

## **AVALIAÇÃO TERMOECONÔMICA DA PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA PARA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA**

**Rodnei Passolongo, rodneipas@gmail.com**  
**Thiago Pagoto Alves Luz, thiagopalsud@hotmail.com**  
**Lucas Fernando Biazotti Bonan, lucasbonan@hotmail.com**  
**Ricardo Alan Verdú Ramos, ramos@dem.feis.unesp.br**

Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica, Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia, Av. Brasil, 56, Centro, CEP 15.385-000, Ilha Solteira, SP.

**Resumo:** Neste trabalho é analisado sob o ponto de vista termoeconômico o desempenho de diferentes configurações de uma planta de cogeração de uma usina sucroalcooleira da região oeste paulista, através da integração de sistemas de gaseificação da palha, do bagaço e da vinhaça. Primeiramente é realizado um estudo do aproveitamento da palha para produção de energia, através da gaseificação para produção do gás de biomassa, o qual por sua vez é utilizado como combustível numa turbina a gás. Depois é estudado o aproveitamento da vinhaça, a qual é um subproduto da fabricação do álcool, gerado em grande quantidade, para geração de biogás através do processo de biodigestão, o qual pode ser aproveitado numa turbina a gás para produção de potência elétrica. E, por fim, é estudada a integração de um sistema para gaseificação do bagaço de cana, a fim de se conhecer as vantagens deste processo. Assim, é apresentada uma análise comparativa entre seis casos, sendo que o primeiro caso é um caso base que considera a planta convencional de vapor da usina e os outros casos consideram a gaseificação da palha da cana, da vinhaça e do bagaço, separadamente, e a integração destes sistemas, considerando a gaseificação da palha e da vinhaça num caso, e, por fim, a gaseificação de toda a biomassa. Os resultados mostram que a gaseificação da biomassa possibilita um aumento significativo na geração de energia elétrica da planta em alguns casos, com consequente viabilidade para implantação.

**Palavras-chave:** Usina sucroalcooleira, Cogeração, Gaseificação, Termoeconomia.

### **1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO**

O aumento da geração de energia elétrica através da cogeração em indústrias tem sido crescente no sentido de se evitar a ocorrência de uma nova crise energética. Dentro deste contexto, o setor sucroalcooleiro merece uma posição de destaque, pois pode contribuir e muito para a produção de energia elétrica excedente para comercialização.

Algumas ações têm sido desenvolvidas no sentido de se incrementar a cogeração de energia no setor sucroalcooleiro, principalmente no Estado de São Paulo que concentra a maior parte das usinas e onde foi assinado em 2007 um protocolo entre o Governo Paulista e a FIESP criando o "Programa Paulista de Cogeração de Energia", que tem como objetivos desburocratizar o setor e buscar, junto à ANEEL, uma regulamentação adequada e linhas de crédito que possibilitem dar sustentação financeira ao crescimento do setor, com o intuito de se duplicar a quantidade de energia cogorada no setor sucroalcooleiro paulista até 2010.

Estima-se que apenas 50 % da energia solar sintetizada na cana-de-açúcar é atualmente aproveitada pelas indústrias. Um terço é convertido em açúcar ou álcool, e o bagaço, que é o segundo terço, é utilizado para atender às necessidades térmicas e de acionamentos da própria fábrica, porém com desperdício de 50 % de potencial energético. O último terço são as pontas e palhas da cana, que são queimadas no campo. A queima da palha da cana-de-açúcar sempre foi uma prática generalizada no setor sucroalcooleiro para facilitar a colheita, mas em 2002, no Estado de São Paulo, principal produtor, foi promulgado um decreto para a eliminação gradual dessa prática, despendando o interesse pela sua recuperação para uso como combustível adicional ao bagaço. Mais recentemente, em julho de 2007, foi assinado o Protocolo Verde, o qual determina que a queimada seja totalmente abolida em todas as áreas com declividade até 12 % para minimizar os efeitos da poluição.

Existe ainda um grande potencial para aproveitamento da vinhaça, que é um subproduto da fabricação do álcool, através do processo de biodigestão. A vinhaça, gerada em grande quantidade, atualmente é utilizada apenas como fertilizante. A biodigestão processa a carga orgânica da vinhaça, gerando o biogás, que pode ser aproveitado para

geração de energia elétrica, e a vinhaça biodigerida ainda mantém seu poder fertilizante.

Existem várias referências bibliográficas envolvendo estudos sobre gaseificação e termoeconomia aplicados em usinas sucroalcooleiras que contribuíram na realização do presente trabalho, sendo que dentre eles podem ser destacados os seguintes: Corrêa Neto (2001), Sánchez Prieto *et al.* (2001), Sánchez Prieto (2003), Albuquerque (2005), Salomon *et al.* (2007) e Seabra (2008).

Diante deste contexto, este trabalho tem por objetivo analisar sob o ponto de vista termoeconômico o desempenho de diferentes configurações de uma planta de cogeração, através da integração de sistemas de gaseificação da palha, do bagaço e da vinhaça de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista.

## 2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

### 2.1. Análise Termodinâmica

Considerando processos em regime permanente e desprezando as variações de energia cinética e potencial, as equações de balanço de massa, energia e exergia, para cada volume de controle (VC), são dadas por (Bejan, 1988):

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_s = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{vc} - \dot{W} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_e h_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_s h_s = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i (1 - T_0/T_i) - \dot{W}_{vc} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_e ex_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_s ex_s = \dot{I}_{vc} \quad (3)$$

Onde:  $\dot{m}_e$  - Fluxo de massa na entrada (kg/s);  $\dot{m}_s$  - Fluxo de massa na saída (kg/s);  $h_e$  - Entalpia específica na entrada (kJ/kg);  $h_s$  - Entalpia específica na saída (kJ/kg);  $ex_e$  - Exergia específica na entrada (kJ/kg);  $ex_s$  - Exergia específica na saída (kJ/kg);  $T_i$  - Temperatura superficial (K);  $T_0$  - Temperatura do fluido no estado de referência (K);  $\dot{I}_{vc}$  - Taxa de irreversibilidade (kW);  $\dot{Q}_{vc}$  - Fluxo de calor (kW);  $\dot{W}_{vc}$  - Potência (kW).

