

# OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COGERAÇÃO EM UMA USINA DE AÇUCAR E ÁLCOOL

**João Antonio Pazian**

UNESP - Universidade Estadual Paulista  
UNESP/FEB/DEE, CP 473, CEP 17033-360  
E-mail: [pazian@netsite.com.br](mailto:pazian@netsite.com.br)

**Prof. Dr José Ângelo Cagnon**

UNESP - Universidade Estadual Paulista  
UNESP/FEB/DEE, CP 473, CEP 17033-360  
E-mail: [jacagnon@feb.unesp.br](mailto:jacagnon@feb.unesp.br)

**Resumo.** Com as transformações que o setor de energia elétrica do Brasil vem sofrendo, principalmente a partir de 1995 com o início das privatizações, as usinas de açúcar e álcool ganharam destaque em função do potencial de geração de energia elétrica excedente para comercialização através da cogeração. Para que todo o potencial das usinas seja explorado, são necessárias uma renovação e otimização do processo produtivo com aplicação de tecnologias mais eficientes. O objetivo do trabalho é uma análise técnica e econômica da substituição de turbinas a vapor por motores elétricos, em uma usina de açúcar e álcool com capacidade de moagem de 1.500 toneladas de cana por hora. As turbinas a serem substituídas por motores elétricos são de contrapressão e simples estágio com vapor de alimentação à pressão de 2,06 Mpa, temperatura de 300 °C e escape à pressão de 0,15 Mpa, temperatura de 130 °C. As turbinas em questão são de simples estágio e baixo rendimento. A troca por motores elétricos permite direcionar o vapor antes utilizado nestas turbinas para turbinas de multi-estágios de maior rendimento, acopladas a geradores. Em função do maior rendimento das turbinas que serão utilizadas nos geradores, a energia elétrica gerada será suficiente para alimentar os motores que irão substituir as turbinas existentes e disponibilizar excedente para comercialização.

**Palavras-chave:** cogeração, cana de açúcar, bagaço.

## 1. INTRODUÇÃO

No setor sucroalcooleiro a cogeração não é técnica recente. Há várias décadas, em função de ser um grande consumidor de vapor a baixa temperatura (utilizado no processo produtivo do açúcar e do álcool), a cogeração vem sendo utilizada em larga escala. O bagaço da cana é queimado em caldeiras gerando vapor a alta pressão (2,06 MPa, 4,12 MPa por exemplo) e através de turbinas de contrapressão gera energia mecânica e elétrica, utilizando o vapor de saída das turbinas a baixa pressão (0,15 MPa) no processo de produção de açúcar e álcool.

A partir de 1979, com estudos iniciados pela Companhia Paulista de Força e Luz (Crestani, 1993), a cogeração no setor sucroalcooleiro ganhou importância em função do potencial para geração de energia elétrica excedente para venda as concessionárias. O primeiro contrato para venda de excedente de energia elétrica foi realizado em 1987 (Souza, 1987) com uma previsão de fornecimento de 6 a 10MW/h por dia pela Usina São Francisco de Sertãozinho a Companhia Paulista de Força e Luz.

Estudos realizados em 1993, com investimentos para elevação da pressão primário do vapor de 2,06 MPa (ainda usada na grande maioria das usinas de açúcar e álcool) para 6,08 MPa o excedente no Estado de São Paulo seria de 780 MW e com a evolução da técnica de gaseificação poderá chegar a 3000 MW a partir de 2010 (Crestani, 1993).

Segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2002 (ANEEL, 2002) o potencial de cogeração de excedentes de energia elétrica no setor sucroalcooleiro é de 3.851 MW, considerando tecnologias eficientes e disponíveis comercialmente no Brasil.

Com a perspectiva da técnica de gaseificação de biomassa e otimização do consumo de vapor no processo produtivo, o potencial de cogeração é ainda maior. O uso do sistema BIG/GT (Gaseificação de Biomassa Integrada com Turbina a Gás) e otimização do consumo de vapor para 280 kg por tonelada de cana (média de 530 kg de vapor por tonelada de cana atualmente na maioria das usinas), podem elevar o excedente para 16.111 MW (Kitayama, 2003).

Com a desregulamentação e início das privatizações do setor de energia elétrica a partir de 1995, acompanhada de uma perspectiva de crise energética também a partir de 1995 (Souza, 2000), principalmente na região Sudeste, o setor sucroalcooleiro tem se mostrado uma alternativa economicamente viável como investimento. Em função deste cenário, o investimento na otimização do processo de produção de açúcar e álcool visando disponibilizar maior quantidade de vapor para produção de energia elétrica, tem se tornado atraente impulsionando novas tecnologias.

