

## ANÁLISE EXERGÉTICA DE VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO VISANDO COGERAÇÃO

ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE CELULOSE

Geraldo Augusto Camplina França e Lis Nunes Soares

Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Mecânica - PPGEM  
Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha  
31.270-901 - Belo Horizonte MG Brasil  
e-mail: gacf@ufmg.br  
lis\_soares@hotmail.com

### ABSTRACT

Today, most part of life activities depends upon energy availability. Since this is such an important topic, there is a continuous search for energy waste reduction, which leads to the development and improvement of industrial equipments, processes and methods of analysis. Cogeneration is an alternative to reduce energy waste in industrial processes. The identification of potential sources to generate energy is made through an exergetic analysis. The pulp and paper industry is a potential candidate to use cogeneration due to the availability of residual fuels and high consumption of steam in the process. The present work develops energetic and exergetic analyses of pressure reduction valves of a pulp industry aiming the use of cogeneration. As results, a comparison between energetic and exergetic efficiencies of the analyzed processes is presented as well as a preliminary technical and economical analyses of cogeneration feasibility.

**Keywords:** cogeneration, efficiency, energy, exergy, pulp and paper industry.

### RESUMO

Hoje, a maior parte das atividades da vida depende da disponibilidade de energia. Como energia é um tópico tão importante, há uma busca contínua da redução do seu desperdício que resulta no desenvolvimento e melhorias de equipamentos industriais, processos e métodos de análise. A cogeração é uma alternativa para a recuperação de energia disponível em processos industriais. A identificação dos pontos dos processos com maior potencial para tal recuperação é feita através da análise exergetica. A indústria de papel e celulose é candidata potencial à aplicação da cogeração devido à disponibilidade de combustíveis residuais e à necessidade elevada de vapor de processo. O presente trabalho desenvolve análises energética e exergetica de válvulas redutoras de pressão de uma indústria de celulose, visando o emprego da cogeração. Como resultados são apresentadas comparações entre as avaliações das eficiências energéticas e exergeticas dos processos analisados, bem como uma análise preliminar de viabilidade técnica e econômica da cogeração.

**Palavras-Chave:** cogeração, eficiência, energia, exergia, indústria de papel e celulose.

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1. – O processo de estrangulamento

As válvulas redutoras de pressão são muito utilizadas na indústria por serem equipamentos simples e de fácil aplicação. Contudo, o processo de estrangulamento é um destruidor de exergia e sua eficiência racional é nula. Assim sendo, esse dispositivo não é o mais adequado para a redução da pressão e controle da vazão.

Entretanto, na indústria de papel e celulose, essas válvulas são utilizadas principalmente na redução da pressão e no controle da vazão de vapor de processo.

O processo de estrangulamento acontece quando um fluido escoar através de um orifício, proporcionando queda

de pressão e aumento do volume específico e da entropia do fluido.

O balanço energético para um processo de estrangulamento adiabático, representado pela Figura 1, pode ser escrito conforme a Equação 1.

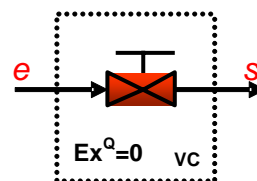


Figura 1. Processo de estrangulamento adiabático.

$$h_e + \frac{C_e^2}{2} + g_E * Z_e + \dot{q} = h_s + \frac{C_s^2}{2} + g_E * Z_s + \dot{w} \quad (1)$$

Onde:

- $h$  : Entalpia específica.
- $C$  : Velocidade média.
- $g_E$  : Aceleração devido à gravidade.
- $z$  : Altura.
- $\dot{q}$  : Calor específico.
- $\dot{w}$  : Trabalho específico.

Os índices  $e$  e  $s$  indicam entrada e saída, respectivamente.