Para o cálculo da exergia específica de um fluxo ( $ex_f$ ) pode ser usada a seguinte equação (Szargut *et al.*, 1988):

$$ex_f = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) + \sum (\mu_i - \mu_{0,i}) x_i \quad (4)$$

Onde:  $h$  - Entalpia específica do vapor (kJ/kg);  $s$  - Entropia específica do vapor (kJ/kgK);  $h_0$  - Entalpia da água no estado de referência (kJ/kg);  $s_0$  - Entropia da água no estado de referência (kJ/kgK);  $\mu_{0,i}$  - Potencial químico de referência do elemento ( $T_0, P_0$ );  $\mu_i$  - Potencial químico do elemento na mistura;  $x_i$  - Fração do componente na mistura.

Para o cálculo da exergia específica do bagaço ( $ex_{bag}$ ) é usada a equação apresentada por Szargut *et al.* (1988):

$$ex_{bag} = \beta (PCI_{bag} + L_{\acute{a}gua} Z_{\acute{a}gua}) + ex_{\acute{a}gua} Z_{\acute{a}gua} \quad (5)$$

Sendo:

$$\beta = \left\{ 1,0412 + 0,2160 (Z_{H_2}/Z_C) - 0,2499 (Z_{O_2}/Z_C) \left[ 1 + 0,7884 (Z_{H_2}/Z_C) \right] - 0,0450 (Z_{N_2}/Z_C) \right\} / \left[ 1 - 0,3035 (Z_{O_2}/Z_C) \right] \quad (6)$$

Onde:  $\beta$  - Função das frações de massa dos componentes do bagaço (%);  $Z_i$  - Fração em massa dos elementos químicos (%);  $Z_{\acute{a}gua}$  - Fração em massa de água no bagaço (%);  $L_{\acute{a}gua}$  - Entalpia de vaporização da água (kJ/kg);  $ex_{\acute{a}gua}$  - Exergia química da água líquida (kJ/kg).

### 2.2. Análise Termoeconômica

Após a análise termodinâmica, realiza-se a análise termoeconômica para a determinação dos custos de produção. A análise de custo exergético ou exergoeconômico envolve os balanços de custos para cada um dos componentes de um sistema. Assim, para um dado componente ( $k$ ) de que recebe calor e gera potência, o balanço de custo deve levar em conta as taxas de custo (R\$/s) associadas às exergias de entrada ( $\dot{C}_i$ ) e saída ( $\dot{C}_o$ ), bem como as taxas de trabalho ( $\dot{C}_w$ ) e de transferência de calor ( $\dot{C}_q$ ), além da taxa de custo do equipamento ( $\dot{C}_e$ ), considerando o custo do mesmo ( $C_e$ ) e fatores correspondentes à amortização ( $f_a$ ), despesas fixas ( $f_{omf}$ ) e variáveis ( $f_{omv}$ ) com a operação e manutenção, de acordo com o fator de carga ( $FC$ ) e o número de horas de operação ( $T_{oper}$ ), resultando a equação (Bejan *et al.*, 1996):

$$\sum(\dot{C}_i)_k + (\dot{C}_w)_k = (\dot{C}_q)_k + \sum(\dot{C}_o)_k + (\dot{C}_e)_k \quad (7)$$

Sendo:

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}x_i = c_i (\dot{m}_i ex_i) \quad (8)$$

$$\dot{C}_o = c_o \dot{E}x_o = c_o (\dot{m}_o ex_o) \quad (9)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (10)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{Q} \quad (11)$$

$$\dot{C}_e = \left[ C_e (f_a + f_{omf} + FC f_{omv}) \right] / (T_{oper} 3.600) \quad (12)$$

Onde:  $c$  - Custo médio por unidade de exergia (R\$/kJ);  $C$  - Custo monetário (R\$);  $\dot{C}$  - Taxa de custo exergoeconômico (R\$/s);  $\dot{E}x$  - Taxa de exergia (kJ/s);  $\dot{Q}$  - Taxa de calor (kJ/s);  $\dot{W}$  - Potência (kJ/s).

O fator de amortização ( $f_a$ ) pode ser calculado em função da taxa percentual de juros anual ( $j$ ) e do número de anos de vida útil do equipamento ( $N$ ), de acordo com a seguinte equação (Bejan *et al.*, 1996):

$$f_a = \left[ j(1+j)^N \right] / \left[ (1+j)^N - 1 \right] \quad (13)$$

O custo médio por unidade de exergia do combustível ( $c_{comb}$ ) é dado por:

$$c_{comb} = C_{comb} / ex_{comb} \quad (14)$$

Onde:  $C_{comb}$  - Custo médio por unidade de massa do combustível (R\$/kg);  $ex_{comb}$  - Exergia específica do combustível (kJ/kg).

Vale destacar que foram considerados nas simulações os seguintes valores  $f_{omf} = 0,09$ ;  $f_{omv} = 0,01$ ;  $FC = 0,75$ ;  $T_{oper} = 3.600$ ;  $i = 0,12$  e  $j = 20$ .

### 2.3. Método de Solução

Para a análise termodinâmica foi utilizado o programa IPSEPro (Simtech, 1991-2003), sendo que maiores informações sobre o mesmo podem ser obtidas em [www.simtechnology.com](http://www.simtechnology.com). Os sistemas de equações oriundos da análise termoeconômica serão resolvidos utilizando o programa EES (Klein e Alvarado, 1995).

## 3. DETALHAMENTO DOS CASOS ESTUDADOS

O primeiro caso a ser estudado é uma planta de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista, mostrada na Fig. (1), a qual servirá como base para os outros casos a serem estudados. Esta planta possui equipamentos modernos e eficientes, com caldeira que produz 170 t/h de vapor a 6.860 kPa e 530 °C e turbina de extração-condensação de múltiplos estágios. Além disso, todos os acionamentos (moendas, exaustores, ventiladores, bomba de alimentação de água) são eletrificados. A Tab. 1 apresenta dados da safra 2007/2008 da usina (Fiomari, 2004).

No Caso 2, adicionalmente à planta da usina, é incorporado um sistema de gaseificação da palha. O gás gerado é comprimido e segue para uma turbina a gás, e os gases de exaustão dessa turbina são aproveitados em uma caldeira de recuperação, gerando vapor para uma turbina de condensação, de acordo com a Fig. 2.

