74 ton/MWh	1,62 ton/MWh
Eficiência da Caldeira	85%	88%
Investimento específico	2.700 R\$/kWinst.	2.900 R\$/kWinst.
Preço da Biomassa (5)	110 R\$/MWh	102 R\$/MWh
TIR	20%	23%

A diminuição no preço final de equilíbrio observada com o incremento de 3 pontos percentuais na eficiência foi de aproximadamente 6%.

5.1 Uma Avaliação Integrada

A Tabela 4 apresenta os resultados esperados para o projeto, estretanto estes foram obtidos através de uma avaliação integrada.

Nesta avaliação integrada, atrativamente muito importante para o setor industrial, leva-se em consideração os efeitos, não só no insumo vapor, mas também no insumo eletricidade.

A energia elétrica em valor real, e com os recentes encargos e tributos, tem subido de forma contrastante, o que abre um espaço muito racional para a cogeração. Numa planta industrial de papel, longe dos outros insumos tradicionais para a cogeração, deve-se buscar oportunamente o seu insumo de produção.

As premissas de uma análise integrada de cogeração são:

- a. Valores que seriam pagos com a compra de energia de terceiro sem a cogeração de energia elétrica.
- b. Despesas que seriam incorridas na geração de vapor para o processo. Com a cogeração, o processo torna-se mais eficiente na medida em que com a mesma quantidade de combustível há geração de energia elétrica e vapor para o processo.

Tabela 5 – Premissas da Análise Integrada de cogeração

Componentes do Custo Evitado	2011 to 2012	2013 to 2017	2018 to 2019	2020 to 2025
Preço da Energia Elétrica	91,30	102,62	107,75	116,49
ICMS	53,72	58,51	60,13	63,83
PIS/COFINS	18,40	20,04	20,60	21,87
TUSD	33,18	33,18	33,18	33,18
Encargos Setoriais	15,20	15,20	13,90	13,90
Custo Evitado de Energia Elétrica Total (R\$/MWh)	211,81	229,55	235,57	249,27
Custo Evitado com Geração de Vapor para o Processo (US\$/ton)	6,63	6,63	6,63	6,63

6.0 - CONCLUSÃO

A disponibilidade de resíduos de processo a baixo custo aliada a escassez de energia elétrica, que eleva os preços de eletricidade, contribuem para a viabilização do projeto de cogeração, uma tecnologia que possibilita ganhos em eficiência na produção simultânea de vapor e energia elétrica, que nesse caso provém de fonte de energia renovável e relativamente limpa, a biomassa. Além disso, geração de energia a partir dessa fonte resulta em emissões praticamente nulas de dióxido de carbono, o que possibilitaria a obtenção de créditos de carbono.

A análise de viabilidade econômica do projeto mostra a possibilidade de geração de valor para a empresa adotando-se processos mais eficientes e que contribuem para seu desenvolvimento sustentável, características fundamentais para sua maior competitividade em um mundo globalizado.

Os resultados apresentados refletem, fundamentalmente, o grande impacto dos custos de biomassa no resultado do projeto e conseqüentemente da eficiência.

Com isso, cada vez mais se mostra como indispensável a utilização de tecnologias novas com incrementos na eficiência do ciclo, visando um aumento da geração com a utilização da mesma biomassa disponível.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Banco de Informação de Geração (BIG) – Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) – www.aneel.gov.br - acessado em janeiro de 2009.
- (2) CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA – CENBIO. Panorama do potencial de biomassa no Brasil. Brasília; Dupligráfica, 2003.
- (3) Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) – utilização dos dados da análise elementar da biomassa e a aferição do PCI foram ambos efetuados no IPT em 1997.
- (4) DEDINI S/A Indústria de Base – Fabricante de Caldeiras, 2009.
- (5) Valor Florestal – empresa gestora de ativos florestais.