As turbinas a vapor utilizadas nas usinas de açúcar e álcool para acionamento de moendas, bombas, exaustores, etc., na quase totalidade são de simples estágio e baixo rendimento, não ultrapassando 55% nas melhores situações. Portanto, a substituição das referidas turbinas consiste em um grande potencial de conservação de energia.

O objetivo deste trabalho é uma análise técnica e econômica do ganho energético proporcionado pela elevação da pressão primária de caldeiras e substituição de todas as turbinas a vapor de simples estágio (baixo rendimento) de acionamentos mecânicos (moendas, bombas de água, compressores de ar e exaustores de caldeira) por motores elétricos. Para acionamento dos motores adota-se conversores de freqüência onde é necessária variação de velocidade (moendas) e chaves de partida tipo soft start para equipamentos co velocidade fixa. O vapor antes utilizado nestas turbinas será destinado a turbinas multi-estágio com rendimentos que podem superar 75%, acionando geradores e permitindo cogerar energia elétrica para comercialização.

Para a análise técnica e econômica serão simuladas as seguintes situações:

- ✓ Substituindo-se as turbinas a vapor por motores elétricos, mantendo as caldeiras existentes (Pressão de operação 2,06 MPa).
- ✓ Substituindo-se as turbinas a vapor por motores elétricos e Elevando-se a pressão primária das caldeiras para a pressão de 6,28 MPa e temperatura de 480 °C. Nesta condição, considera-se também a substituição das turbinas e geradores existentes.

## 2. COGERAÇÃO

Cogeração é definida como sendo a geração simultânea a partir de uma fonte primária de energia (bagaço de cana, cavaco de madeira, óleo combustível, gás, palha de arroz, etc) de energia elétrica ou mecânica e energia térmica. É uma técnica que permite uma maior utilização da disponibilidade termodinâmica dos combustíveis. Divide-se normalmente em dois tipos de ciclo: topping e bottoming.

### 2.1. Cogeração Ciclo Topping

Este tipo de co-geração é o mais comum, consiste na utilização do combustível para produção de energia elétrica ou mecânica e o calor residual é utilizado em um processo produtivo (Fig. 1). É típico das usinas de açúcar e álcool.

## 2.2. Cogeração Ciclo Bottoming

Neste caso, a energia do combustível é utilizada diretamente no processo produtivo (Siderúrgicas, produção de vidro, refratários, cimento) que por sua vez apresenta calor residual de alta temperatura permitindo gerar energia elétrica ou mecânica através de uma caldeira de recuperação (Fig. 2).