No Caso 3 é incorporado um sistema de biodigestão da vinhaça à planta da usina. O biogás gerado é consumido em uma turbina a gás, e a energia dos gases de escape dessa turbina é aproveitada para geração de vapor em uma caldeira de recuperação, com produção de vapor para alimentar uma turbina de condensação, de acordo com a Fig. 3.

O Caso 4 considera a gaseificação de todo o bagaço da usina, sendo o gás gerado consumido em uma turbina a gás, e com o aproveitamento da energia dos gases para geração de vapor em uma caldeira de recuperação, a qual deve gerar todo o vapor necessário para a usina, como mostra a Fig. 4.

No Caso 5 é considerada a integração dos sistemas de gaseificação da palha e da vinhaça à planta da usina, em ciclo combinado, de acordo com a Fig. 5.

O Caso 6 considera a gaseificação de toda a biomassa da usina (palha, bagaço e vinhaça), sendo todo o vapor da usina gerado pela caldeira de recuperação, como mostra a Fig. 6.

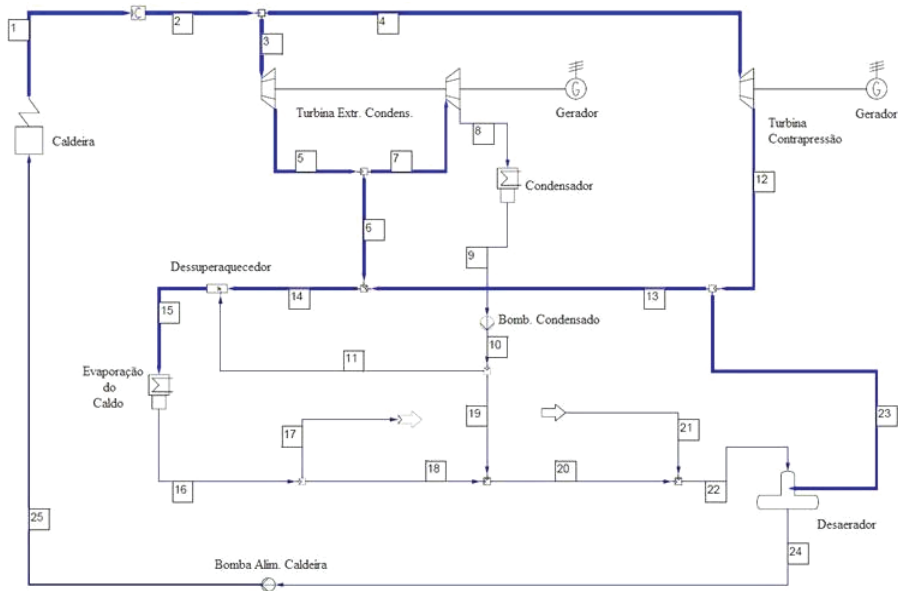


Figura 1. Planta convencional de vapor de uma usina do oeste paulista (Caso 1).

Tabela 1. Dados da safra 2007/2008 de uma usina do oeste paulista.

Parâmetros	Valores	Unidades
Cana moída total	1.350.000	t
Dias de safra	223	dias
Horas efetivas de moagem	4.730,0	horas
Eficiência Agrícola	94,0	%
Eficiência Industrial	93,0	%
Moagem horária	285,0	t/h
Relação bagaço-vapor	0,47	kg/kg
Teor de fibra da cana	13,15	%
Teor de fibra do bagaço	47,89	%
Umidade de bagaço	50,09	%
Fluxo de bagaço na caldeira	78,3	t/h
Vazão de vapor na caldeira	165,0	t/h
Consumo de vapor no processo	130,0	t/h

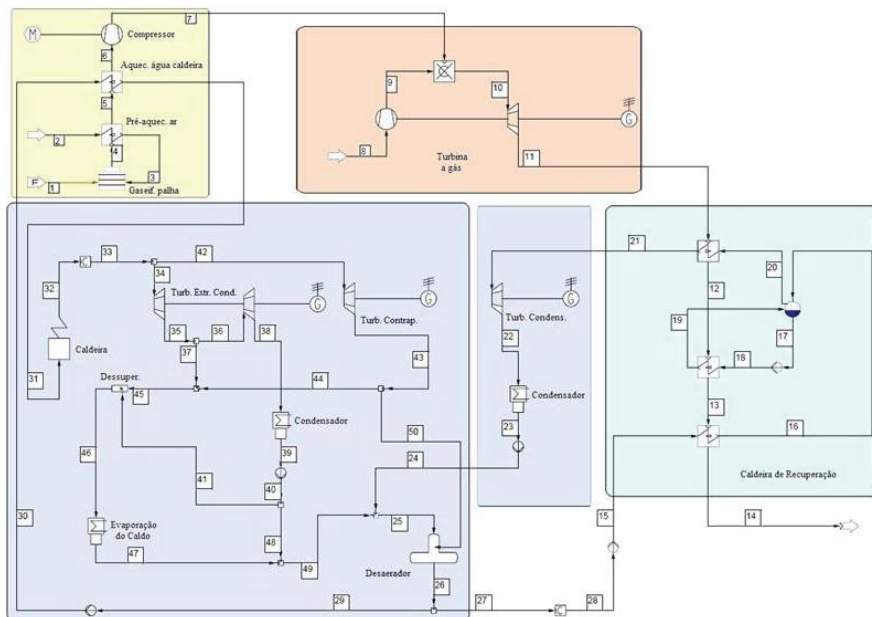


Figura 2. Planta integrada para gaseificação da palha (Caso 2).

