

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO GÁS NATURAL PARA DIFERENTES PROPÓSITOS EM DUAS USINAS SUCROALCOOLEIRAS PAULISTAS

Thales B. Uchôa, Marcos Hideo S. Mashiba, David J. Saran, Cassio Roberto M. Maia e Ricardo Alan V. Ramos
NUPLEN – Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia.
Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP – Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil, nº. 56, CEP 15385-000, Ilha Solteira, SP.
nuplen@dem.feis.unesp.br

Resumo. *O presente trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade da utilização de gás natural como combustível complementar em duas usinas sucroalcooleiras paulistas com diferentes propósitos. Uma delas, por estar localizada em uma região onde a demanda de bagaço pelas indústrias locais é intensa, tem como objetivo a utilização do gás natural como sendo uma forma de gerar excedente de bagaço destinado a comercialização; já a outra usina, por estar situada em uma região próxima a um complexo hidrelétrico, onde existem várias linhas de transmissão de energia elétrica, tem por objetivo a aplicação do gás natural para gerar excedente de eletricidade para venda à concessionárias. É realizado um estudo termodinâmico e termoeconômico das plantas adaptadas para o aproveitamento do gás natural, que envolvem modificações na configuração tradicional existente nas referidas usinas, para permitir o uso combinado de gás natural e bagaço de cana, incluindo a instalação de queimadores de gás nas caldeiras e/ou a instalação de uma turbina a gás e uma caldeira de recuperação e, por fim, os resultados obtidos são discutidos.*

Palavras chave: *energia, cogeração, gás natural, bagaço, usina sucroalcooleira.*

1. Introdução e Objetivos

O crescente aumento do consumo de energia mostrou a necessidade de um planejamento estratégico para promover uma maior diversificação da matriz energética brasileira, hoje ainda altamente dependente da hidroeletricidade. Diversos programas governamentais foram criados para promover a geração independente e descentralizada de energia, tais como o Programa Prioritário de Termoeletricidade (PPT) e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), sendo neste último incentivada a cogeração por meio da biomassa da cana de açúcar. No entanto, existe um grande descontentamento dos empresários do setor sucroalcooleiro com relação à remuneração para comercialização da energia cogerada por esta fonte, de modo que algumas usinas não tem se interessado em investir na geração de excedentes de energia para venda, preferindo comercializar o excedente de bagaço.

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade do uso do gás natural como combustível complementar em usinas sucroalcooleiras próximas ao gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol). Para tanto, serão analisadas as configurações baseadas em plantas de geração de vapor e potência de duas usinas de açúcar e álcool: a Usina Iracema e a Destilaria Pioneiros. A Usina Iracema privilegia a venda do bagaço excedente, por estar localizada em uma região onde sua demanda pelas indústrias locais é intensa. A Destilaria Pioneiros pretende comercializar o excedente de energia elétrica produzido, por situar-se próxima às linhas de transmissão, o que facilita a interligação com o sistema elétrico. Um estudo termodinâmico minucioso, bem como uma criteriosa análise da viabilidade técnica e econômica, são realizados para as duas configurações, as quais consideram algumas modificações das plantas tradicionais existentes nessas usinas para permitir o uso combinado do gás natural e do bagaço de cana para a geração de eletricidade e vapor necessários para os processos, possibilitando a comercialização do excedente de energia elétrica e/ou de bagaço.

2. Revisão da Literatura

Barreda Del Campo *et al.* (1998) estudaram o sistema de cogeração de uma usina sucroalcooleira que fornece excedentes de energia para a rede elétrica e calcularam as propriedades termodinâmicas dos diferentes fluxos do sistema, os balanços de massa, energia e exergia. Eles realizaram uma comparação das eficiências de primeira e segunda lei, mostrando a utilidade desta última na avaliação de um sistema real e como elemento importante para decisão de melhorias das plantas térmicas ao evidenciar os equipamentos de maiores irreversibilidades.

Carpio *et al.* (1999) apresentaram critérios de avaliação termodinâmica para sistemas de cogeração em usinas de açúcar, analisando dois sistemas de cogeração, um com turbina de contrapressão operando a 2,1 MPa e 300 °C e outro com turbina de extração-condensação operando a 8,0 MPa e 450 °C. Foi analisada também a possibilidade de utilização de combustíveis auxiliares para o período da entre-safra, usando palha de cana, eucalipto e gás natural. Além disso, foi determinado o custo de geração de eletricidade para cada caso. Os autores concluíram que o sistema com turbina de condensação e com duas extrações apresentou eficiência de 66,0 % contra 42,0 % do sistema de contrapressão, além de ter uma taxa de economia da energia do combustível de quase sete vezes. Como alternativas de geração fora da safra, o gás natural foi o combustível que apresentou o menor custo seguido pela palha de cana, se considerado custos de colheita e transporte inferiores a R\$ 25,00 por tonelada.

Corrêa Neto (2001) avaliou a viabilidade técnica e econômica de projetos de geração de energia elétrica utilizando

como combustível o bagaço, a palha e as pontas da cana-de-açúcar, como opção complementar à expansão do sistema elétrico brasileiro. A tecnologia analisada foi de geração termelétrica com ciclo combinado, operando em cogeração, integrado a sistemas de gaseificação de biomassa para a produção de gás combustível, com e sem adição de gás natural. A análise econômica foi feita através da modelagem e construção de curvas de economicidade do projeto, baseadas nos preços da energia elétrica, do gás natural e nos custos da biomassa.

Sánchez Prieto *et al.* (2001) apresentaram uma análise de custo exergético do sistema de cogeração da Usina Cruz Alta, no qual é enfatizada uma metodologia para a determinação experimental da eficiência do sistema, permitindo a definição do consumo de bagaço de cana da caldeira, através de balanços de massa, energia e exergia em cada componente do sistema térmico.