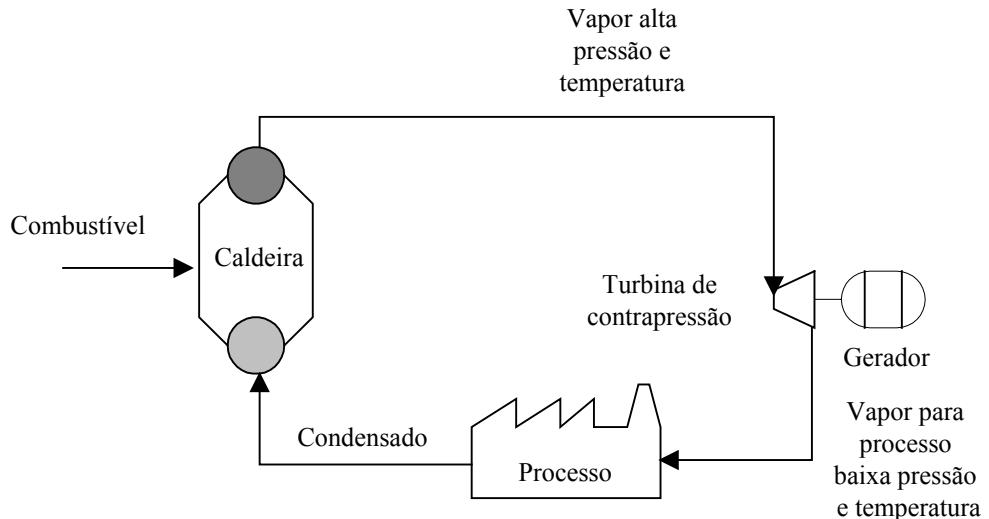


Fig. 1. Cogeração Ciclo Topping

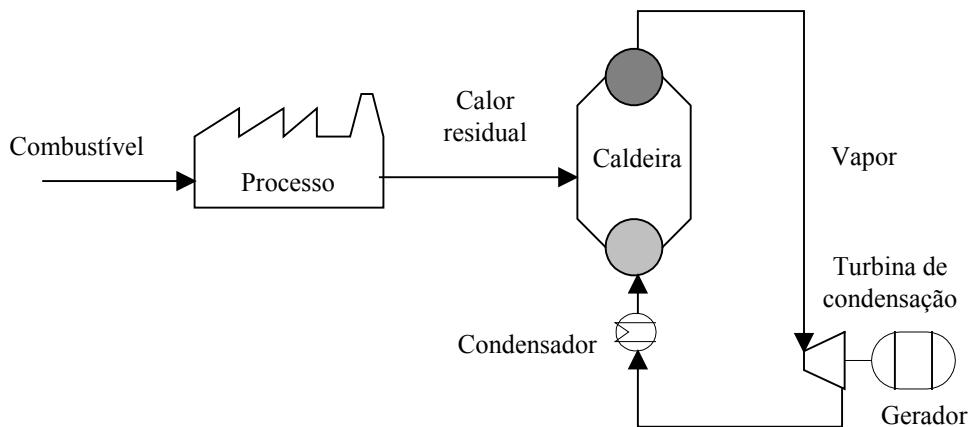


Figura 2. Cogeração Ciclo Bottoming

## 3. DESENVOLVIMENTO

### 3.1. Características da Indústria Base para Estudos

O trabalho foi desenvolvido na Usina da Barra S.A. – Açúcar e Álcool, localizada no município de Barra Bonita, estado de São Paulo, Brasil, cujas principais características de produção e operação são apresentadas na Tab. (1) e esquematicamente na Fig. (3), o fluxograma da distribuição de vapor de alta pressão.

A indústria possui uma central de geração de energia elétrica, permitindo auto-suficiência durante o período de safra (maio a dezembro). Durante o período de entressafra (janeiro a abril) a

energia elétrica consumida é 100% comprada da concessionária (CPFL), período em que a central de geração não está operando.

Tabela 1. Características da Usina da Barra S. A

Descrição	Capacidade
Moagem de cana	36.000 t/dia
Produção de açúcar	60.000 sacos de 50 kg/dia
Produção de álcool	1.800 m <sup>3</sup> /dia
Produção de vapor	800 t/h
Produção de energia elétrica	19.000 kW