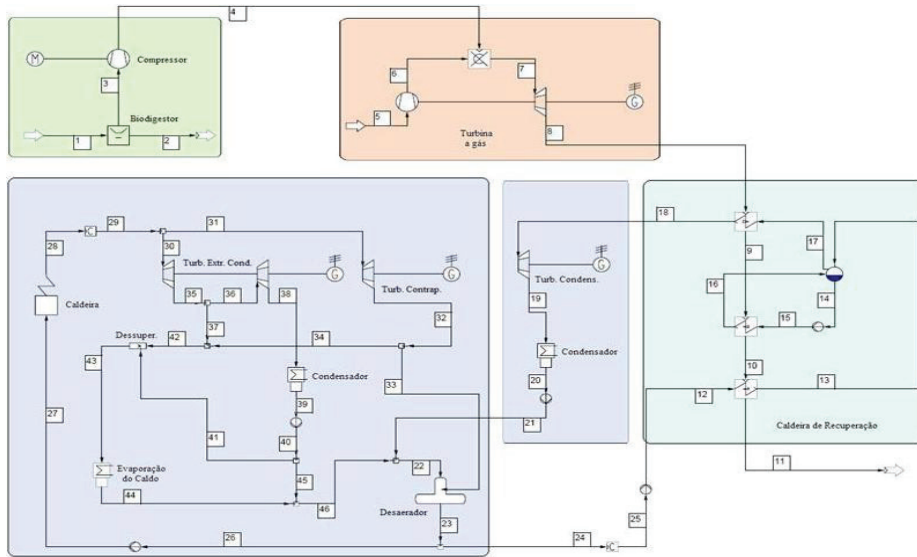


Figura 3. Planta integrada para gaseificação da vinhaça (Caso 3).

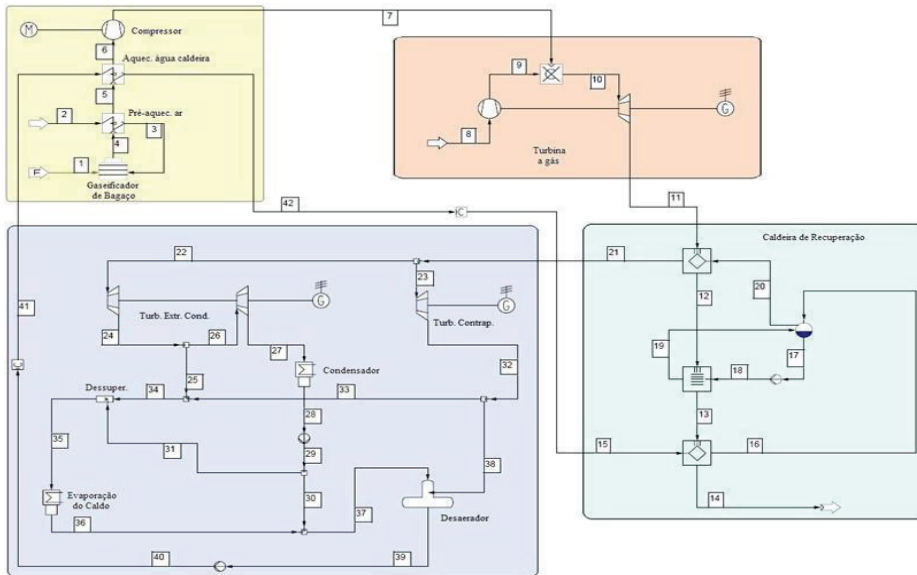


Figura 4. Planta integrada para gaseificação do bagaço (Caso 4).

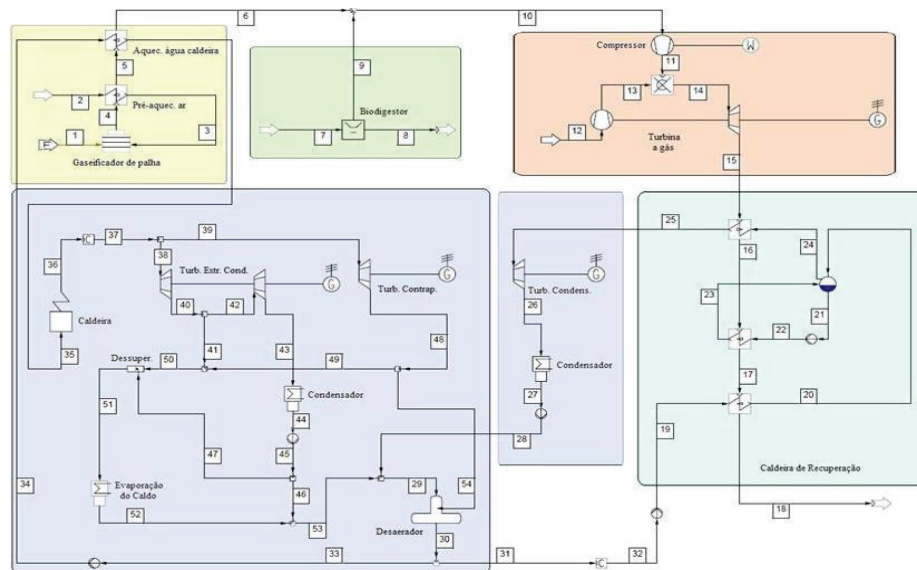


Figura 5. Planta integrada para gaseificação da palha e da vinhaça (Caso 5).

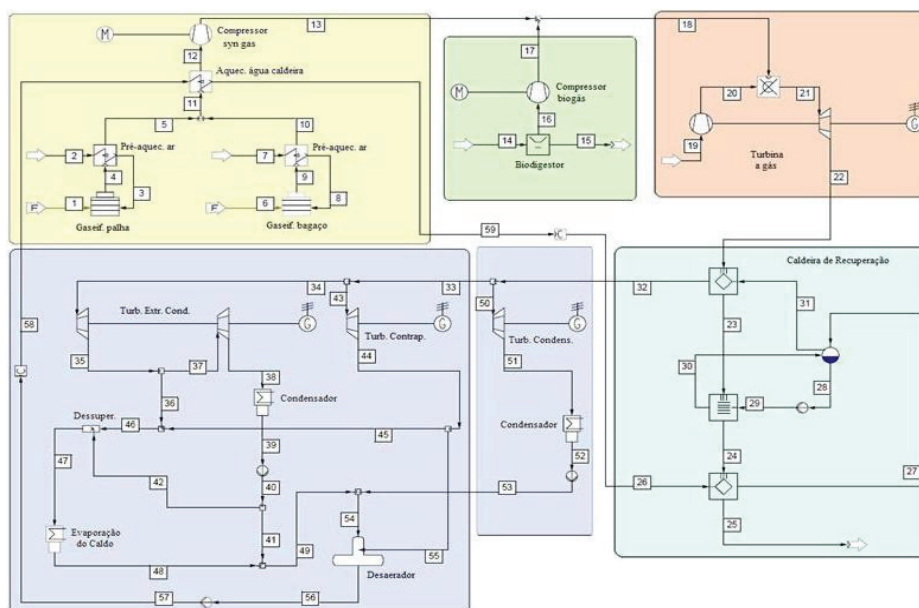


Figura 6. Planta integrada para gaseificação da palha, do bagaço e da vinhaça (Caso 6).