Como a transformação de energia ocorre muito rapidamente, não há tempo nem área suficiente para uma troca de calor significativa, e o processo pode ser considerado adiabático. Não há trabalho, nem variação da energia potencial e a variação da energia cinética é desprezível considerando a área de saída maior que a área de entrada para um gás ou vapor. Com estas considerações, a Equação 1 reduz-se à Equação 2, e o processo pode ser considerado isoentálpico.

$$h_e = h_s \quad (2)$$

A necessidade de redução de pressão pode proporcionar a aplicação favorável da cogeração devido à alta destruição de exergia durante o processo.

O balanço exergético para um processo de estrangulamento adiabático, representado pela Figura 2, pode ser escrito conforme a Equação 3.

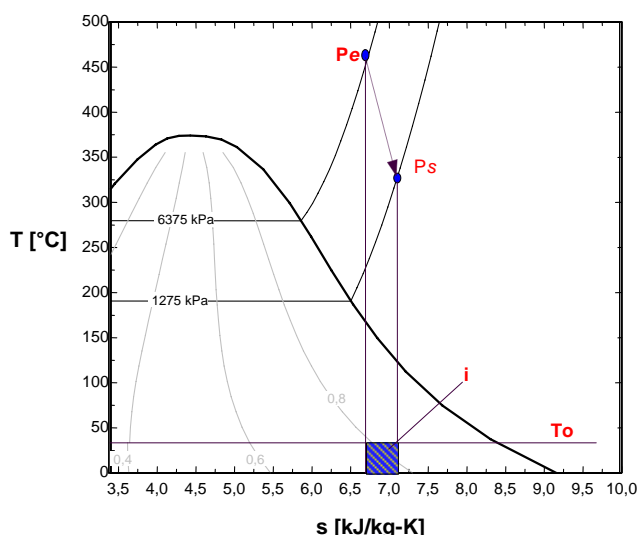


Figura 2. Exemplo de gráfico do processo adiabático de redução de pressão por estrangulamento.

$$\varepsilon_e = \varepsilon_s + i \quad (3)$$

Onde:

- $\varepsilon$  : Exergia de fluxo específica.
- $i$  : Irreversibilidade do processo.

A irreversibilidade (destruição da exergia  $\varepsilon$ )  $i$  entre a entrada,  $e$ , e saída,  $s$ , da ocorre essencialmente devido ao atrito.

### 1.2. – Estado da arte

Na literatura disponível, existem várias proposições isoladas de substituição de válvulas redutoras de pressão por turbinas. Todos os estudos mostram que a substituição proporciona vantagens no aproveitamento da energia disponível. Entretanto, a literatura disponível deixa a desejar em termos de um estudo geral e conclusivo sobre as vantagens dessa substituição.

CÉSAR (2004), propõe a substituição de uma válvula redutora de pressão por um turboexpansor para as instalações de um processo de craqueamento catalítico fluido para produção de gasolina de alta octanagem e gás liquefeito de petróleo (GLP) da PETROBRÁS. O resultado das análises energética e exergética mostra que a maior parcela de perda do total no processo, 21,57%, está na redução de pressão isoentálpica da válvula. Com o sistema de cogeração, as perdas totais por irreversibilidade caem de 53,60% para 32,50%. CÉSAR (2004) conclui que a troca é bastante interessante do ponto de vista de otimização exergética.

A CEMIG (2003) desenvolveu um estudo para aplicar a cogeração a partir do aproveitamento do vapor gerado no processo de ustulação da COMPANHIA MINEIRA DE METAIS. O trabalho propõe a substituição de uma válvula redutora de pressão por uma turbina de extração, garantindo o vapor necessário ao processo. A relação custo benefício calculada foi de 0,63.

MAIURI (2001) desenvolveu uma comparação de um ciclo Rankine com válvula redutora de pressão, implementado em uma usina de biomassa com a simulação de um ciclo combinado para essa mesma usina retirando a válvula e concluiu que os investimentos técnico e econômico são viáveis.

Apesar da substituição de válvulas redutoras de pressão por turbinas indicar vantagens no aproveitamento da energia, esse é um estudo que requer a análise pela Segunda Lei da Termodinâmica. Esse tipo de análise não é muito difundido em práticas industriais. Além disso, as válvulas são equipamentos simples, de fácil aplicação em relação ao uso de turbinas.

