



CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA PARA SISTEMAS DE COGERAÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR

Ricardo C. Carpio

Flávio N. Teixeira

Fernando C. Bessa

Electo S. Lora

Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI)

Departamento de Engenharia Mecânica (IEM/DME)

Av. BPS, 1303, CP 50, Bairro Pinheirinho

Itajubá/MG, CEP 37500-000

Resumo. São analisados dois esquemas de cogeração: um com turbina de contrapressão com parâmetros do vapor de 2,1 MPa e 300 °C, e outro com turbina de condensação com extrações e parâmetros do vapor de 8,0 MPa e 450 °C. Os dois casos correspondem a uma usina de 200 t/h de capacidade de moenda de cana-de-açúcar. Para a determinação da eficiência de geração de eletricidade e calor são aplicados diferentes critérios termodinâmicos: o fator de utilização de energia, a eficiência térmica artificial, a relação de economia de energia do combustível e a eficiência de cogeração. Analisa-se também a possibilidade de utilização de combustíveis auxiliares para o período fora de safra empregando a palha de cana, o eucalipto e o gás natural, considerando ainda diferentes cenários de preços. Para cada caso determina-se o custo de geração de eletricidade, realizando a alocação de custos pelo método da extração.

Palavras-chave: Cogeração, Indústria açucareira, Bagaço de cana.

1. INTRODUÇÃO

A redução dos investimentos no setor elétrico nos anos 80 e 90, na maioria dos países da América Latina, acompanhada pelo contínuo aumento no consumo de eletricidade, está levando a sérias dificuldades no abastecimento da demanda. É evidente também que os governos da região não dispõem dos recursos financeiros necessários para os investimentos que requer o setor. As soluções apontadas são a desregulamentação do mercado, a participação de capital privado e o estímulo à geração independente e descentralizada de eletricidade. Neste sentido é notável o potencial da indústria açucareira, devido a disponibilidade de grandes quantidades de resíduos lignocelulósicos, na forma de bagaço e

palha de cana. Este último termo envolve além da palha propriamente dita (folhas secas), as folhas verdes e as pontas.

Recentes publicações sobre a redução da produção de petróleo já nos próximos decênios acentuam ainda mais a importância perspectiva da biomassa como fonte de energia. Assim são cada vez mais frequentes as notícias de grandes investimentos das multinacionais do petróleo em projetos de reflorestamento e de demonstração de tecnologias avançadas para a conversão energética da biomassa.

Segundo dados de Herrera (1999), existem no mundo 70 países produtores de cana-de-açúcar, com um área semeada de 12,7 milhões de hectares. A geração de eletricidade com tecnologias modernas e um índice de eletricidade excedente de 50 kWh por tonelada de cana representaria, para América Latina e o Caribe, cerca de $2,07 \cdot 10^{10}$ kWh.

A cana-de-açúcar deve ser vista de uma maneira integral como fonte de alimentos humano e animal, energia, fertilizantes e alguns outros subprodutos. A cana-de-açúcar é a variedade agrônômica de maior eficiência no processo de fotossíntese, utilizando 2-3 % da radiação solar incidente na produção de biomassa vegetal (Braun, 1994). O conteúdo global de energia nos resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha) é de 7,7 EJ (Braun, 1994), sendo o consumo total de energia comercial no mundo de aproximadamente 330 EJ. A comparação do custo da energia de outros tipos de biomassa tais como o eucalipto cujo valor é de US\$2,2 por GJ como valor médio para o Brasil (Silva e Horta, 1998) com o custo do bagaço e da palha de cana cujos valores oscilam entre US\$0,28-1,68 por GJ e US\$0,95-2,21 por GJ, respectivamente (Braun, 1994), permite classificar o bagaço como biomassa de baixo custo, o que faz rentável a geração de eletricidade com tecnologias de baixa eficiência durante a safra.

De acordo com a publicação do International Cane Energy News (1995) a capacidade instalada para a geração de eletricidade era de 413,4 MW dos quais 287,4 MW correspondem a energia excedente. Nesse mesmo ano estavam em processo de montagem 287,4 MW, sendo que 204 MW estavam planejados para produzir eletricidade excedente.

A energia elétrica excedente gerada nas usinas de açúcar precisa ser vendida às concessionárias e chegar ao consumidor final. Vários fatores têm incidido negativamente na compra e comercialização da eletricidade gerada nas usinas pelas concessionárias:

- Carência de políticas energéticas no passado que estimulassem a geração descentralizada de excedentes elétricos;
- Existência de um monopólio estatal no setor elétrico;
- Ausência da participação privada no mercado energético;
- Tarifas de venda da eletricidade excessivamente baixas não remunerando adequadamente os autoprodutores;
- Falta de incentivos fiscais e financeiros para a geração independente da eletricidade;
- Sazonalidade da colheita da cana-de-açúcar e dificuldades para garantir a geração durante todo o ano.