#### 4. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados referentes à análise termoeconômica efetuada como forma complementar à análise termodinâmica feita anteriormente por Passolongo *et al.* (2009).

Os custos dos equipamentos das configurações estudadas foram estimados a partir de informações disponíveis na literatura (Gas Turbine World Handbook, 2001-2002 e Garagatti Arriola, 2000) e são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Custo estimado dos equipamentos do Caso 1.

Equipamento	Custo estimado (R\$)
Caldeira MC (170 t/h)	20.000.000,00
Turbogerador Extração-Condensação (32 MW)	34.000.000,00
Turbogerador de Contrapressão (12 MW)	4.000.000,00
Condensador	600.000,00
Dessuperaquecedor	100.000,00
Desaerador	2.600.000,00
Evaporação do Caldo	1.000.000,00
Bomba de Alimentação da Caldeira (170 t/h)	1.800.000,00
Gaseificador (93 t/h)	190.000.000,00
Biodigestor (180 m <sup>3</sup> /h)	13.500.000,00
Compressor (220 t/h)	15.690.000,00
Turbina a Gás (86 MW)	40.000.000,00
Caldeira de Recuperação (185 t/h)	12.500.000,00

Na configuração da planta convencional de vapor da usina (Caso 1), somente os custos de operação e manutenção incorrem sobre os equipamentos, pois estes são considerados já amortizados. Na Fig. 7 é apresentada a variação do custo de geração de energia elétrica para os turbogeradores em função do preço do bagaço, enquanto a Fig. 8 mostra a variação do custo de produção do vapor de processo.

Na configuração dos casos a seguir, os equipamentos são considerados novos, portanto, além dos custos de operação e manutenção, devem ser adicionados os custos do capital investido, considerando uma taxa de juros de 12 % ao ano por um período de 20 anos. Para o Caso 2, na Fig. 9 é apresentada a variação do custo médio de geração de energia elétrica em função do custo do bagaço e da palha, enquanto a Fig. 10 mostra a variação do custo de produção do vapor de processo, admitindo que a palha custe R\$ 35,00/t e a quantidade gaseificada é de 15 toneladas por hora. Para o cálculo do custo do vapor do processo admite o custo de R\$ 35,00/t da palha e varia-se o custo do bagaço.

Na Fig. 11 é apresentada a variação do custo de geração de energia elétrica média em função do custo tanto do bagaço quanto da vinhaça, enquanto a Fig. 12 mostra a variação do custo de produção do vapor de processo, para a configuração do Caso 3, onde envolve a gaseificação de 180 m<sup>3</sup> de vinhaça por hora.

A Fig. 13 apresenta a variação do custo de geração de energia elétrica média em função do custo do bagaço, enquanto a Fig. 14 mostra a variação do custo de produção do vapor de processo, para a configuração do Caso 4, no qual envolve a gaseificação de 78,3 toneladas de bagaço por hora.

Na Fig. 15 é mostrada a variação do custo médio de geração de energia elétrica em função do custo palha e do bagaço, admitindo o custo de R\$ 18,00/m<sup>3</sup> de vinhaça, enquanto a Fig. 16 apresenta a variação do custo de produção do vapor de processo em função do custo do bagaço e da vinhaça, admitindo que a palha custe R\$ 35,00/t.

Na Fig. 17 é apresentada a variação do custo de geração de energia elétrica média em função do preço palha e do bagaço, admitindo o custo de R\$ 18,00/m<sup>3</sup> de vinhaça, enquanto a Fig. 18 mostra a variação do custo de produção do vapor de processo, no qual envolve a gaseificação de 180 m<sup>3</sup>/h de vinhaça, 15 t/h de palha e 78,3 t/h de bagaço.

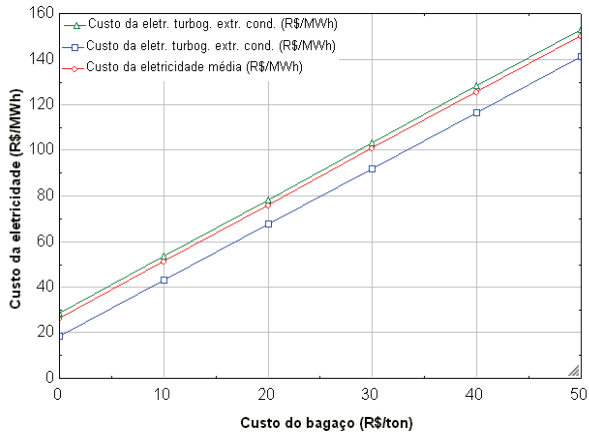


Figura 7. Custo médio da energia elétrica gerada em função do custo do bagaço (Caso 1).

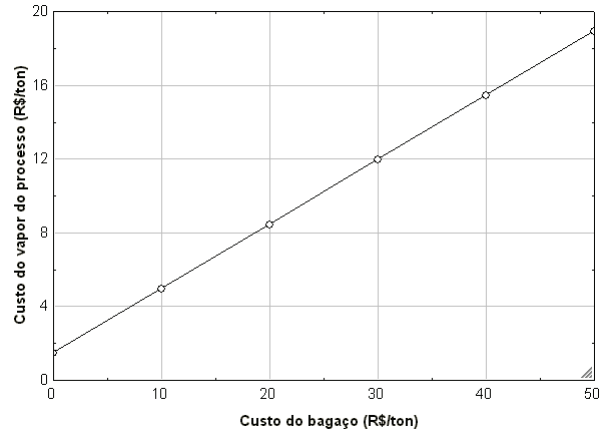


Figura 8. Custo médio do vapor de processo em função do custo do bagaço (Caso 1).