Outros trabalhos sobre análise exergética e cogeração em indústrias de papel e celulose podem ser encontrados em SILVEIRA (1990), WALL (1996) e SILVA (2002).

## 2 – OBJETIVO

Elaborar e comparar os resultados de balanços energético e exergético em processos de estrangulamento de uma indústria de celulose e fazer uma análise técnica e econômica preliminar de um possível sistema adicional de cogeração nessa indústria.

### 3 – DESENVOLVIMENTO

Foi desenvolvido um estudo para a fábrica de celulose CENIBRA, localizada em Belo Oriente, MG, onde é proposta a substituição de válvulas redutoras de pressão por uma turbina viabilizando a produção de energia com cogeração, posto que o processo de fabricação da celulose necessita de vapor superaquecido em dois níveis de pressão. A geração do vapor ocorre na própria fábrica de celulose na área de utilidades.

#### 3.1. – Válvulas redutoras de pressão na fábrica

Na indústria analisada, o departamento de utilidades é dividido em duas áreas distintas. São utilizadas cinco válvulas redutoras de pressão, cuja nomenclatura técnica industrial PRV – *pressure reducer valve* – será mantida neste trabalho. Duas na área 1: a PRV1 que reduz vapor de 65 kgf/cm<sup>2</sup> para 13 kgf/cm<sup>2</sup> e a PRV2 que reduz vapor de 65 kgf/cm<sup>2</sup> para 4 kgf/cm<sup>2</sup> e três na área 2 que, além de ter também uma PRV1 e uma PRV2, tem uma PRV3 que reduz vapor de 13 kgf/cm<sup>2</sup> para 4 kgf/cm<sup>2</sup>. As válvulas PRV1 e PRV2 das áreas 1 e 2 foram analisadas no presente trabalho. A utilização da válvula PRV3 da área 2 é muito inferior comparada com a utilização das demais, portanto essa válvula não será considerada.

O volume de controle para cada válvula redutora de pressão engloba o dessuperaquecedor localizado logo após a PRV, devido ao fato de que os dados disponíveis são de valores medidos na entrada da PRV e na saída do dessuperaquecedor, desconhecendo-se, portanto, o estado do vapor na saída da PRV. A Figura 3 mostra o volume de controle considerado para balanços de massa, energia e exergia nas válvulas redutoras de pressão.

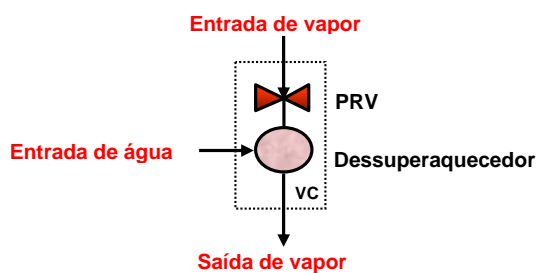


Figura 3. Volume de controle nas válvulas.

Entretanto, a análise de outros dessuperaquecedores existentes na planta mostram que sua eficiência energética e exergética são da ordem de 97% e 95% respectivamente, indicando que a perda de energia e a destruição de exergia do dessuperaquecedor são quase nulas, devido ao fato de que ele é um equipamento praticamente adiabático e isobárico.

Para a análise energética, fez-se:

$$\dot{E}_e = \dot{m}_{ve} * h_{ve} + \dot{m}_{ae} * h_{ae} \quad (4)$$

$$\dot{E}_s = \dot{m}_{vs} * h_{vs} \quad (5)$$

Onde:

$\dot{E}$  : Energia.

$\dot{m}$  : Vazão mássica.

Os índices *v* e *a* indicam vapor e água, respectivamente.

No balanço exergético, utilizou-se a Equação 6 para o fluido nos três pontos: entrada da válvula e entrada e saída do dessuperaquecedor

$$\dot{\epsilon} = \dot{m} * (h - h_o - T_o * (s - s_o)) \quad (6)$$

Onde:

*s* : Entropia específica.

*T* : Temperatura.

O índice *o* indica o estado ambiente.