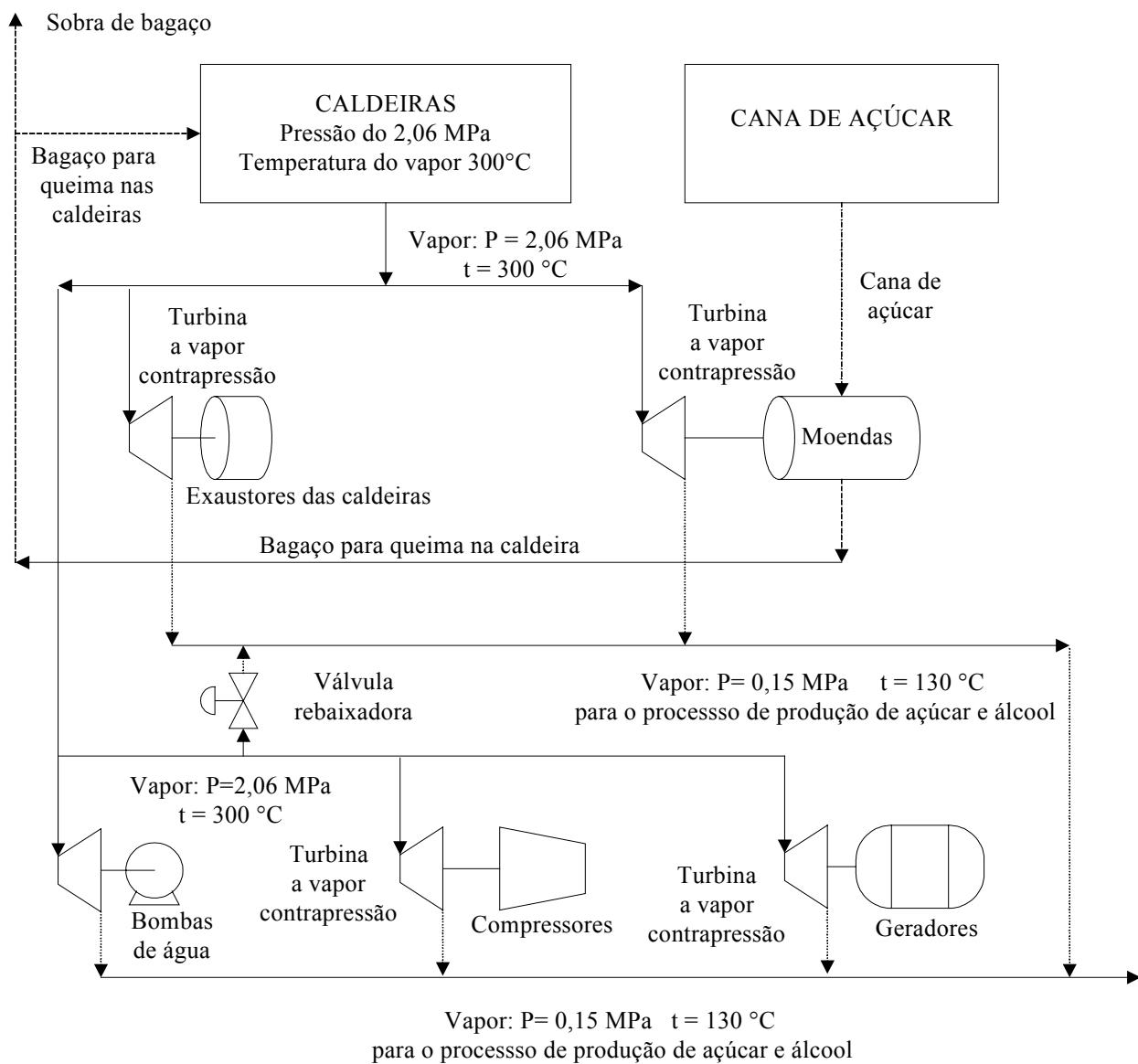


Figura 3. Fluxograma da distribuição de vapor

### 3.2. Determinação do Excedente de Energia Elétrica

A Figura (4) apresenta esquematicamente o fluxograma do vapor de alta pressão com as turbinas a vapor substituídas por motores elétricos. Todo vapor produzido destina-se à produção de energia

elétrica. Considera-se somente o período de safra para a determinação do excedente de energia elétrica disponível para comercialização.

