

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA AMPLIAÇÃO DE SISTEMA DE COGERAÇÃO APLICADO A UMA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL

José Luz Silveira

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá - Av. Ariberto P.da Cunha, 333
Guaratinguetá-SP, Brasil CEP 12516-410 Caixa Postal 205
Jose luz@feg.unesp.br

Joaquim Antonio dos Reis

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá - Av. Ariberto P.da Cunha, 333
Guaratinguetá-SP, Brasil CEP 12516-410 Caixa Postal 205
Jareis@feg.unesp.br

Paulo Henrique Dias

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá - Av. Ariberto P.da Cunha, 333
Guaratinguetá-SP, Brasil CEP 12516-410 Caixa Postal 205
paulo.dias@feg.unesp.br

Resumo: Este trabalho analisa o sistema de cogeração empregando duas turbinas de contrapressão, existente numa indústria brasileira típica de Celulose e Papel. Determina-se os custos de geração (energia elétrica e térmica) do sistema em uso e propõe-se uma nova configuração associando ao sistema existente uma turbina a vapor de condensação, tendo em vista a ampliação prevista de produção de celulose e papel. Basicamente três resíduos são gerados no processo de produção de celulose: casca de madeira, resíduos de madeira e lixívia. Cascas e resíduos são obtidos no processo de descascamento/corte da madeira e a lixívia é obtida no processo de cozimento dos cavacos de madeira. Esses resíduos são utilizados num sistema de cogeração, como insumos energéticos para a geração de energia elétrica e energia térmica. Através da análise técnica e econômica, conclui-se pela viabilidade da nova configuração proposta para a planta de cogeração.

Palavra-chave: Resíduos Industriais, Energia elétrica e térmica, sistema de cogeração, celulose e papel

1. Introdução

As crises internacionais de abastecimento de petróleo provocaram um aumento do preço de seus derivados e, por isso, as formas de geração foram reestruturadas e novas tecnologias no setor energético foram desenvolvidas. Portanto, pode-se dizer que houve a implantação de uma *política de conservação de energia* e que, no âmbito industrial - indústrias químicas, alimentícias, siderúrgicas, de açúcar e álcool, petrolíferas, de papel e celulose entre outras – onde os consumos de energia são altíssimos conforme (ANEEL, 2002 e ANP, 2002) o impacto da racionalização de energia acarretou em mudanças na forma de conceber os processos de geração de energia.

Simultaneamente ocorreu a inserção de novas unidades de geração, como é o caso dos *Sistemas de Cogeração*, que visam a produção sequencial de trabalho (energia elétrica ou mecânica) e calor útil (energia térmica), conforme mostra (Balestieri, 2002).

A Figura 1 ilustra comparativamente um sistema convencional de geração de energia e um sistema de cogeração aplicado a um processo industrial.

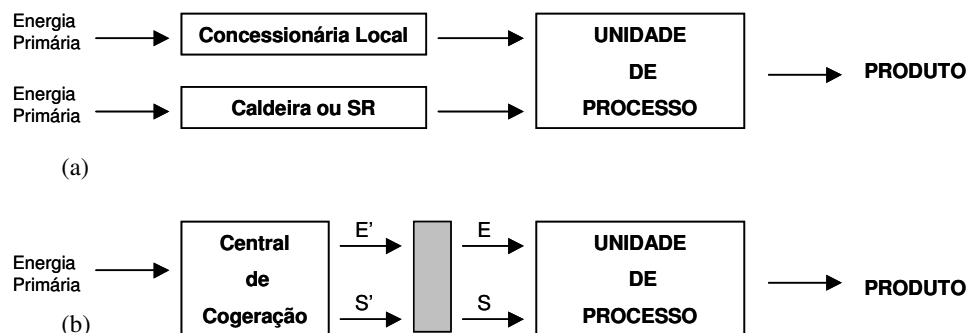


Figura 1 - Configuração para geração de energia independente e cogeração

Na Figura 2, é apresentada a configuração do sistema de cogeração atual da unidade industrial, bem como as condições termodinâmicas (temperatura, pressão e entalpia) associadas a cada fluxo.