As eficiências energética  $\eta$  e exergética  $\psi$  são calculadas, respectivamente, a partir das Equações 7 e 8.

$$\eta = \frac{\dot{E}_s}{\sum \dot{E}_e} \quad (7)$$

$$\psi = \frac{\dot{\epsilon}_s}{\sum \dot{\epsilon}_e} \quad (8)$$

#### 3.2. – Metodologia para coleta de dados

Foi definido que os dados seriam coletados diretamente dos instrumentos utilizados internamente pela CENIBRA para controle e monitoramento dos processos, proporcionando uma análise real da situação atual.

Foram escolhidos 05 dias para coleta de dados do processo na fábrica da CENIBRA através de medição no local com o uso de instrumentos dispostos ao longo das linhas. A calibração desses instrumentos é esporádica. Dessa forma, erros de medição são esperados.

As leituras dos instrumentos de pressão, temperatura e vazão foram disponibilizadas através de relatórios gerados pelo sistema de controle interno da CENIBRA. Para aqueles dados não disponíveis nos relatórios, foram feitas leituras diretamente na tela de controle dos processos na CENIBRA a cada duas horas.

As operações de equipamento e processo foram consideradas em regime permanente; as variações de energias cinética e potencial e a perda de carga foram consideradas desprezíveis onde aplicável.

Para realização dos cálculos, foi feita uma programação englobando todas as equações utilizadas em cada ponto analisado. O software utilizado para resolução das equações foi o EES – Engineering Equation Solver © 1992-2004 S.A. Klein Academic Commercial V7.171, disponibilizado pelo DEMEC/UFGM.

Os valores utilizados para os cálculos é uma média aritmética considerando todas as medições realizadas durante o período determinado para coleta.

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores das eficiências das válvulas redutoras de pressão, obtidos a partir dos balanços energético e exergético são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Eficiências energética e exergética das válvulas redutoras de pressão (PRV).

	Eficiência Energética ( $\eta$ )	Eficiência Exergética ( $\psi$ )
PRV1 - Área 1	0,99	0,65
PRV2 - Área 1	0,99	0,52
PRV1 - Área 2	0,99	0,65
PRV2 - Área 2	0,85	0,53

Apesar do valor elevado da eficiência energética das válvulas redutoras de pressão, que são consideradas isoentálpicas, a degradação da energia aparece no balanço qualitativo.

A soma das irreversibilidades das PRVs 1 e 2 de ambas as áreas é de 8.528,2 kW, conforme Tabela 2. Considerando que na prática não será utilizada toda essa exergia disponível devido à fatores como gastos internos, perdas para o ambiente, desconta-se 10% desse valor e, ainda assim é possível propor uma nova configuração para o sistema, substituindo as quatro PRVs em questão por uma turbina de pequeno porte para cogeração de energia elétrica com duas extrações de vapor em dois níveis de pressão.

Tabela 2. Irreversibilidades nas válvulas.

	Irreversibilidade (kW)
PRV1 - Área 1	545,4
PRV2 - Área 1	6.901,0
PRV1 - Área 2	230,6
PRV2 - Área 2	851,2

A Figura 4 exemplifica a nova configuração. Nesse caso, as válvulas não devem ser removidas do sistema. Sua utilização deve ser feita em casos de emergência, quando a turbina estiver em manutenção. Partindo dessa avaliação, foi cotada uma turbina com potência de 8 MW, para análise da viabilidade econômica da proposta de cogeração.

O fabricante ofertou uma turbina a vapor de contra-pressão, entrada do vapor de 65 kgf/cm<sup>2</sup> a 720 K e duas extrações. Uma extração de 13 kgf/cm<sup>2</sup> a 469 K e outra de 4 kgf/cm<sup>2</sup> a 438 K.

Além da turbina, foi incluso no preço do pacote ofertado: gerador síncrono tipo brushless, redutor de velocidade e painéis elétricos.