Leite (2003) apresentou propostas de ciclos de potência e de plantas de cogeração para especificação de uma central termelétrica para operar em ciclo combinado, utilizando como combustível o gás natural e o bagaço de cana excedente de usinas sucroalcooleiras. Foi determinada a melhor opção de central termelétrica, considerando o critério de mínimo custo por kWh de energia produzida, através de uma análise termoeconômica, com a avaliação dos custos exergéticos.

Sánchez Prieto (2003) realizou uma detalhada análise energética e exergética para determinar as eficiências de primeira e segunda lei da termodinâmica dos principais equipamentos de duas plantas de usinas sucroalcooleiras, bem como o consumo de combustível envolvido, além de alguns índices de desempenho típicos de sistemas de cogeração. Foram determinados os custos dos principais fluxos do sistema, considerando os custos como em uma instalação nova, com taxa de juros de 15% ao ano e um período de amortização de 15 anos. Foi avaliada a variação do custo de bagaço e sua influência nos custos dos fluxos da planta e dada ênfase na potência elétrica e nos índices de desempenho.

Jaguaribe *et al.* (2004) discutiram um caso real de investimento na ampliação do sistema de cogeração de energia na usina Japungu Agroindustrial S.A., considerando o preço sazonal do bagaço, os custos de geração de energia e levando-se em conta um período de 10 anos. Com o novo parque de cogeração a indústria se tornou auto-suficiente em energia, dispondo de 21.240 MWh para comercialização. Todavia, após a análise econômica efetuada, verificou-se que a melhor opção seria manter a planta na forma original e vender o bagaço a R\$ 26,00 por tonelada.

3. Metodologia

3.1. Análise Energética

A análise de sistemas e processos pela Primeira Lei da Termodinâmica baseia-se na conservação da energia e massa. As equações que representam os processos são ajustadas para volumes de controle (VC) com fluxo de massa em cada componente. A lei da conservação da massa inclui somente a análise do fluxo de massa que está entrando e saindo, desconsiderando a variação de massa no interior do mesmo em operação em regime permanente, sendo definida por:

$$\sum \dot{m}_s - \sum \dot{m}_e = 0 \quad (1)$$

Considerando desprezíveis as variações de energia cinética e potencial, a equação da primeira lei da termodinâmica para cada volume de controle pode ser reescrita na seguinte forma (Bejan, 1988):

$$\dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (2)$$

sendo:

- \dot{m}_e : vazão mássica entrando no volume de controle (kg/s);
- \dot{m}_s : vazão mássica saindo do volume de controle (kg/s);
- h_e : entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);
- h_s : entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);
- $\dot{Q}_{v.c.}$: taxa de transferência de calor no volume de controle (kW);
- $\dot{W}_{v.c.}$: potência no volume de controle (kW).

A Segunda Lei da Termodinâmica para um volume de controle, considerando o processo em regime permanente, pode ser representada pela seguinte equação:

$$\dot{S}_{ger.v.c.} + \sum \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.i}}{T_i} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s = 0 \quad (3)$$

sendo:

- s_e : entropia específica na entrada do volume de controle (kJ/kgK);
- s_s : entropia específica na saída do volume de controle (kJ/kgK);

T_i : temperatura superficial do volume de controle (K);

$\dot{S}_{ger, v.c.}$: taxa de geração de entropia no volume de controle (kW/K).

3.2. Análise Exergética

A exergia pode ser entendida como a parte da energia que pode ser transformada em trabalho mecânico de forma reversível e útil, sendo a destruição de exergia o resultado direto das irreversibilidades de um sistema. Um dos aspectos que pode aumentar a geração de irreversibilidades é o funcionamento do equipamento fora das condições de projeto, aspecto que geralmente incrementa não só a destruição de exergia, mas também as perdas exergéticas para o ambiente.

Como a exergia é função de propriedades de dois estados, uma vez fixado o ambiente de referência, pode-se utilizá-lo para calcular a exergia de qualquer outro estado. Szargut *et al.* (1988), Kotas (1985) e outros autores propõem a seguinte relação para o cálculo da exergia:

$$b_t = b_{fis} + b_{qui} \quad (4)$$

sendo:

b_{fis} : exergia física específica (kJ/kg);

b_{qui} : exergia química específica (kJ/kg).

A exergia física de um fluxo é calculada com base num estado de referência restrito (P_0, T_0) onde há equilíbrio térmico e mecânico com o meio, através da seguinte equação:

$$b_{fis} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

Para haver equilíbrio completo com o meio, o sistema deve estar também em equilíbrio químico com ele. O trabalho que pode ser obtido através de um processo reversível que leva o sistema do estado de referência restrito até o estado de referência onde há equilíbrio completo ("estado morto"), é a exergia química.

A exergia química do bagaço pode ser dada pela seguinte equação (Szargut, 1988):

$$(b_{quim})_{bag} = \beta(PCI_{bag} + L_{\acute{a}gua}Z_{\acute{a}gua}) + b_{\acute{a}gua}Z_{\acute{a}gua} \quad (6)$$

sendo:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,2160(Z_{H_2}/Z_C) - 0,2499(Z_{O_2}/Z_C)[1 + 0,7884(Z_{H_2}/Z_C)] - 0,0450(Z_{N_2}/Z_C)}{1 - 0,3035(Z_{O_2}/Z_C)} \quad (7)$$

onde:

β : função das frações de massa dos componentes químicos do bagaço (%);

Z_i : fração em massa dos diferentes elementos químicos (%);

$Z_{\acute{a}gua}$: fração em massa de água no bagaço úmido (%);

$L_{\acute{a}gua}$: entalpia de vaporização da água (2.442 kJ/kg);

$b_{\acute{a}gua}$: exergia química da água líquida (50 kJ/kg).

Será considerada a fração em massa de água no bagaço úmido de 50 %, sendo as frações em massa dos elementos químicos apresentadas Tab. 1 (Szargut, 1988).

Tabela 1. Frações em massa dos elementos químicos no bagaço.