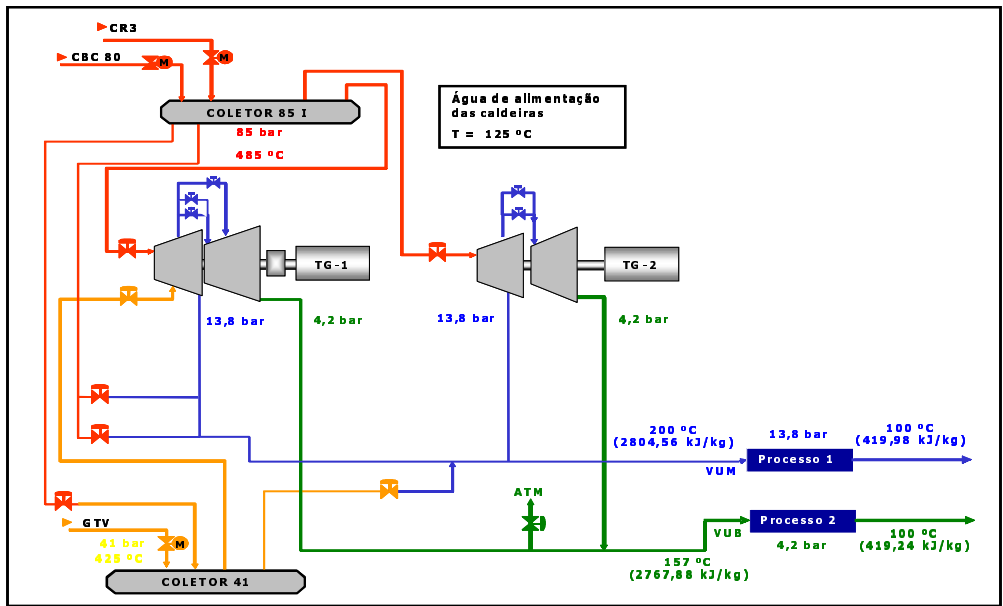


Figura 2 – Representação do sistema de cogeração atual (dados de performance na Tabela 1)

2. Análise energética da ampliação do sistema de cogeração

Tendo como referência a equação proposta em (Silveira, 1990), e analisando a Fig. 3, de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, é possível determinar a quantidade de energia térmica consumida nos processos (E_c).

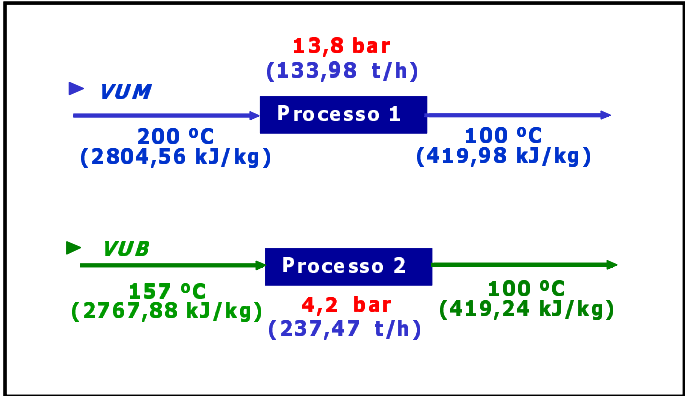


Figura 3 – Representação do fluxo de vapor utilizado nos processos

Conforme considerado, o atendimento da demanda de vapor é o ponto principal desta análise. Desta forma, os cálculos a seguir não serão realizados com base na demanda energia elétrica, mas sim objetivando o atendimento da demanda térmica, ou seja, operação em paridade térmica.

A produção de vapor obtida através dos insumos energéticos a serem considerados, pode ser dada pelas seguintes equações:

$$MV_{cald.1} = \frac{(P_{lix} \cdot PC_{lix} \cdot \eta_{cald.lix.})}{(h_{1S} - h_{a,l})} \tag{1}$$

$$MV_{cald.2} = \frac{(P_{casca} \cdot PC_{casca} + P_{resíduos} \cdot PC_{resíduos}) \eta_{cald.casca,rs}}{(h_{2S} - h_{a,l})} \tag{2}$$

Para verificarmos a disponibilidade total de vapor (D_{vap}) gerada pelos insumos produzidos, pode-se utilizar a seguinte equação:

$$D_{\text{vap}} = (\text{Acréscimo_da_demanda}) - (MV_{\text{cald1}} + MV_{\text{cald2}}) \quad (3)$$

Onde:

MV_{cald1} e MV_{cald2} = vapor produzido pela queima de lixívia e, cascas e resíduos, respectivamente;

P_{lix} , P_{casca} , $P_{\text{resíduos}}$ = produção de lixívia, casca e, resíduos, respectivamente;

PC_{lix} , PC_{casca} , $PC_{\text{resíduos}}$ = poder calorífico da lixívia, casca e resíduo, respectivamente;

$\eta_{\text{cald.lix}}$, $\eta_{\text{cald.casca, res}}$ = rendimento da caldeira de lixívia, e da caldeira de casca e resíduos, respectivamente;

h = entalpia do vapor na saída da caldeira: subscritos 1s e 2s; subscrito (a1): água de alimentação.