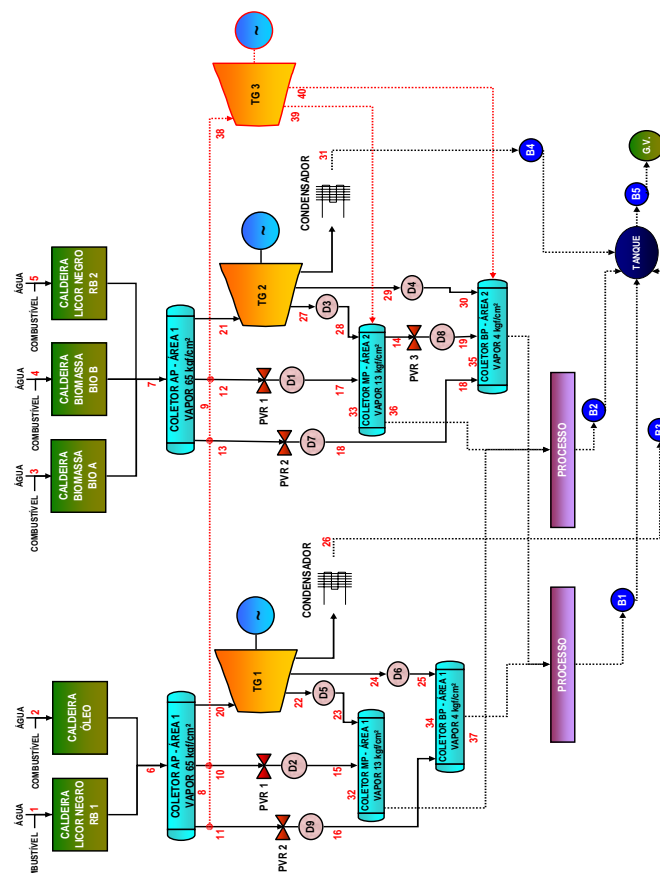


Figura 4. Fluxograma simplificado.

4.1. – Análise da viabilidade econômica

A economicidade de uma determinada alternativa energética é verificada por índices econômicos tais como o valor presente líquido, o valor anual uniforme, o valor anual líquido, o tempo de retorno e a taxa interna de retorno de capital, que quantificam a atratividade do investimento.

A taxa interna de retorno foi o critério escolhido para análise da viabilidade econômica da nova configuração proposta, pois, ele é interessante para projetos com custos e benefícios que se estendem por toda a vida útil do projeto, além de definir com facilidade o valor mínimo do kWh da concessionária que torna o projeto atraente durante o seu período de vida útil. A taxa interna de retorno é a taxa de juros que zera o valor presente líquido do empreendimento (VPL). O VPL é o somatório de todos os benefícios e custos existentes em qualquer instante de tempo ao longo da vida útil do projeto considerados no instante definido como inicial do empreendimento. Em um fluxo de caixa, os benefícios são considerados positivos e os custos negativos conforme a Figura 5.

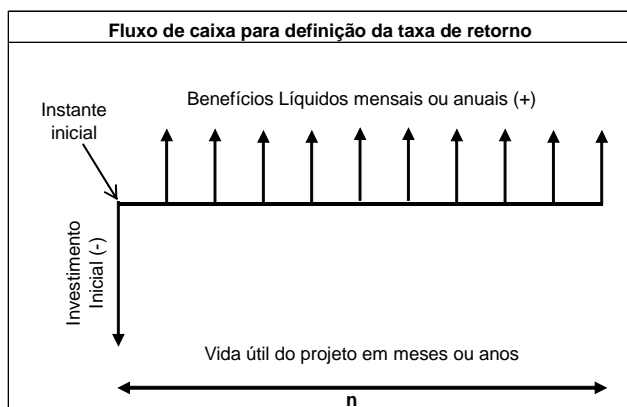


Figura 5. Fluxo de caixa.

O VPL é definido conforme Equação 9. Fazendo  $VPL=0$ , tem-se a equação para cálculo da taxa interna de retorno.

$$VPL = B * \frac{(1 + i_{ti})^n - 1}{i_{ti} * (1 + i_{ti})^n} - Inv \quad (9)$$

Onde:

- B : Benefício líquido.
- $i_{ti}$  : Taxa interna de retorno de empreendimento.
- n : Vida útil do projeto em anos.
- Inv : Investimento inicial.