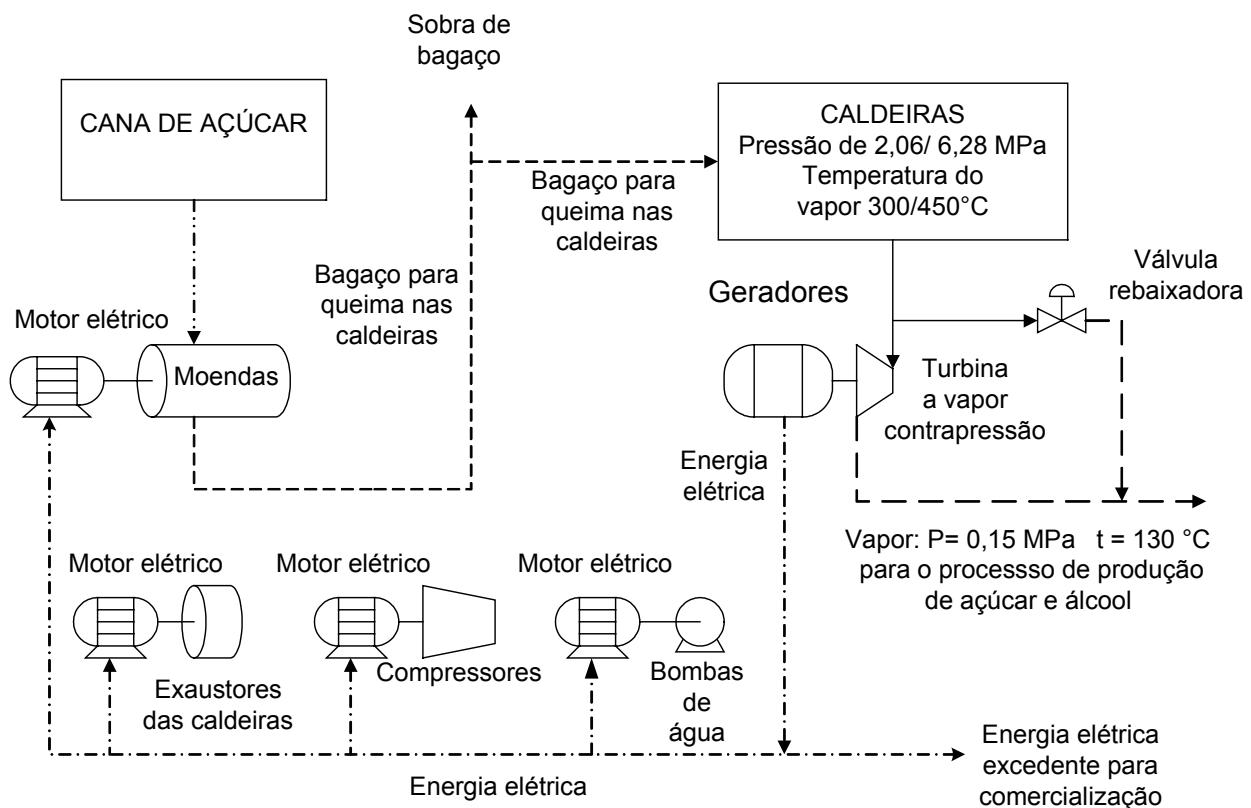


Figura 4. Fluxograma do vapor com as turbinas substituídas por motores elétricos

Para análise do proposto no trabalho tem-se como materiais dados obtidos de boletins da safra 2002/2003, utilizados para acompanhamento e controle do processo produtivo Tab. (2) e medições realizadas pela empresa NG Turbinas (Piracicaba-SP) que apresentam as potências e vazões de vapor das turbinas que serão substituídas por motores elétricos Tab. (3).

Considera-se para a determinação do excedente de energia elétrica para comercialização o período de safra, que foi realizado em 197 dias (4.278 h). A determinação das vazões de vapor das turbinas a serem substituídas por motores elétricos é feita adotando-se o aproveitamento médio da capacidade de moagem de 85%.

A capacidade de geração/consumo de energia elétrica em função do vapor determina-se através da Eq. (1).

$$(kWh) = \frac{Vazão(kgvapor)}{cons.específico(kgvapor / kwh)} \quad (1)$$

Da Tabela 3, tem-se que em função da substituição das turbinas por motores elétricos serão acrescidos 32.776 kW ao sistema elétrico da usina, ou seja, a mesma potência das turbinas a vapor. Esta potência representa um consumo de 131.720.189 kWh para o período de safra.

Também da Tab. (3) temos que a vazão total de vapor das turbinas a serem substituídas por motores elétricos é de 579.120 kgv/h, o que representa um consumo de 2.327.367 t de vapor para o período de safra. Este total de vapor é utilizado para a determinação do excedente de energia elétrica disponível para comercialização, apresentado na Tab. (4).

Tabela 2. Dados da safra 2002/2003

Safra 2002/2003	
Descrição	Total
Cana moída	5.617.520 t
Bagaço produzido	1.347.000 t
Bagaço consumido	1.276204 t
Sobra de bagaço	70.796 t
Vapor produzido	3.204.000 t
Vapor consumido nas turbinas propostas para substituição por motores elétricos	2.327.367 t

Tabela 3. Resumo das potências e vazões de vapor das turbinas propostas para a substituição por motores elétricos

Local da instalação	Potência nominal kW	Potência consumida kW	Vapor	
			Consumo específico kgv/kW	Vazão kgv/h
Bombas de água-Lavagem da cana de açúcar	2.208	1.940	18,30	35.500
Bombas de água-Torre de resfriamento-Fabricação	4.416	2.445	17,90	43.770
Moenda A	15.640	8.512	17,05	145.130
Moenda B	11.592	7.000	17,86	125.020
Moenda C	16.008	9.252	17,08	158.020
Exaustores das caldeiras AT 150	3.312	2.430	17,90	43.500
Bombas de água das caldeiras AT 150	900	729	23,57	17.180
Bombas de água das caldeiras GB 2100	662	398	22,60	9.000
Central de ar comprimido	74	70	28,50	2.000
<b>TOTAL</b>	<b>54.812</b>	<b>32.776</b>	<b>17,67</b>	<b>579.120</b>

Tabela 4. Excedentes de energia elétrica com a substituição das turbinas por motores elétricos