Elemento Químico	Fração em Massa (%)
Carbono	46,3
Oxigênio	43,3
Hidrogênio	6,4
Nitrogênio	0,0

Para determinação da exergia química específica do gás natural é utilizada a equação a seguir (Szargut, 1988):

$$(b_{qui})_{gn} = \sum_{i=n} x_i B_i^o + \bar{R} T_0 \sum_{i=n} x_i \ln x_i \quad (8)$$

onde:

B_i^o : Exergia química molar de cada componente do combustível (kJ/kmol).

\bar{R} : Constante universal dos gases.

x_i : Fração molar do componente i na mistura.

A Tab. 2 mostra os valores da exergia química molar para os principais componentes do gás natural (Szargut *et al.*, 1988) a $T_0 = 25\text{ °C}$ e $P_0 = 1\text{ atm}$.

Tabela 2. Exergia química molar dos principais componentes do gás natural.

Substância		B_i^o (kJ/kmol)
Metano	CH ₄	836510
Etano	C ₂ H ₆	1504360
Propano	C ₃ H ₈	2163190
Pentano	C ₅ H ₁₂	3477050
Dióxido de Carbono	CO ₂	20140
Nitrogênio	N ₂	720

3.3. Eficiências Térmicas

A eficiência termodinâmica baseada na primeira lei (η_I) relaciona o trabalho realizado no volume de controle com o trabalho produzido em um processo hipotético isoentrópico desde o mesmo estado de entrada até a mesma pressão de saída, sendo dada pela seguinte equação:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{v.c.}}{\dot{m} \Delta h_{iso}} \quad (9)$$

sendo:

Δh_{iso} : diferença entre as entalpias de entrada e saída do volume de controle, para processo isoentrópico (kJ/kg);

\dot{m} : vazão mássica (líquido ou vapor) no volume de controle (kg/s).

A eficiência termodinâmica baseada na segunda lei (η_{II}) envolve a comparação da taxa de transferência de trabalho real produzido com a variação de exergia avaliada entre os estados real de entrada e saída, conforme segue:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{v.c.}}{\dot{m}(b_e - b_s)} \quad (10)$$

No caso específico das caldeiras, as eficiências de primeira e segunda lei são calculadas, respectivamente, por:

$$\eta_I = \frac{\dot{m}_s h_s - \dot{m}_e h_e}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}} \quad (11)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{m}_s b_s - \dot{m}_e b_e}{\dot{m}_{comb} b_{comb}} \quad (12)$$

sendo:

h_s : entalpia específica na saída da caldeira (kJ/kg);

h_e : entalpia específica na entrada da caldeira (kJ/kg);

b_s : exergia específica na saída da caldeira (kJ/kg);

b_e : exergia específica na entrada da caldeira (kJ/kg);

b_{comb} : exergia específica do bagaço da cana (kJ/kg);

\dot{m}_s : vazão mássica na saída da caldeira (kg/s);

\dot{m}_e : vazão mássica na entrada da caldeira (kg/s);

\dot{m}_{comb} : vazão mássica de combustível consumido na caldeira (kg/s);

PCI_{comb} : poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg).

3.4. Índices de Desempenho

A avaliação do desempenho de uma planta de cogeração baseado na Primeira Lei da Termodinâmica é um procedimento que implica na comparação de produtos de diferentes propriedades termodinâmicas, tais como calor e potência produzida. Na caracterização dos índices de desempenho, vários são os indicadores, sendo uma prática comum avaliar a eficiência dos sistemas de cogeração através da chamada Eficiência de Primeira Lei ou Fator de Utilização de Energia (*FUE*). Este parâmetro é a relação entre a energia térmica ou eletromecânica aproveitada no ciclo e a energia do combustível gasto na geração do vapor, conforme segue:

$$FUE = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_U}{\dot{m}_{comb} PCI} \quad (13)$$

sendo:

\dot{Q}_U : fluxo de calor útil para o processo (kW);

\dot{W} : potência produzida (kW);

\dot{m}_{comb} : vazão mássica de combustível (kg/s);

PCI : poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg).

O Índice de Poupança de Energia (*IPE*) refere-se à economia de energia de combustível nos sistemas de cogeração em comparação a plantas convencionais que produzem separadamente energia elétrica e térmica, sendo dado por:

$$IPE = \frac{\dot{m}_{comb} PCI}{\frac{\dot{W}}{\eta_{term_ref}} + \frac{\dot{Q}_U}{\eta_{cald_ref}}} \quad (14)$$

sendo:

η_{term_ref} : eficiência térmica de uma planta de potência de referência (adotada 40%);

η_{cald_ref} : eficiência térmica de caldeiras que produzem apenas vapor saturado (adotada 77%).

Segundo a Eq. (14), quanto menor o *IPE* do combustível, melhor será o desempenho do sistema tendo como referência as eficiências adotadas. Logo, a quantidade de Energia a Economizar (*EEC*), devido à cogeração, é dada por:

$$EEC = 1 - IPE \quad (15)$$

O Índice de Geração de Potência (*IGP*) é o critério definido para calcular separadamente a eficiência da geração de potência, descontando no insumo de energia aquela utilizada para fins puramente de aquecimento, sendo dado por:

$$IGP = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{comb} PCI - \dot{Q}_U / \eta_{cald}} \quad (16)$$

sendo:

η_{cald} : eficiência térmica das caldeiras da unidade.

A efetividade de custo de um sistema de cogeração está diretamente relacionada com a quantidade de potência elétrica produzida para uma dada quantidade de calor utilizada no processo. É por isso que um critério importante num sistema de cogeração é a Razão Potência/Calor (*RPC*), dada por:

$$RPC = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_U} \quad (17)$$

3.5. Teoria do Custo Exergético

Para um sistema operando em regime permanente pode existir um número de fluxos de entrada e saída de matéria, como também interações de calor e trabalho com o meio associadas às transferências de exergias para dentro ou fora do sistema. Como a exergia mede o valor termodinâmico real de tais efeitos e os custos devem somente ser atribuídos aos valores dos produtos, é significativo usar a exergia como uma base para atribuir custos em sistemas térmicos.