A Tabela 3 detalha os principais itens considerados para cálculo da viabilidade econômica da instalação.

Tabela 3. Considerações para cálculo da taxa de retorno.

Descrição	Unidade	Valor
$N_h$	h/ano	8.760
$\dot{W}_t$	kW	8.000
$C_{ic}$	-	0,1
$C_{er}$	USD/kWh	$7,47 \times 10^{-2}$
$T_{US}$	USD/kWmês	6,24
$C_{ee}$	USD/kWh	$3,77 \times 10^{-2}$
t	-	0,20
n	anos	10
$F_d$	-	0,99
$C_b$	USD/ano	1.500,00
Turbina e acessórios	USD	1.350.000,00
Transporte do equipamento	USD	5.280,00
Montagem mecânica e Obra civil	USD	113.481,00

Onde:

- $N_h$  : Número de horas de funcionamento ao ano.
- $\dot{W}_t$  : Potência instalada em kW fornecida pelo gerador da turbina.
- $C_{ic}$  : Consumo interno da turbina.
- $C_{er}$  : Custo da energia comprada da rede.
- $T_{US}$  : Tarifa de uso dos sistemas de distribuição e transmissão.
- $C_{ee}$  : Custo da energia comprada da concessionária.
- t : Alíquota do imposto de renda.
- $F_d$  : Fator de operação.
- $C_b$  : Custo de operação e manutenção anual.

Considerou-se como investimento inicial (Inv), a soma do custo da turbina e acessórios, transporte do equipamento, montagem mecânica e obra civil. O custo de manutenção, operação e energia de *back up* são considerados custos anuais da planta ( $C_b$ ). Para cálculo do custo da energia de *back up*, que corresponde ao custo da energia comprada da concessionária para utilização nos períodos em que a turbina estiver em manutenção, foi considerada a Equação 10:

$$C_{eb} = N_h (1 - F_d) \dot{W}_t (1 - C_{ic}) C_{ee} (12 W_t * T_{US}) N_h \frac{(1 - F_d)}{1314} \quad (10)$$

Onde:

- $C_{eb}$  : Custo da energia de *back up*

O benefício bruto (Bb), onde o principal fator é o custo evitado da compra de energia elétrica, é calculado conforme a Equação 11.

$$B_b = N_h * \dot{W}_t * (1 - C_{ic}) * C_e \quad (11)$$

Onde

- $C_e$  : Valor do kWh gerado.

O benefício líquido (B) é definido na Equação 12.

$$B = B_b - C_b - IR \quad (12)$$

Onde:

- IR: imposto de renda pago

O imposto de renda pago é definido na Equação 13.

$$IR = \left( N_h * \dot{W}_t * (1 - C_{ic}) * C_{er} - C_b - \frac{Inv}{n} \right) * t \quad (13)$$

Logo, a equação da taxa de retorno pode ser escrita como:

$$\left(N_h * \dot{W}_t * (1 - C_{ic}) * C_e - IR - C_b\right) * \frac{(1 + i_{ti})^n - 1}{i_{ti} * (1 + i_{ti})^n} - Inv = 0 \quad (14)$$

A Equação 14 foi utilizada para cálculo da taxa de retorno considerando os valores detalhados na Tabela 3. Os valores da turbina e acessórios, transporte do equipamento, montagem mecânica e obra civil foram obtidos através de cotações no mercado. Os valores do custo médio de energia elétrica da concessionária, manutenção e operação foram obtidos junto à CENIBRA e os demais valores foram estimados a partir da literatura.

O gráfico da Figura 6, representa os resultados da análise. O custo específico da energia no eixo das ordenadas, corresponde ao retorno do investimento em 10 anos, com a taxa de retorno anual representada no eixo da abscissa. O ponto ótimo do gráfico vai ser aquele que satisfaz as diretrizes internas da empresa.