Descrição	Pressão das Caldeiras (MPa)	
	2,06	6,28
Vapor para geração de energia elétrica disponível pela substituição de turbinas a vapor por motores elétricos (kgv)	2.327.367.000	2.327.367.000
Consumo específico de vapor (kgv/kWh) das turbinas dos geradores a serem instalados	10	7,5
Capacidade de geração de energia elétrica (kWh) com o vapor das turbinas substituídas por motores elétricos	232.736.700	310.315.600
Consumo (kWh) dos motores que substituirão as turbinas a vapor	131.720.189	131.720.189
Energia elétrica (MWh) disponível para comercialização por safra	101.017	178.595
Energia elétrica (MWh) disponível para comercialização por safra em função da substituição das turbinas e geradores existentes		42.478
<b>Total de energia elétrica para comercialização (MWh)</b>	<b>101.017</b>	<b>221.073</b>

### 3.3. Investimentos Necessários

Na Tabela 5 são apresentados de forma resumida os investimentos necessários para as duas situações propostas (pressão das caldeiras 2,06 e 6,28 MPa). Os custos de equipamentos são de mercado tendo como referência o ano de 2003.

Tabela 5. Investimentos necessários para cada pressão

DESCRIÇÃO	CUSTO R\$ Mil	
	Pressão 2,06 MPa	Pressão 6,28 MPa
Caldeiras	0,00	48.000,00
Rede de distribuição vapor	0,00	1.040,00
Motores elétricos	4.186,00	4.186,00
Conversores de freqüência e soft start	15.850,00	15.850,00
Turbo gerador	9.000,00	18.000,00
Recapacitação/Construção de Subestação 138kV	2.000,00	4.500,00
Obras civis	1.500,00	4.000,00
Instalações e montagens	6.250,00	8.340,00
Estudos de Projeto e Engenharia	170,00	230,00
<b>TOTAL R\$</b>	<b>38.956,00</b>	<b>104.146,00</b>

### 3.4. Análise Financeira

Para análise do retorno do investimento será utilizado como referência a Operação-Programa para Projetos de Cogeração do Setor Sucroalcooleiro criada pelo BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (BNDES, 2004). O programa tem por objetivo financiar a implantação de projetos de co-geração de energia elétrica que utilizem resíduos de cana-de-açúcar e que destinem a venda de energia elétrica excedente às concessionárias de distribuição ou de comercialização de energia elétrica.

As principais características do programa são:

- ✓ **Clientes:** Usinas de açúcar e álcool localizadas em qualquer região do país.
- ✓ **Taxa de Juros:** Custo Financeiro + *Spread* Básico + *Spread* de Risco ou do Agente
- ✓ **Custo Financeiro:** TJLP - Taxa de Juros de Longo Prazo.
- ✓ **Spread Básico:** 1% ao ano
- ✓ **Spread de Risco:** No caso de operação direta com o BNDES, definido em função de cada projeto, variando de 0,5% a 4,625% ao ano.
- ✓ **Prazos:** Serão determinados em função da capacidade de pagamento do empreendimento, da empresa ou do grupo econômico, contemplando um período de carência que pode ser de até 6 meses após a conclusão do projeto, e um período de amortização de até 12 anos.
- ✓ **Nível de Participação:** Até 80% dos itens financiáveis

Os juros para análise do investimento serão compostos da seguinte forma:

- ✓ TJLP: 10 % ao ano
- ✓ Spread Básico: 1 % ao ano
- ✓ Spread de risco: 2,5% ao ano
- ✓ Total: 13,5 % ao ano

Como receita (R\$/MWh) serão simulados vários valores tomando-se como inicial o valor oferecido por algumas concessionárias R\$ 70,00 e final, o valor piso do PROINFA (Programa de

Incentivo a Fontes Alternativas de Energia) para venda à Eletrobrás através de leilões R\$ 110,54 (Perea, 2002).

São adotados dois métodos para análise do retorno financeiro: a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL). Para ambos os métodos adota-se um período de amortização de 10 anos. Os resultados são apresentados graficamente na Fig.(5) para a pressão e temperatura do vapor atuais (2,06 MPa e 300° C) e na Fig(6) com elevação da pressão das caldeiras para 6,28 Mpa e 480° C.