Neste trabalho foi utilizado a Teoria do Custo Exergético que contabiliza as eficiências e perdas exergéticas em cada um dos volumes de controle do sistema, tendo como resultado o custo exergético de produção de cada fluxo.

Assim, para fluxos de entrada e saída de matéria (\dot{m}_e e \dot{m}_s) com taxas associadas de transferência de exergia (\dot{B}_e e \dot{B}_s), potência (\dot{W}) e taxa de transferência de exergia associada com a transferência de calor (\dot{B}_Q), tem-se:

$$\dot{C}_e = c_e \dot{B}_e = c_e (\dot{m}_e b_e) \quad (18)$$

$$\dot{C}_s = c_s \dot{B}_s = c_s (\dot{m}_s b_s) \quad (19)$$

$$\dot{C}_W = c_W \dot{W} \quad (20)$$

$$\dot{C}_Q = c_Q \dot{B}_Q \quad (21)$$

sendo que c_e , c_s , c_W e c_Q denotam os custos monetários médios por unidade de exergia.

Um balanço de custo aplicado para o k-ésimo componente do sistema mostra que a soma das taxas de custos associadas com todos os fluxos de exergia de saída é igual à soma das taxas de custos de todos os fluxos de exergia de entrada mais o preço apropriado devido ao investimento de capital (\dot{Z}_k^{CI}) e despesas de operação e manutenção (\dot{Z}_k^{OM}). A soma dos dois últimos termos é denotada por \dot{Z}_k . Conseqüentemente, para um componente que recebe uma transferência de calor e gera potência, resulta a seguinte equação:

$$\sum_s \dot{C}_{s,k} + \dot{C}_{W,k} = \dot{C}_{Q,k} + \sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{Z}_k \quad (22)$$

Note que, quando um componente recebe potência (como um compressor ou uma bomba), o termo $\dot{C}_{W,k}$ muda com seu sinal positivo para o lado direito desta expressão. Caso exista uma transferência de calor do componente, o termo $\dot{C}_{Q,k}$ aparece com sinal positivo no lado esquerdo da expressão.

Introduzindo-se as expressões de taxa de custo, Eqs. (18) a (21), na Eq. (22), obtém-se:

$$\sum_s (c_s \dot{B}_s)_k + c_{W,k} \dot{W}_k = c_{Q,k} \dot{B}_{Q,k} + \sum_e (c_e \dot{B}_e)_k + \dot{Z}_k \quad (23)$$

As taxas de exergia (\dot{B}_s , \dot{B}_Q e \dot{B}_e) saindo e entrando no k-ésimo componente, bem como a potência (\dot{W}), são calculadas em uma análise exérgica. As variáveis da Eq. (26) são os custos particionados por unidade de exergia para os fluxos de exergia associados com o k-ésimo componente ($c_{s,k}$, $c_{e,k}$, $c_{W,k}$ e $c_{Q,k}$). Na análise de um componente, pode-se assumir que os custos por unidade de exergia são conhecidos para todos os fluxos de entrada.

4. Descrição das Plantas Analisadas

4.1. Caso 1: Usina Iracema

Consiste na utilização de gás natural para queima direta na caldeira de maior capacidade da planta atual da Usina Iracema, localizada em Iracemápolis (SP), através da instalação de queimadores apropriados. O objetivo desta alteração é obter um excedente maior de bagaço para comercialização. A referida planta é mostrada na Fig. 1, sendo composta por seis caldeiras operando a pressão de 2,2 MPa e temperatura de 300 °C e que produzem 470 toneladas de vapor por hora, usado no acionamento de três turbogeradores, das turbinas de duas moendas, de seis turbobombas e de dois turboexaustores das caldeiras. Vale destacar que atualmente a caldeira C4 não se encontra em operação.

4.2. Caso 2: Destilaria Pioneiros

Esta planta consiste de uma proposta de ciclo combinado para a Destilaria Pioneiros, localizada às margens do reservatório da Barragem de Três Irmãos (Rio Tietê), no município de Sud Mennucci (SP). Vale ressaltar que, apesar da razão social mantida pela empresa, a Destilaria Pioneiros também produz açúcar.

A planta estudada é resultante da modificação na planta atual, constituída basicamente de uma caldeira que produz 140 toneladas de vapor por hora a alta pressão e temperatura (6,6 MPa e 530 °C, respectivamente); de uma turbina de extração-condensação que aciona um gerador de eletricidade que produz 32 MW e com os acionamentos das moendas sendo feitos por motores elétricos, através da adição de uma turbina a gás e da recuperação dos gases de exaustão, reduzindo a queima de bagaço para produção de vapor.

Na Tab. 3 são apresentadas informações gerais de operação das plantas descritas anteriormente.