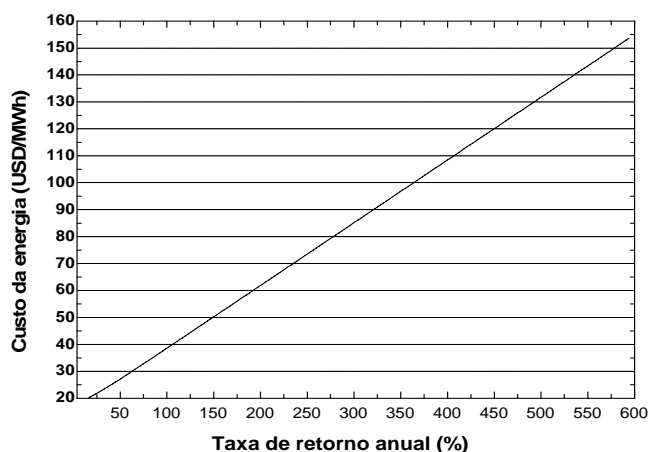


Figura 6. Gráfico: Custo da energia x Taxa de retorno anual.

## 5 – CONCLUSÃO

As perdas exergéticas devido às quedas de pressão nas válvulas são muito altas, correspondendo a 10% do valor médio da potência gerada pelos turbogeradores 1 e 2, atualmente em operação na CENIBRA. Esta constatação levou à proposição de co-geração pela substituição das válvulas por uma turbina de contra-pressão. Uma análise econômica preliminar aponta para um rápido retorno do investimento inicial.

Considerando uma taxa interna de retorno anual igual a 19,5% e o custo da energia de USD 74,7/MWh, o retorno do investimento aconteceria em 6,8 meses. Entretanto, uma análise financeira mais apurada é requerida antes de uma decisão pelo investimento, considerando todas as estratégias e aspectos financeiros internos da empresa. O fato da CENIBRA ser auto-suficiente em energia elétrica, exige uma análise de um cenário de venda da energia elétrica produzida.

## REFERÊNCIAS

- BALESTIERI, J. A. P. – Cogeração – geração combinada de eletricidade e calor. Primeira edição. Editora da UFSC. Florianópolis, SC. 2002.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. – Thermal Design and Optimization. Editora John Wiley & Sons, INC. Estados Unidos. 1996.
- CEMIG. Síntese de Projeto, PACDEE, ciclo 2002-2003. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/>. Acesso em: 29 jan. 2005.
- CENIBRA. Disponível em: <http://www.cenibra.com.br/>. Acesso em: 20 ago. 2004.
- CÊSAR, P. C. – Análises energética e exergética de um sistema térmico com e sem cogeração. Dissertação de mestrado. Escola Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2004.
- GAMSET. Cogeração na Indústria de Cimento. [S.l.]. 2003.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Uso de energia na indústria: racionalização e otimização: Co-geração. [S.l.]. [199-]
- JÚNIOR, L. V. – Co-geração – Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação Energética: Estudo de caso Aplicado a Indústria de Papel e Celulose. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 1999.
- KOTAS, T. J. – The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Second edition. Editora Krieger Publishing Company. Estados Unidos. 1995.
- MAIURI, D. R. – A regionalização da geração de energia como fator de desenvolvimento: o caso da região de Itapeva, SP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, SP. 2001.
- SILVA, J. da – Análise termoeconômica do processo de geração de vapor e potência do segmento de celulose e papel. Dissertação de mestrado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá, MG. 2002.
- SILVEIRA, J. L. – Estudo de sistema de co-geração aplicado a fabricação de papel e celulose. Dissertação de mestrado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá, MG. 1990.
- WALL, G. – Exergy flows in industrial processes. Suécia, 1996.
- WARK, K.; RICHARDS, E. – Thermodynamics. Sixth edition. Editora WCB McGraw-Hill. Estados Unidos. 1999.
- WYLEN, V.; SONNTAG; BORGNAKKE – Fundamentos da Termodinâmica. Tradução da 5ª edição americana. Editora Egard Blücher Ltda. São Paulo, SP. 1998.