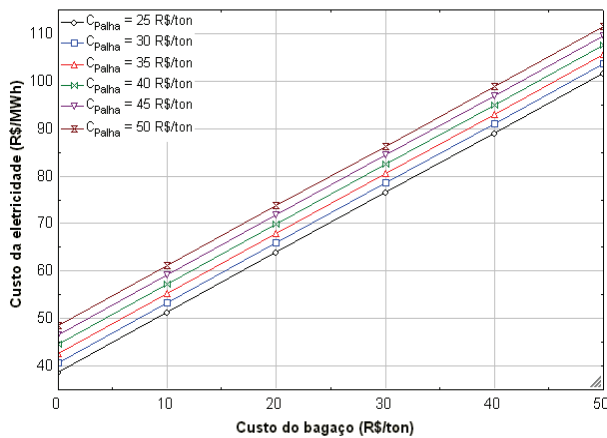


Figura 9. Custo médio da energia elétrica gerada em função dos custos do bagaço e palha (Caso 2).

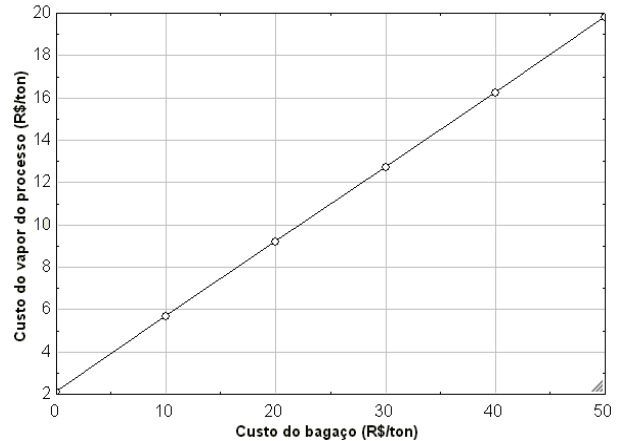


Figura 10. Custo médio do vapor do processo em função do custo do bagaço (Caso 2).

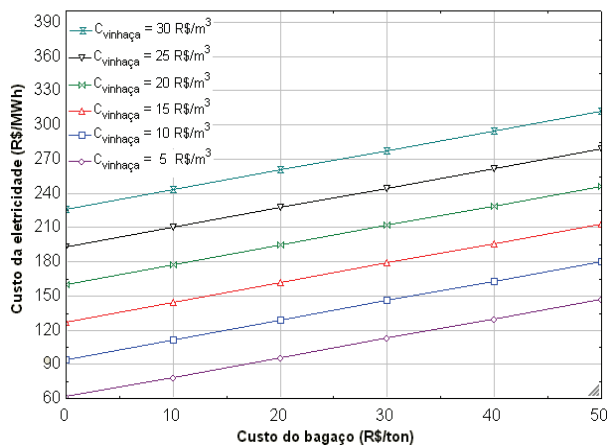


Figura 11. Custo médio da energia elétrica gerada em função dos custos do bagaço e vinhaça (Caso 3).

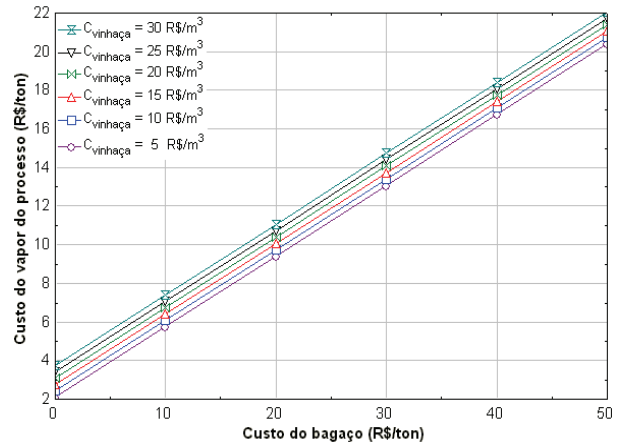


Figura 12. Custo médio do vapor do processo em função dos custos do bagaço e vinhaça (Caso 3).

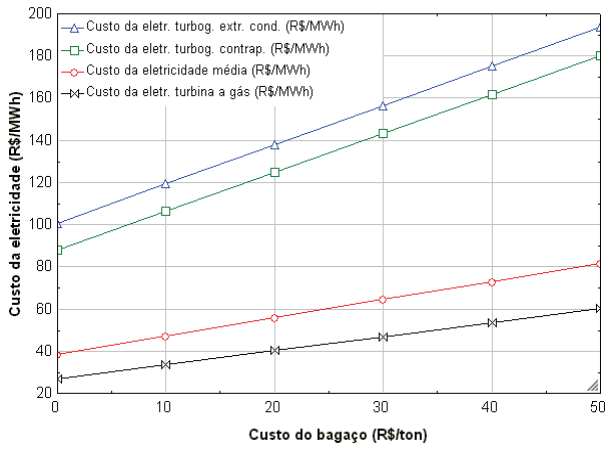


Figura 13. Custo médio da energia elétrica gerada em função do custo do bagaço (Caso 4).

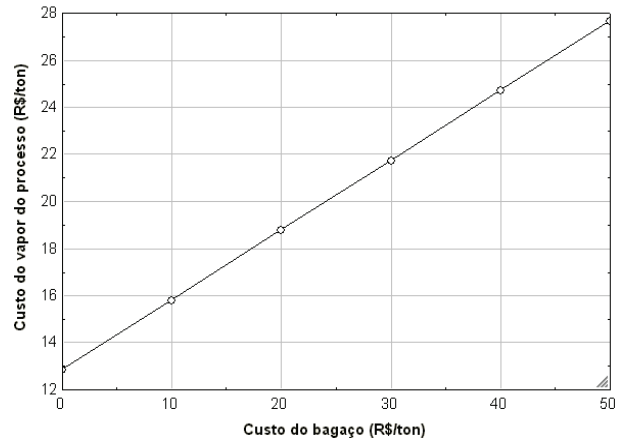


Figura 14. Custo médio do vapor do processo em função do custo do bagaço (Caso 4).