O Poder Calorífico Inferior dos Combustíveis, foi usado com seu valor médio conforme dados da Petrobrás (2002);

$PC_{\text{lix}} = 11.040 \text{ kJ/kg}$; $PC_{\text{casca/resíduos}} = 12.050 \text{ kJ/kg}$.

O resultado encontrado na Eq. (3) indicará se o processo de geração de vapor atende a demanda prevista, ou se haverá a necessidade de queima suplementar.

A Figura 4 apresenta a nova configuração proposta para o sistema de cogeração, como sugerido em (Santos, 2001).

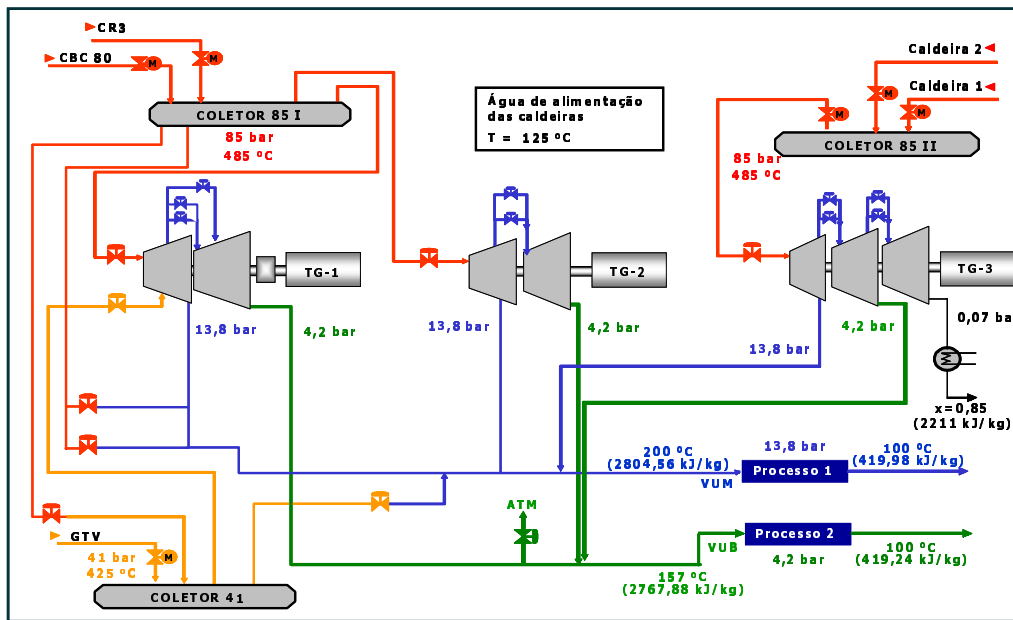


Figura 4. Configuração proposta para a ampliação do sistema de cogeração

A Tabela 1 mostra uma comparação em termos de performance energética entre a planta de cogeração atual e ampliação proposta.

Tabela 1 – Comparação entre o sistema de cogeração atual e o proposto

Parâmetros	Sistema Atual	Ampliação Proposta
Volume de Produção TSA/dia	900,0	2000,0
Potência Elétrica (MW)	37,89	50,12
Energia Térmica/Vapor (MW)	243,67	182,56
Potência Suprida Combustível (MW)	366,08	290
β	0,155	0,275
Rendimento Global (%)	76,91	80,23
Rendimento Elétrico (%)	10,36	17,28
Rendimento Térmico (%)	66,56	62,95

Os cálculos do coeficiente β , da eficiência global e a eficiência de geração podem ser feitos através das seguintes equações

$$\beta = \frac{E_p}{E_c} \quad (4)$$

$$\eta_G = \frac{E_p + E_c}{E_{comb}}$$

$$\eta_{el} = \frac{E_p}{E_{comb}}$$

$$\eta_{et} = \frac{E_c}{E_{comb}}$$
(5)

onde temos: E_p = potência elétrica produzida; E_c = calor consumido nos processos; E_{comb} = potência suprida pelo combustível [MW];