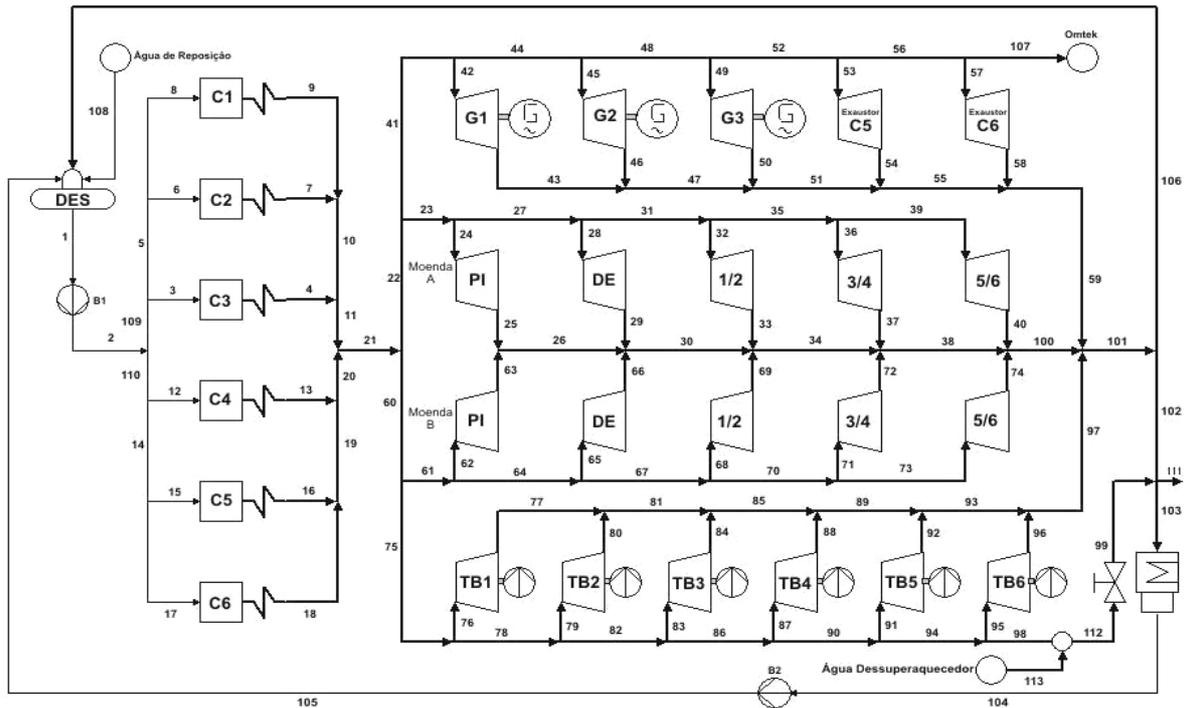


Figura 1. Representação da planta da Usina Iracema (Caso 1).

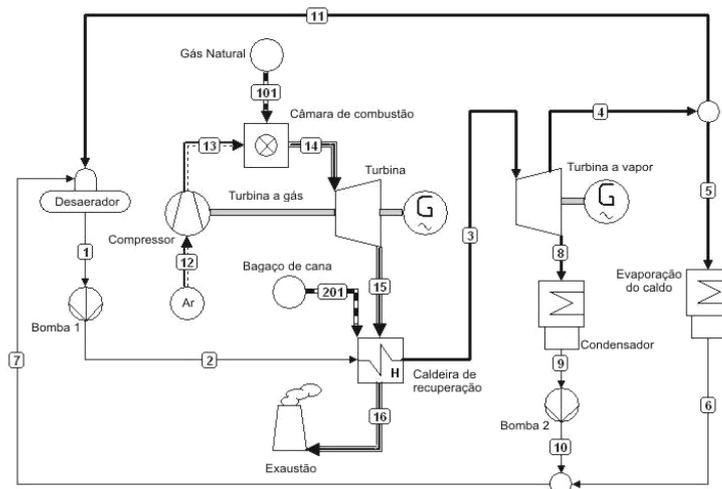


Figura 2. Representação da planta da Destilaria Pioneiros (Caso 2).

Tabela 3. Dados gerais das plantas analisadas.

Parâmetros	Caso 1	Caso 2
Horas efetivas de moagem (h)	3.600	5.000
Moagem horária de cana (t/h)	880,0	240,0
Teor de fibra da cana (%)	13,0	12,6
Teor de fibra do bagaço (%)	46,0	46,2
Relação bagaço-vapor	0,52	0,51
Consumo de bagaço na caldeira C1 (t/h)	36,36	-
Consumo de bagaço na caldeira C2 (t/h)	27,27	-
Consumo de bagaço na caldeira C3 (t/h)	36,36	-
Consumo de bagaço na caldeira C5 (t/h)	45,45	-
Consumo de gás natural (m ³ /h)	18.154	4.603
Consumo total de bagaço	145,5 t/h	56,9
Produção total de bagaço	248,7 t/h	65,4
Bagaço excedente	103,2 t/h	8,5

5. Resultados e Discussões

A resolução do sistema de equações resultante foi efetuada utilizando-se o programa EES[®] (*Engineering Equation Solver*), desenvolvido por Klein & Alvarado (1995), que permite a determinação das propriedades termodinâmicas do sistema, como entalpia e entropia, e possibilita a realização de cálculos de uma maneira simples e eficiente, sem a necessidade de se recorrer a tabelas termodinâmicas.

5.1. Análise Termodinâmica

5.1.1. Análise Termodinâmica da Usina Iracema

A Tab. 4 mostra a potência gerada e as eficiências para as caldeiras e turbinas da Usina Iracema.

Tabela 4. Potência gerada e eficiências da 1ª e da 2ª Lei (Caso 1).

Equipamento	\dot{W} (kW)	η_I (%)	η_{II} (%)
Caldeiras 1, 2, 3, 4, 5 e 6	-	72,0	9,5
Turbina do Picador (Moendas A e B)	945	55,5	63,0
Turbina do Desfibrador (Moendas A e B)	1.350	55,5	63,0
Turbina dos 1º/2º Ternos (Moendas A e B)	1.215	55,5	63,0
Turbina dos 3º/4º Ternos (Moendas A e B)	945	55,5	63,0
Turbina dos 5º/6º Ternos (Moendas A e B)	1.148	55,5	63,0
Turboexaustor da caldeira C5	608	55,5	63,0
Turboexaustor da caldeira C6	743	55,5	63,0
Turbobombas 1, 2, 3, 4 e 5	582	53,2	60,8
Turbobomba 6	1.934	53,2	60,8
Turbogerador 1	2.402	62,7	69,5
Turbogerador 2	3.813	62,7	69,5
Turbogerador 3	5.719	62,7	69,5

Pode-se observar que as eficiências, tanto da primeira lei como da segunda lei, são iguais para todas as caldeiras, pois foram consideradas a mesma temperatura e a mesma pressão na entrada e na saída de todas elas. Além disso, a relação bagaço/vapor também foi mantida constante. Devido à combustão ser um processo de alta irreversibilidade, as eficiências da segunda lei são muito inferiores as da primeira lei (9,5 e 72,0%, respectivamente).