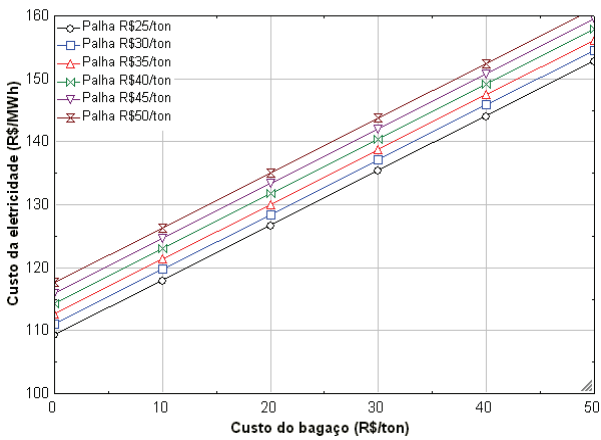


Figura 15. Custo médio da energia elétrica gerada em função dos custos do bagaço e palha (Caso 5).

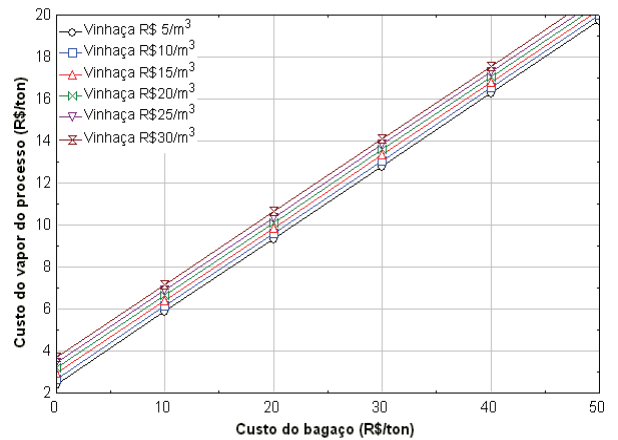


Figura 16. Custo médio do vapor de processo em função dos custos do bagaço e vinhaça (Caso 5).

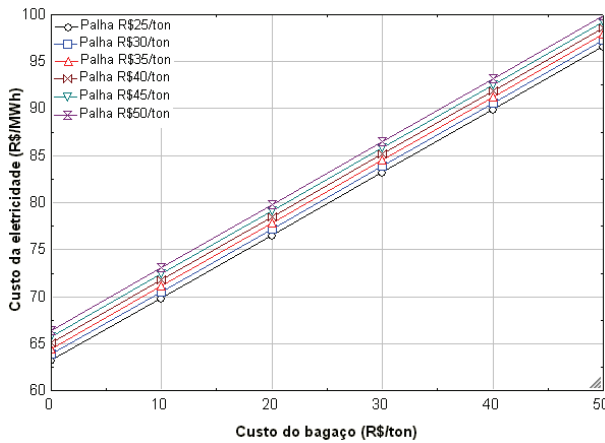


Figura 17. Custo médio da energia elétrica gerada em função dos custos do bagaço e palha (Caso 6).

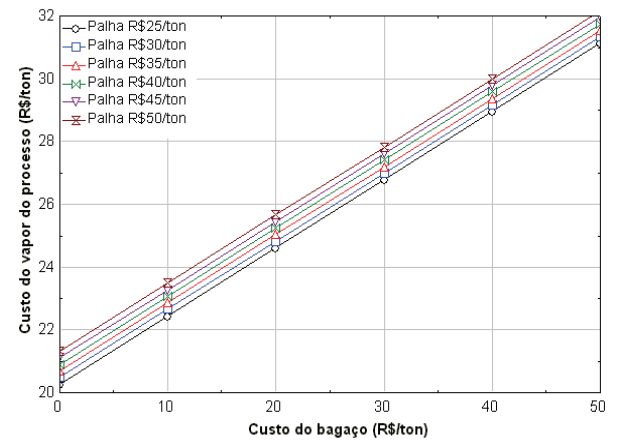


Figura 18. Custo médio do vapor de processo em função dos custos do bagaço e palha (Caso 6).

Os custos médios de geração de energia elétrica e de produção de vapor para o processo são apresentados na Tab. 3 e foram obtidos considerando o custo de R\$ 25,00/t de bagaço, R\$ 35,00/t de palha e R\$ 18,00/m³ de vinhaça.



**Tabela 3. Geração da eletricidade, geração do vapor de processo e eletricidade produzida.**

Parâmetros	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Custo de geração de eletricidade (R\$/MWh)	88,53	74,18	189,90	60,17	134,40	81,21
Custo de geração do vapor de processo (R\$/t)	10,25	11,00	12,11	20,29	11,75	26,12
Quantidade de eletricidade produzida (MW)	32.852	48.675	39.598	99.560	62.813	130.681

Comparando os casos, nota-se uma variação considerável no custo de geração de eletricidade devido tanto ao custo de investimento quanto à quantidade de eletricidade produzida.

Com a implantação da planta de gaseificação da palha (Caso 2) tem-se uma redução no valor do custo da geração de energia de 16,2 %, no entanto há um aumento no custo do vapor do processo de 7,3 %. Neste caso a produção de eletricidade cresceu 48,2 %.

Com a implantação da planta de gaseificação de vinhaça (Caso 3) ocorreu um grande aumento no valor do custo da geração de energia (114,5 %) e o custo do vapor do processo também aumento 18,1 %. Neste caso a produção de eletricidade cresceu 20,5 %. É importante observar que o custo de geração de eletricidade do Caso 3 apresenta uma grande sensibilidade em relação ao custo da vinhaça, de forma que se o preço da vinhaça pudesse ser considerado R\$ 5,00/t, o custo médio da eletricidade seria de R\$ 115,00/t.

Com a implantação da planta de gaseificação de todo o bagaço (Caso 4) tem-se uma redução no valor do custo da geração de energia de 32 %, no entanto há um aumento no custo do vapor do processo de 97,9 %. Neste caso a produção de eletricidade cresceu 203 %.

Com a implantação da planta de gaseificação da palha e da vinhaça (Caso 5) tem-se um aumento tanto no valor do custo da geração de energia (51,8 %) quanto no custo do vapor do processo (14,6 %). Neste caso a produção de eletricidade cresceu 91,2 %.

Com a implantação da planta de gaseificação do bagaço, da palha e da vinhaça (Caso 6) tem-se uma redução no valor do custo da geração de energia de 8,3 %, no entanto houve um aumento no custo do vapor do processo de 154,8 %. Neste caso a produção de eletricidade cresceu 297,8 %.