η = rendimento, subscritos G,el,et são respectivamente global, elétrico e térmico

β = parâmetro de relação entre potência elétrica e calor

Nas figuras de 1 a 4 foi usada a seguinte notação:

VUM, VUB = vapor úmido de média e de baixa pressão respectivamente

CR3, CBC80 = caldeira de recuperação química e caldeira aquatubular sem queima suplementar, respectivamente ;

TG = turbogeradores de contração com extração controlada

3. Análise econômica da ampliação

Para efetivação desta análise, os valores utilizados são obtidos em (Célula de Produção de Utilidades, 2002).

Tabela 2. Relatório anual da célula de produção de utilidades

Equipamento	Produção Mensal média	Consumo mensal médio de combustível
Caldeira CBC 80	40.646 ton de vapor	3.144,6 ton óleo 3A
Caldeira GTV	45.301,0 ton de vapor	1.615,7 ton óleo 3A 7.270,0 ton biomassa
Caldeira de Recuperação	177.616 ton de vapor	472,9 ton óleo 3A 78.883,9 ton GNC e Licor Negro
Energia elétrica	27.282 MW	-

Fonte: VCP/Jacareí (2002)

Os custos foram calculados conforme as equações:

$$C_{el} = \frac{[(I_{pl} - I_{cal}) \cdot f \cdot (1+t)]}{(H \cdot E_p)} + \frac{C_{comb}}{\eta_{el}}$$
(6)

$$C_{et} = \left[\frac{(I_{pl} \cdot f \cdot (1+f))}{(H \cdot E_c)} \right] + \frac{C_{comb}}{\eta_{et}} - \frac{E_p \cdot C_{el}}{E_c}$$
(7)

$$R = E_p \cdot H \cdot (C_{el.concess.} - C_{el}) + E_c \cdot H \cdot (C_{v.cv} - C_{et})$$
(8)

$$f = \frac{[q^k \cdot (q-1)]}{(q^k - 1)}$$
(9)

$$q = 1 + \frac{r}{100}$$
(10)

Aqui,

I_{pl} = custo de investimento da caldeira [US\$/kWh] = US\$60,144 milhões

I_{cald} = custo de investimento do sistema de cogeração [US\$/kWh] = US\$16,24 milhões

C_{comb} = custo de combustível = 0,00359 US\$/kWh (calculado)

f = fator de anuidade

t = custo de pessoal de operação e manutenção (%)

H = período equivalente de utilização (h/ano)

E_p = energia elétrica gerada [kWh]
 $C_{el.concess}$ = custo da energia elétrica comprada da concessionária [US\$/kWh] = 0,028 US\$/kWh
 $C_{v,cv}$ = custo da geração de vapor por caldeira convencional [US\$/kWh] = 0,015 US\$/kWh
 r = taxa anual de juros [%]
 k = período de amortização (*payback*)

Na Figura 5, é apresentado o custo de eletricidade produzida em função da taxa anual de juros e do *payback* adotado, para a ampliação do sistema de cogeração.

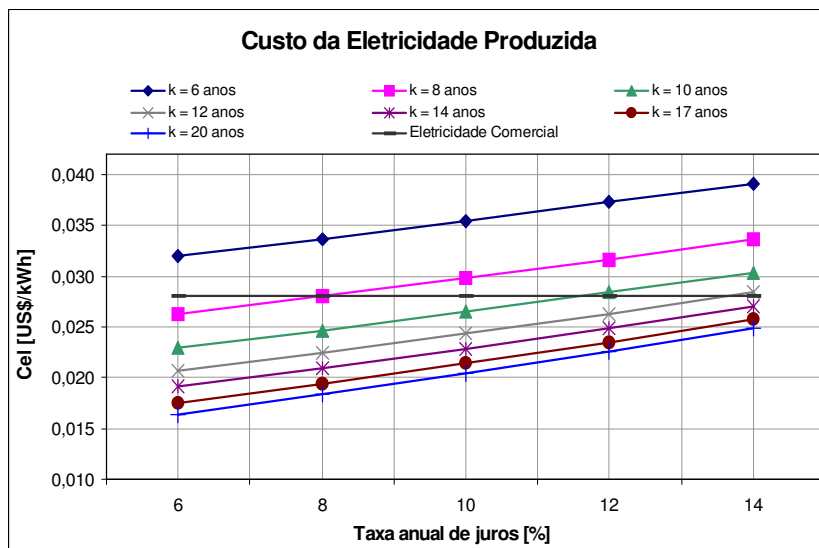


Figura 5 – Custo da eletricidade produzida no sistema de cogeração proposto

Na Figura 6 é apresentado o comportamento do custo do calor produzido (Energia Térmica de Processo) em função da taxa anual de juros e do *payback*.