Foi considerada a hipótese de que a eficiência da caldeira C6 é mantida a mesma após a instalação de queimadores adequados para o uso de gás natural. No entanto, na prática isso dificilmente ocorrerá, pois o modo construtivo de uma caldeira que utiliza bagaço de cana como insumo é diferente de uma caldeira projetada especificamente para queimar gás natural, a qual apresenta dimensões mais compactas e aproveita melhor o calor fornecido pela combustão do gás natural. Assim sendo, é muito provável que a eficiência da caldeira adaptada para a queima de gás natural seja inferior à adotada no presente trabalho, mas não existem condições no momento para a definição de um valor preciso.

As turbobombas apresentaram as menores eficiências (53,2 %) enquanto os turbogeradores apresentaram as maiores (62,7 %). Os turboexaustores das caldeiras e as turbinas de acionamento tiveram as mesmas eficiências (55,5 %), sendo estas um pouco maiores que as das turbobombas.

A potência total gerada pela Usina Iracema foi de 27,6 MW, dos quais 15,5 MW referem-se à potência mecânica produzida (turbobombas, turboexaustores e turbinas da moenda) e 11,9 MW à potência elétrica produzida pelos turbogeradores.

5.1.2. Análise Termodinâmica da Destilaria Pioneiros

A Tab. 5 apresenta os resultados para as eficiências da primeira e segunda lei das caldeiras e turbinas, bem como a potência gerada na Destilaria Pioneiros.

Tabela 5. Potência gerada e eficiências da 1ª e da 2ª Lei (Caso 2).

Equipamentos	\dot{W} (kW)	η_I (%)	η_{II} (%)
Caldeira de Recuperação	-	85,0	31,6
Turbina a gás	13.108	91,0	95,9
Turbina a vapor (extração-condensação)	29.979	87,0	88,9

Esta configuração produz 43,1 MW, dos quais 13,1 MW provêm da turbina a gás, que é o equipamento que possui as maiores eficiências, sendo 91,0 % para a primeira lei e 95,9 % para a segunda lei.

5.2. Índices de Desempenho

Os índices de desempenho baseados na primeira lei da termodinâmica permitem realizar uma análise comparativa entre as configurações avaliadas neste trabalho, sendo apresentados na Tab. 6.

Tabela 6. Índices de desempenho das plantas.

Configurações	<i>FUE</i>	<i>IFE</i>	<i>EEC</i>	<i>IGP</i>	<i>RPC</i>
Caso 1	0,591	1,190	-0,190	0,230	0,113
Caso 2	0,707	0,806	0,194	0,555	0,610

Verifica-se que todos os índices de desempenho do Caso 2 são melhores que os do Caso 1, isso porque a planta do Caso 2 utiliza equipamentos com eficiência bastante superior aos do Caso 1, permitindo um melhor aproveitamento da energia do combustível, quer seja para a produção de energia térmica ou elétrica. O valor do índice *IFE* acima da unidade, ou *EEC* negativo, significa que a planta do Caso 1 tem desempenho inferior ao da planta termelétrica de referência utilizada no cálculo destes índices. O maior valor do índice *IGP* no Caso 2, em relação ao Caso 1, vai de encontro aos propósitos da Destilaria Pioneiros que prioriza a geração de excedente de energia elétrica para comercialização. Devido ao fato da Usina Iracema necessitar de uma maior quantidade de vapor para processo e e produzir menos eletricidade, os índices *RPC* do Caso 1 são inferiores ao do Caso 2.

5.3. Análise Termoeconômica

Neste item, são apresentados os custos de geração de energia elétrica e de geração de vapor de processo para as configurações estudadas, em função dos custos dos insumos (bagaço e gás natural). O custo da água de reposição, bem como os custos de instalação de tubulações para o transporte do gás natural, não foram considerados.

O custo médio da energia elétrica produzida é obtido a partir de uma média ponderada entre os custos de geração de cada um dos turbogeradores existentes, para as configurações que possuem mais de um turbogerador. Vale destacar que foi utilizada a Teoria do Custo Exergético com o Método das Extrações para a partição de custos e, além disso, que os custos dos equipamentos foram estimados com base na literatura (*Gas Turbine World Handbook*, 2001-2002).

5.3.1. Análise Termoeconômica da Usina Iracema

Nesta configuração também foi desprezado o custo da instalação dos queimadores de gás natural na caldeira C6, por ser um valor relativamente pequeno em comparação aos outros custos envolvidos.

As Figs. 3 e 4 mostram, respectivamente, o custo unitário de produção da energia elétrica e de vapor de processo, em função do custo do bagaço e do gás natural.

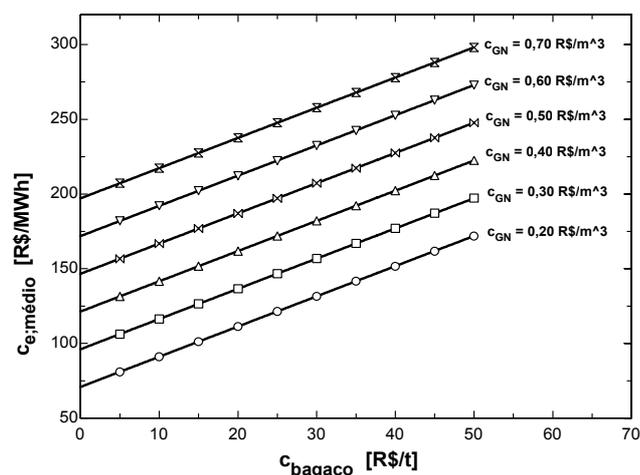


Figura 3. Custo médio da energia elétrica gerada, em função do custo do bagaço e do gás natural (Caso 1).