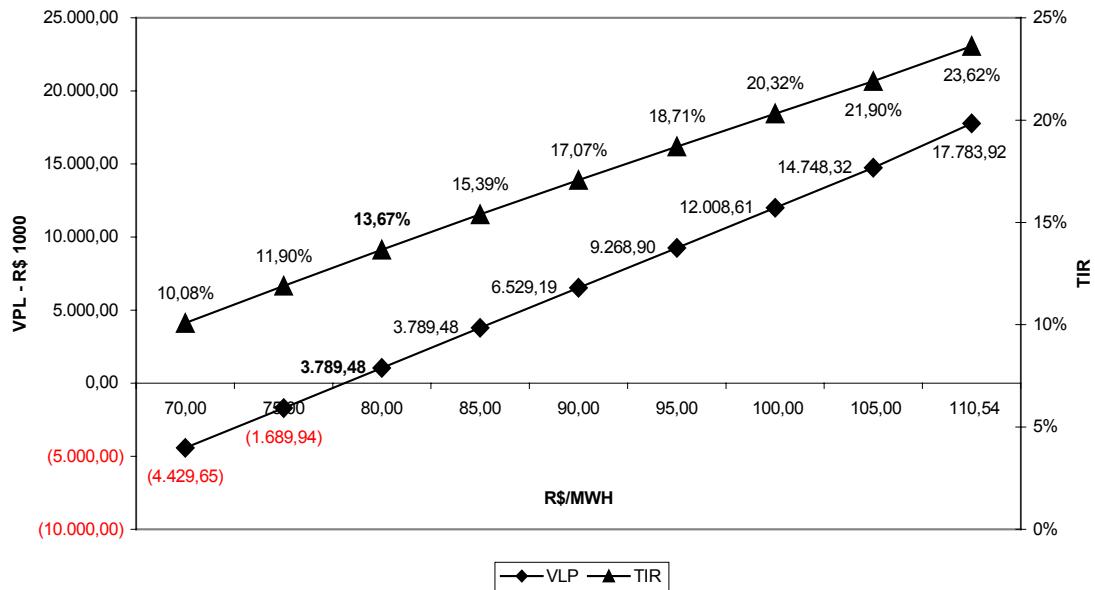


Figura 5. Análise financeira para a substituição das turbinas a vapor por motores elétricos e pressão das caldeiras de 2,06 Mpa.

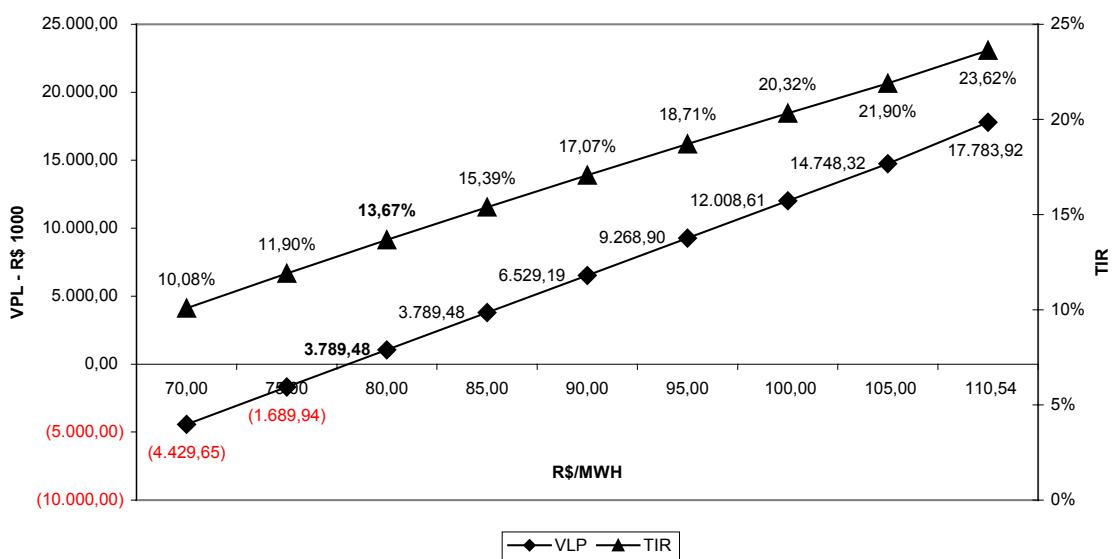


Figura 6. Análise financeira para a substituição das turbinas a vapor por motores elétricos e pressão das caldeiras de 6,28 Mpa

## 4. CONCLUSÕES

Do ponto de vista tecnológico, a alternativa de se manter a pressão de operação das caldeiras tem caráter meramente ilustrativo. Na grande maioria das usinas estas caldeiras estão em fim de vida útil e uma renovação buscando eficiência energética é uma necessidade dos dias de hoje. Embora a substituição das turbinas a vapor por motores elétricos seja uma alternativa eficiente energeticamente, isoladamente não permite aproveitar todo o potencial disponível para geração de excedente de energia elétrica.