Atualmente em vários países latinoamericanos observa-se a tendência de se incentivar a cogeração na indústria açucareira. Tem-se reportado estudos e avanços neste sentido no Brasil, Costa Rica, Jamaica, Guatemala e Honduras. Em particular, no Brasil, ante a perspectivas de tarifas competitivas para a venda de eletricidade às concessionárias privatizadas, observa-se a formação de 'joint venture' entre bancos e usinas de açúcar com o objetivo de aumentar a capacidade de geração e entrar no mercado de eletricidade. Um exemplo disto é o acordo entre o Banco Bradesco e várias usinas de açúcar. Um outro projeto considera a construção de uma termelétrica a bagaço a partir de excedentes deste combustível comprados de várias usinas. Segundo Walter (1996) o potencial de cogeração no Brasil quando se utilizam sistemas de condensação com altos parâmetros do vapor e tecnologias avançadas é 3663 MW e 7880 MW, respectivamente.

A tecnologia de geração de eletricidade predominante nas usinas no Brasil é a turbina de contrapressão. Como desvantagem principal deste sistema temos a pouca flexibilidade de geração e os baixos parâmetros de vapor. Vários estudos tem sido realizados sobre aspectos paramétricos e econômicos deste sistema de cogeração (Walter et al., 1996; Barreda e Llagostera, 1998). As turbinas de condensação com extrações e altos parâmetros de vapor permitem, além de maiores índices de geração de eletricidade e menores custos específicos, uma maior flexibilidade entre os processos de produção de eletricidade e calor (Albert - Thenet, 1991). Porém existem dúvidas com relação ao custo da eletricidade no período de safra, a eficiência de geração de eletricidade e calor e em relação aos indicadores do sistema quando se utilizam combustíveis auxiliares para a operação fora de safra.

O presente trabalho compara os indicadores termodinâmicos e econômicos de um sistema com turbina de contrapressão e de um sistema com turbina de condensação com extrações. É realizada uma análise preliminar da viabilidade econômica da utilização de vários combustíveis auxiliares para a época fora de safra, a saber: palha de cana, eucalipto e gás natural, considerando as faixas de variação do preço destes combustíveis no mercado brasileiro.

2. PARÂMETROS DE OPERAÇÃO E CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS PARA AS VARIANTES CONSIDERADAS

As Figs. 1 e 2 mostram os esquemas das variantes de sistemas de cogeração considerados nos cálculos. Os principais parâmetros de operação estão indicados na Tabela 1. No Brasil o esquema da Fig. 1 é o mais difundido.

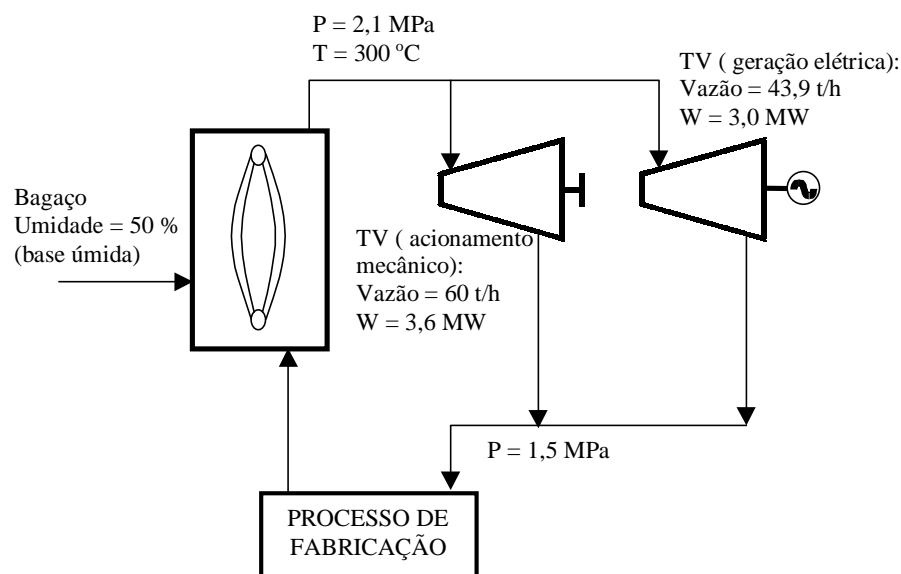


Figura 1- Esquema do sistema de cogeração com turbina de contrapressão (TV-CP).

3. A UTILIZAÇÃO DO COMBUSTÍVEL AUXILIAR PARA A ÉPOCA FORA DE SAFRA

Existem várias opções para o consumo de combustível auxiliar no período fora de safra, algumas já aplicadas em alguns países e outras em etapa de estudo. Em geral as possíveis variantes são:

- Os resíduos agrícolas de cana, que incluem as folhas e pontas, além das palhas;

- O carvão mineral;
- O gás natural;
- A madeira de florestas energéticas.