A opção pela geração de excedentes de energia elétrica exige concepções tecnológicas mais avançadas, que permitam um melhor aproveitamento energético do combustível. Com uma elevação dos níveis de pressão e temperatura do vapor da caldeira consegue-se diminuir as irreversibilidades associadas às grandes diferenças de temperaturas entre os produtos de combustão e o fluido trabalhado. A utilização de um turbogerador de alta eficiência contribuiu para a diminuição das perdas no processo de produção de potência, o que, conseqüentemente, favorece a diminuição do custo unitário de geração.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que a gaseificação da biomassa possibilita um aumento significativo na geração de energia elétrica da planta, para uma mesma moagem.

Através da gaseificação da palha é possível um aumento de 48 % na geração de eletricidade em relação à planta convencional de vapor da usina, com um custo médio de geração de eletricidade 16 % menor, em razão da alta eletricidade produzida. Além disso, não há variação significativa no custo do vapor do processo industrial.

A tecnologia da gaseificação da vinhaça apresentou o maior custo de produção de eletricidade (R\$ 189,90), em virtude do alto investimento necessário para o pequeno aumento na geração de eletricidade obtido. É importante observar ainda que este caso apresenta uma grande sensibilidade em relação ao custo da vinhaça, de forma que se o custo deste insumo pudesse ser considerado de R\$ 5,00/t, o custo da eletricidade seria de R\$ 115,00/MWh.

O caso que considera a gaseificação de todo o bagaço (Caso 4) apresentou o menor custo médio de geração de eletricidade. Isso ocorre devido ao grande aumento na geração de eletricidade neste caso, o qual é conseguido com uma configuração diferente para a planta, mas com a mesma quantidade de combustível (bagaço). Entretanto há um aumento no custo de vapor de processo, uma vez que este vapor passou a ser gerado pela caldeira de recuperação, e considera o custo de investimento nos equipamentos da planta a gás.

Através da gaseificação de toda a biomassa da planta foi possível uma geração de 130,7 MW de eletricidade, com um custo médio de geração inferior ao da planta inicial de vapor da usina. Este baixo custo de geração é devido à grande quantidade de bagaço gaseificado, o que permite uma alta geração de eletricidade. Entretanto há um grande aumento no custo do vapor de processo neste caso, uma vez que todo este vapor é gerado pela caldeira de recuperação.

A tecnologia da gaseificação da biomassa possibilitou um aumento na geração de eletricidade em todos os casos estudados. Entretanto, os casos que envolvem a gaseificação da biomassa sólida (palha e bagaço) são os que apresentam os menores custos médios de geração de eletricidade, principalmente nos casos com gaseificação do bagaço, os quais apresentam também as maiores quantidades de eletricidade produzida.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo fornecimento de bolsas de iniciação científica, e à FAPESP, pelo fornecimento de toda a infraestrutura computacional (Processo 05/1197-6) e de uma bolsa de mestrado (Processo 08/56944-9).

## 7. REFERÊNCIAS

- Albuquerque, A.G., 2005, "Avaliação exergética dos efluentes no processo industrial do álcool", Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 75 p.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., 1996, "Thermal Design & Optimization", John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 542 p.
- Bejan, A., 1988, "Advanced Engineering Thermodynamics", John Wiley & Sons, New York, 850 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, 194 p.
- Fiomari, M.C., 2004, "Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Ilha Solteira, 129 p.
- Garagatti Arriola, D.W., 2000, "Sistema tri e tetra combinado de cogeração: Avaliação exergética e termoeconômica" Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 206 p.
- Gas Turbine World Handbook (2001-2002).
- Klein, S.A., Alvarado, F.L., 1995, "EES – Engineering Equation Solver", F-Chart Software, Middleton, WI.
- Passolongo, R., Ramos, R.A.V., Woiski, E.R., Maia, C.R.M., 2009, "Integration of biomass gasification systems in a sugar-ethanol factory: Study of cases", Proceedings of the 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Foz do Iguaçu, pp. 1371-1380.
- Salomon, K.R., Lora, E.E.S., Monroy, E.F.C., 2007, "Custo do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça e sua utilização", Anais do 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica (em CD-ROM), 8 p.
- Sánchez Prieto, M.G.S., 2003, "Alternativas de cogeração na indústria sucroalcooleira: 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.
- Seabra, J.E.A., 2008, "Avaliações técnico-econômicas para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil", Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, 274 p.
- Simtech IPSEpro, [S.I.] 1991-2003, "Process Simulation Environment (PSE)". Manual version 4.0.001.
- Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R., 1988, "Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical process", Hemisphere Publishing Corporation, New York, 332 p.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material incluído neste trabalho.

# THERMOECONOMIC EVALUATION OF THE INTEGRATION OF A BIOMASS GASIFICATION SYSTEM IN A SUGAR-ALCOHOL INDUSTRY

Rodnei Passolongo, rodneipas@gmail.com

Thiago Pagoto Alves Luz, thiagopalsud@hotmail.com

Lucas Fernando Biazotti Bonan, lucasbonan@hotmail.com

Ricardo Alan Verdú Ramos, ramos@dem.feis.unesp.br

Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica, Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia, Av. Brasil, 56, Centro, CEP 15.385-000, Ilha Solteira, SP.

**Abstract:** *This work analyses, from the thermoeconomic point of view, the performance of different configurations of a cogeneration plant of a sugarcane mill located in the region west of São Paulo State, through the integration of systems for gasification of straw, bagasse and vinasse. Firstly a study of the use of the straw for energy production accomplished, through gasification to produce synthesis gas to be utilized as fuel in a gas turbine. Then it is studied the use of vinasse, that is generated in great amount as a by-product of alcohol production, for biogas generation through a biodigestion process, which can be used in a gas turbine to produce electric power. Finally, it is studied the integration of a system for gasification of sugarcane bagasse, in order to know the advantages of this process. Thus, are presented a comparative analysis of six cases, with the first base case in which is considered a conventional thermal power plant of a sugar-alcohol factory, and other cases considering the gasification of straw, vinasse and bagasse, separately, and involving the integration of these systems, considering the gasification of straw and vinasse in a case and, finally, the gasification of all biomass. The results show that the gasification of biomass provides a significant increase in electric power generation of the plant in some cases, with consequent feasibility for deployment.*

**Keywords:** *Sugar-Alcohol Factory, Cogeneration, Gasification, Thermoeconomy.*