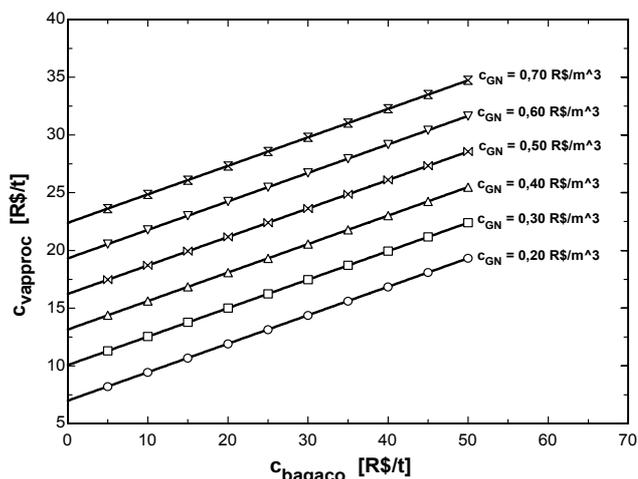


Figura 4. Custo médio do vapor de processo gerado, em função do custo do bagaço e do gás natural (Caso 1).

5.3.2. Análise Termoeconômica da Destilaria Pioneiros

Nesta configuração, os custos do capital investido foram adicionados aos custos de operação e manutenção, considerando uma taxa de juros de 12 % ao ano por um período de 20 anos. Os custos para instalação do sistema de fornecimento de gás natural não foram considerados. Os custos de produção de energia elétrica e de vapor de processo em função dos custos do gás natural e do bagaço são apresentados, respectivamente, nas Figs. 5 e 6.

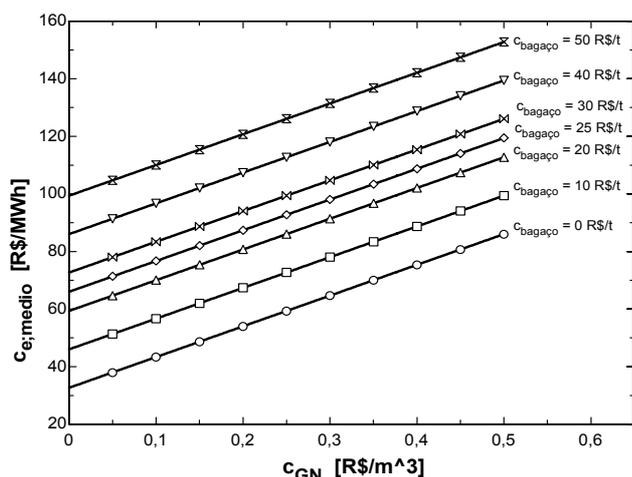


Figura 5. Custo médio da energia elétrica gerada, em função do custo do bagaço e do gás natural (Caso 2).

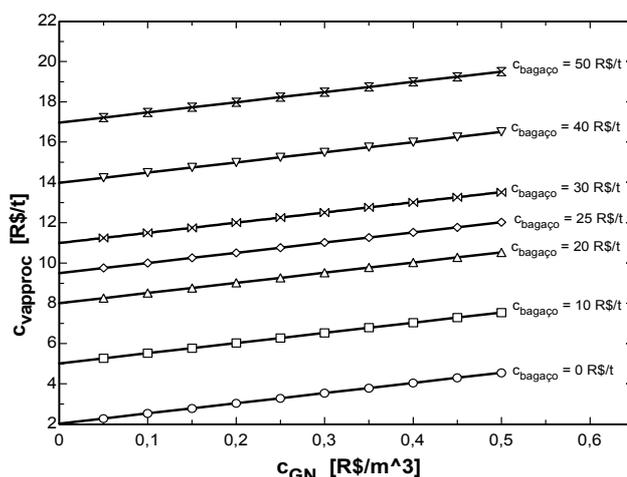


Figura 6. Custo médio do vapor de processo gerado, em função do custo do bagaço e do gás natural (Caso 2).

5.4. Comparação entre Custos e Receitas

A Tab. 7 mostra um quadro comparativo para as duas configurações analisadas, considerando uma tarifa de R\$ 0,50/m³ para o gás natural, um custo de R\$ 25,00/t para o bagaço consumido (valor referencial equivalente ao da tonelada de cana produzida no campo) e considerando ainda que o bagaço excedente seja vendido a R\$ 45,00/t e que a eletricidade excedente seja comercializada por R\$ 152,21 (valor referencial equivalente ao pago pelas as usinas às concessionárias na entre-safra).

Tabela 7. Quadro comparativo entre custos e receitas nos casos considerados.

Parâmetros	Caso 1	Caso 2
Custo de geração de eletricidade (R\$/MWh)	197,10	121,80
Custo de geração do vapor de processo (R\$/t)	22,40	12,33
Quantidade de eletricidade produzida (MW)	11,93	43,09
Quantidade de eletricidade excedente (MW)	-	32,00
Quantidade de bagaço consumida (t/h)	145,30	56,90
Quantidade de bagaço excedente (t/h)	103,20	8,50
Volume de gás consumido (m ³ /h)	18.154	4.603
Número de horas de operação (h)	3.600	5.000
Gastos com gás natural (R\$/ano)	32.677.200,00	11.507.500,00
Gasto com bagaço (R\$/ano)	13.077.000,00	7.112.500,00
Receita obtida com venda do bagaço excedente (R\$/ano)	16.720.020,00	1.912.500,00
Receita obtida com venda de energia excedente (R\$/ano)	-	24.353.600,00

Verifica-se que no Caso 2 os custos de geração de eletricidade e vapor são cerca de 38,2 % e 46 % menores, respectivamente, que no Caso 1.

Nota-se que no Caso 1 a receita obtida com a venda de bagaço é inferior aos gastos envolvidos na planta, inviabilizando, portanto, o uso do gás natural, ao contrário do Caso 2, onde existe um pequeno retorno financeiro com a venda de bagaço e, principalmente, eletricidade excedente (R\$ 3.821.100,00/ano).

6. Conclusões

Diante dos resultados obtidos, verifica-se que existem limitações para a utilização do gás natural como combustível complementar em usinas sucroalcooleiras, em função das características da planta, forma de utilização, além da localização da planta que, embora não tenha sido levado em conta neste trabalho, pode envolver altos custos para interligação com o gasoduto.