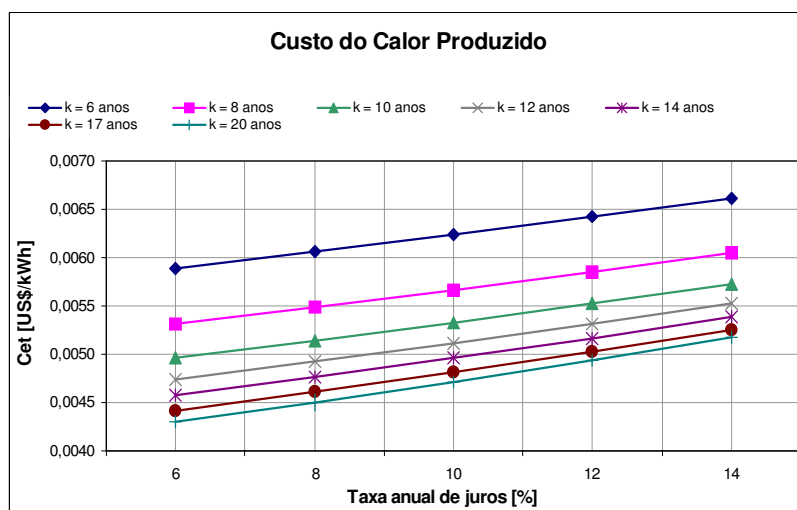


Figura 6 – Custo do calor produzido no sistema de cogeração proposto

Na Figura 7 é apresentada a Receita Anual da ampliação do Sistema de Cogeração proposto, utilizando uma Turbina de Condensação com 2 extrações.

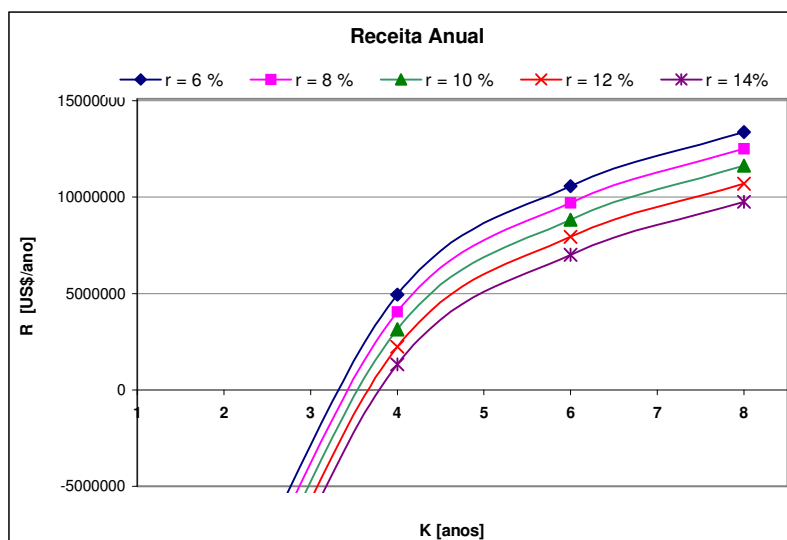


Figura 7 - Receita Anual

4. Comentários e conclusões

Ao analisar a proposta do novo Sistema de Cogeração, utilizando uma turbina de condensação com duas extrações, diante do sistema existente utilizando 2 turbinas de contrapressão com duas extrações, pode-se verificar o valor do coeficiente β , em torno de 0,155 (para o sistema existente; duas turbinas a vapor de contrapressão) e de 0,275 para o novo sistema associado (turbina a vapor de condensação com duas extrações). Estes valores de coeficientes β são coerentes com a literatura técnica disponível (Silveira, 1990; Santos, 2001; Silveira, 1997), indicando que sistemas com turbinas de condensação têm um maior aproveitamento da energia contida no vapor, pois o excedente de vapor é extraído em uma zona de pressão de vácuo, gerando assim uma maior variação entálpica associada a uma maior geração de eletricidade.