Todo o potencial de cogeração do setor sucroalcooleiro está atrelado a uma renovação do seu parque industrial, buscando alternativas mais eficientes energeticamente. Neste trabalho são apresentadas duas delas (substituição de turbinas por motores e elevação da pressão das caldeiras), entre outras existentes.

Para os valores pagos pelas concessionárias atualmente, nenhuma das alternativas propostas apresenta-se como um investimento atraente, como mostras as Fig. (5) e Fig. (6). Para a primeira alternativa proposta, ou seja, substituir as turbinas por motores elétricos mantendo-se a pressão de operação das caldeiras (2,06 Mpa), o investimento só passa a ser viável com uma remuneração de R\$ 85,00/MWh, e na segunda, elevando-se a pressão das caldeiras para 6,28 Mpa a partir de R\$ 95,00/MWh.

Embora a alternativa de substituir as turbinas a vapor por motores elétricos, mantendo-se a pressão das caldeiras existentes apresente retorno do investimento mais rápido, não é a melhor alternativa por ser energeticamente menos eficiente, e a curto prazo seria necessária a substituição das caldeiras.

Este panorama demonstra que todo o potencial de cogeração existente no setor sucroalcooleiro depende também de uma prática de tarifas atraentes e mercado, que garantam a remuneração do investimento.

## 5. REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2002, Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2002, disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/index.html>, acesso em 22 de agosto de 2003.
- BNDS, 2004, Operação- Programa para Empreendimentos de Cogeração de Energia Elétrica a Partir da Cana-de-Açúcar, 2001, disponível em <http://www.bnDES.gov.br/produtos/financiamento/procana.asp>, acesso em 11 de janeiro de 2004.
- Kitayama O., 2003, Potencial de co-geração com resíduos da cana-de-açúcar – Sua compatibilidade com o modelo atual, disponível em [http://www.unica.com.br/files/palestras/potencial\\_cogeracao.pdf](http://www.unica.com.br/files/palestras/potencial_cogeracao.pdf), acesso em 09 de setembro de 2003.
- Crestani, S.C, 1993, Em São Paulo, 3000 MW de co-geração no setor sucroalcooleiro até o ano 2010. Revista Eletricidade Moderna, Editora Aranda, n.233, agosto, p.48-54, 1993.
- Perea, L.P., 2002, Venda de Energia Elétrica Excedente: Análise de Investimento para Uma Indústria Sucroalcoleira, Monografia, Especialização em Engenharia de Produção, pp. 30.
- Souza, J.R.A, 1987, O que as indústrias querem saber sobre co-geração. Revista Eletricidade Moderna, Editora Aranda, n.163, agosto, p.30.
- Souza, Z.J., e Burnquist, H.L., 2000, A Comercialização da Energia Elétrica Co-gerada pelo Setor Sucroalcooleiro. São Paulo, Editora Plêiade Ltda, pp. 35-39.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## OPTIMIZING OF THE PROCESS OF COGENERATION OF A SUGAR AND ALCOHOL MILL

**Abstract:** *With the changes the electric energy sector has been undergoing in Brazil, especially from 1995 with the beginning of the transfers of ownership to the private sector, the sugar and alcohol mills gained a prominent position due to the potential in generating exceeding electric energy for sale by means of cogeneration. For the whole potential of the mills to be exploited, there is a need of renewal and optimization of the productive process with the application of more efficient technology. The goal of this work is a technical and economical analysis for the replacement of steam turbines to electric motors in a sugar and alcohol mill with a milling capacity of 1,500 tons of sugar-cane per hour. The turbines to be replaced by electric motors are of counterpressure and single stage with steam to feed at a pressure of 2.06 MPa at a temperature of 300 °C, and outflow at a pressure of 0,15 MPa at a temperature of 130 °C. The turbines mentioned are single staged and of low yielding. The replacement for electric motors allows the directioning of the steam, once used in these turbines for multi-stage turbines of higher yielding, coupled to generators. Due to the higher yielding of the turbines that will be used in the generators, the electric energy generated will be enough to feed the motors that will replace the existing turbines and allow exceeding energy to be commercialized.*

**Keywords.** *cogeneration, sugar cane, bagasse.*