O uso do gás natural como combustível nas caldeiras, através da simples instalação de queimadores, não se mostrou viável, mesmo no caso em que possibilita a sobra de bagaço para comercialização. Já o uso do gás natural em ciclo combinado pode ser uma alternativa interessante para novos projetos na indústria sucroalcooleira, embora exija investimentos de grande porte. Assim, é importante se estabelecer regras claras e estáveis que viabilizem a

comercialização da energia gerada e possibilitem a realização desses investimentos.

Mesmo nessa situação, o alto custo do gás natural também é um fator limitante para a massificação do seu uso em usinas sucroalcooleiras, devendo ser analisada a possibilidade da redução do seu custo para esta finalidade. Outro fator que contribuiria para o aproveitamento do gás natural em usinas sucroalcooleiras seria uma melhor remuneração para o preço de venda da energia gerada.

Por fim, verifica-se que a redução do custo do bagaço faz com que os custos de produção de energia elétrica e de vapor diminuam significativamente. Ocorre que, a maioria das usinas sucroalcooleiras não tem definido quanto realmente custa o bagaço para a utilização no processo de cogeração de energia, devido ao fato de que o bagaço, até então, era considerado um simples rejeito do processo industrial. A partir do momento que se tem como produto a eletricidade, além do açúcar e do álcool, seria interessante realizar uma melhor partição de custos entre os produtos e insumos envolvidos no processo industrial das usinas. Dessa forma, um menor custo do bagaço aumentaria a atratividade das configurações estudadas, viabilizando a comercialização de energia mesmo pelo preço do PROINFA que hoje é cerca de 30% menor do que o adotado neste trabalho.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem aos engenheiros Marcelo Fiomari e Guilherme Prado pelo fornecimento de dados da Destilaria Pioneiros e Usina Iracema, respectivamente, bem como à FAPESP pelo suporte financeiro a um projeto de pesquisa mais amplo que envolve a análise de sistemas energéticos que utilizam biomassa e/ou gás natural (processo 2005/01197-6), dentro do qual está inserido o presente trabalho.

8. Referências Bibliográficas

- Barreda Del Campo, E.R., Roxo, R., Nebra, S.A. & Bordonal, A.F., 1998, “Análises Energética e Exergética do Sistema de Cogeração da Usina Vale do Rosário”, Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Vol. I, Rio de Janeiro, pp. 307-312.
- Bejan, A., 1988, “Advanced Engineering Thermodynamics”, John Wiley & Sons, New York, 850 p.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. & Moran, M., 1996, “Thermal Design & Optimization”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 542 p.
- Carpio, R.C., Teixeira, F.N., Bessa, F.C. & Lora, E.S., 1999, “Critérios de Avaliação Termodinâmica para Sistemas de Cogeração em Usinas de Açúcar”, Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (em CD-ROM), Águas de Lindóia, 10 p.
- Corrêa Neto, V., 2001, “Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-Açúcar e Gás Natural”, Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 194p.
- Gas Turbine World Handbook, 2001-2002.
- Jaguaribe, E.F., Lobo, P.C., Souza, W.L., Rocha, R.M. & Nascimento, E.T., 2004, “Vender Bagaço ou Comercializar a Energia Gerada pela Cogeração?”, Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (em CD-ROM), Rio de Janeiro, 12 p.
- Klein, S.A. & Alvarado, F.L., 1995, “EES – Engineering Equation Solver”, F-Chart Software, Middleton, WI.
- Kotas, T.J., 1985, “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Ed. Krieger Publishing Co., Florida, USA, 328 p.
- Leite, C.P., 2003, “Seleção de Centrais Termoelétricas Utilizando Gás Natural e Bagaço de Cana”, Dissertação de Sánchez Prieto, M.G.S., 2003, “Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira: Estudo de Caso”, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, 255 p.
- Sánchez Prieto, M.G.S., Carril, T.P. & Nebra, S.A., 2001, “Análise do Custo Exergético do Sistema de Geração de Vapor da Usina Cruz Alta”, Anais do XVI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Vol. 4, Uberlândia, pp. 196-205.
- Sánchez Prieto, M.G.S. & Nebra, S.A., 2001, “Análise do Custo Exergético do Sistema de Cogeração de uma Usina Sucro-Alcooleira”, Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Vol. 4, Uberlândia, pp. 206-215.
- Szargut J., Morris, D.R. & Steward, F.R., 1988, “Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Process”, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 332 p.

ANALYSIS OF UTILIZATION OF NATURAL GAS WITH DIFFERENT PROPOSALS IN TWO SUGAR-ALCOHOL INDUSTRIES OF SAO PAULO STATE

Thales B. Uchôa, Marcos Hideo S. Mashiba, David J. Saran, Cassio Roberto M. Maia e Ricardo Alan V. Ramos

NUPLEN – Nucleus of Energy Planning, Generation and Cogeneration.

Mechanical Engineering Department, UNESP – Campus Ilha Solteira, Av. Brasil, nº. 56, Zip Code 15385-000, Ilha Solteira, SP.
nuplen@dem.feis.unesp.br

Abstract. *In this work is analyzed the viability of the gas natural utilization as supplemental combustible in two sugar-alcohol industries of Sao Paulo State with different proposals. One of these industries is located in a region where there is a great demand of sugar cane bagasse by other industries and because that its objective is the use of natural gas for surplus of bagasse for commercialization. The other industry is located in a region near a hydroelectric complex where there is several transmission lines and because that its objective is the use of natural gas for surplus of electricity for comercialization. Thermodynamic e thermoeconomic studies of the modified plants of these industries to permit the combined use of bagasse and natural gas, including the installation of gas burners in the boilers and/or the installation of a gas turbine and a heat recovery steam generator, are carried out and the obtained results are discussed.*

Keywords: *energy, cogeneration, natural gas, bagasse, sugar-alcohol industry.*