Neste trabalho pode-se verificar o baixo custo associado a geração de energia elétrica e térmica do processo, devido ao emprego de resíduos industriais como combustíveis (lixívia, casca/resíduo de madeira). Para o sistema atual, encontrou-se um custo de 0,0263 US\$/kWh para a produção de Energia Elétrica e 0,0044 US\$/kWh para a produção de Energia Térmica de processo, valores inferiores aos custos da energia elétrica industrial comprada de concessionária (0,028 US\$/kWh) e da energia térmica gerada por uma caldeira convencional (0,015 US\$/kWh). No sistema de cogeração proposto (Turbina a Vapor de Condensação com duas extrações), pode-se verificar a influência do aproveitamento de resíduos como combustível empregado nas caldeiras, pois os custos de geração de energia elétrica e térmica, diante das taxas de juros e do período de amortização, apresentaram também valores inferiores a 0,028 US\$/kWh e 0,015 US\$/kWh. Pode-se verificar também para o novo sistema de cogeração, um curto período de retorno do capital investido (entre 3 e 4 anos), tendo em vista o baixo custo associado aos combustíveis originados no próprio processo industrial.

Desta forma, conclui-se que Cogeração tem se apresentado como sendo técnica extremamente viável como fonte geradora de energia elétrica e térmica. Sob o ponto de vista econômico, a utilização de resíduos industriais como insumos energéticos utilizados nas caldeiras tem-se mostrado como um fator predominante para a viabilidade econômica do sistema associado usado na indústria de papel e celulose.

5. Referências

- ANEEL. *Agência nacional de Energia Elétrica*. [on line]. Brasília, 2002. Disponível na World Wide Web: <URL: <http://www.aneel.gov.br>>.
- ANP. *Agência Nacional do Petróleo*. [on line]. Brasília, 2002. Disponível na World Wide Web: <URL: <http://www.anp.gov.br>>.
- J.A.P.Balestieri, *Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor*. 1ª. edição. Florianópolis : Editora da UFSC, 2002. 279p.
- CÉLULA DE PRODUÇÃO DE UTILIDADES – VCP. *Relatório Anual da Célula de Produção de Utilidades*. Jacareí, 2002
- J.L. Silveira, *Estudo de sistema de cogeração aplicado a fabricação de papel e celulose*. Itajubá, 1990. 141p. Dissertação de Mestrado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEL.
- D.D. Santos *Análise de Sistema de cogeração aplicado à Aracruz Celulose S.A.*. Guaratinguetá, 2001, 71p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista.

J.L. Silveira, E.B. Stocco, *Análise da viabilidade técnica e econômica do emprego de turbina a vapor de condensação com extração para cogeração em uma indústria química*, III Congresso Iberoamericano de Engenharia de Mecânica . Havana, Cuba. Setembro de 1997.

TECHNICAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF A COGENERATION SYSTEM UPGRADE IN A PULP AND PAPER INDUSTRY.

José Luz Silveira

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá - Av. Ariberto P.da Cunha, 333
Guaratinguetá-SP, Brasil CEP 12516-410 Caixa Postal 205

JoseLuz@feg.unesp.br

Joaquim Antonio dos Reis

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá - Av. Ariberto P.da Cunha, 333
Guaratinguetá-SP, Brasil CEP 12516-410 Caixa Postal 205

Jareis@feg.unesp.br

Paulo Henrique Dias

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá - Av. Ariberto P.da Cunha, 333
Guaratinguetá-SP, Brasil CEP 12516-410 Caixa Postal 205

paulo.dias@feg.unesp.br

Abstract: This work study the cogeneration system with two back pressure steam turbines applied in a typical Brazilian pulp and paper industry. There are basically three kinds of rejection that are generated in the production process of pulp: bank, rejection of wood and scouring powder. Bank and rejection of wood are obtained in the banking/cutting of wood, and the scouring powder is obtained from the banking of wood shaving. Rejection has be widely used in industries of pulp in cogeneration system, such as energetic waste to generate electrical and thermal energy. The costs of electricity and saturated steam produced in this cogeneration system are determinated. A new configuration of cogeneration system incorporating a condensing steam turbine together with the two back-pressure steam turbines is proposed to meet a greater volume of the pulp and paper production. So, the technical and economical feasibility of the new configuration is available and shown its viability for the industry.

Keywords: *industrial reject, electric and thermal energy, cogeneration system, pulp and paper*