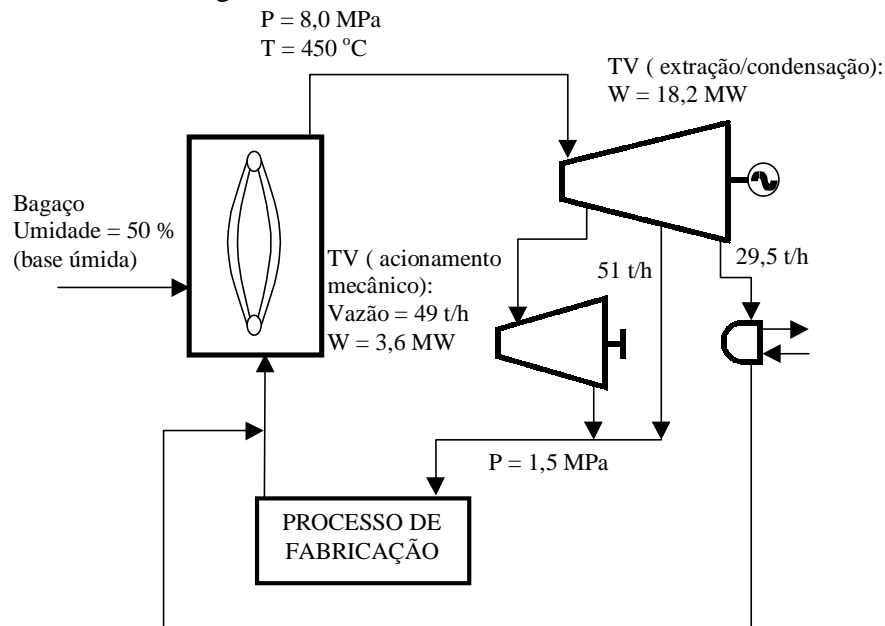


Figura 2- Esquema do sistema de cogeração com turbina de condensação de duas extrações (TV-C2E).

Tabela 1. Parâmetros de operação

Parâmetro	Unidade	Turbina de Contrapressão	Turbina de Condensação
Pressão do vapor na saída da caldeira	MPa	2,1	8,0
Temperatura do vapor na saída da caldeira	°C	300	450
Pressão do vapor na 1ª extração	MPa	-	2,1
Pressão do vapor na 2ª extração (pressão de processo)	MPa	1,5	1,5
Pressão de condensação	MPa	-	0,02
Consumo de energia para acionamento mecânico	kWh/tc	18	18
Consumo de eletricidade na usina	kWh/tc	11	11
Consumo de vapor para processo	kg/tc	520	500

A opção do carvão mineral já é aplicado nas Ilhas Maurício e na África do Sul, onde já se desenvolveu a tecnologia para a queima alternada de bagaço e carvão mineral nas caldeiras. A possibilidade de se utilizar a madeira de eucalipto provenientes de florestas energéticas, como combustível em centrais açucareiras na época de entressafra, foi analisada por van den Broek e van Wijk (1997) para as condições típicas da Nicarágua. Estes autores fazem uma análise técnico-econômica comparando a madeira de eucalipto e o Diesel para geração de energia elétrica. Para um custo energético do eucalipto de US\$ 1,3 por GJ, o custo de geração resulta em US\$ 0,04 por kWh, ou seja, US\$ 0,015 por kWh menor que o custo ao se utilizar o diesel.

Com relação ao resíduos agrícolas da cana torna-se necessário apontar alguns aspectos:

Quantidade disponível: De acordo com o artigo "Power for the grid from sugar cane residues" (USAID, 1989), para cada tonelada de cana coletada manualmente, 0,66 tonelada de

pontas e folhas ficam no campo. As folhas exercem um papel importante na manutenção da umidade e fertilidade do solo. Como resultado de experiências realizadas em Porto Rico, determinou-se que 30 a 50% da palha é suficiente para a fertilidade do solo. Por outro lado considera-se que 50% da palha é suficiente para manter a geração elétrica fora de safra em uma central moderna. As quantidades de palhas coletadas para testes realizados em diferentes países foram (USAID, 1989):

- República Dominicana - 12,0 t/ha;
- Costa Rica - 11,0 t/ha;
- Tailândia - 13,6 t/ha;
- Filipinas - 10,0 t/ha;
- Cuba - 4,0 a 7,0 t/ha em base seca (Aguilar et al., 1996).

3.1 Características técnicas da palha de cana e de sua cinza:

Na Tabela 2 abaixo, apresenta-se as características técnicas da palha de cana de açúcar (poder calorífico inferior, umidade e conteúdo de cinzas) segundo diferentes autores.

Tabela 2- Características técnicas da palha de cana de açúcar

	Poder calorífico inferior (PCI - base seca), MJ/t	Umidade	Conteúdo de cinzas	Referência
1	15,62	7,80 – 30,38**	9,40	Alvarez et al. (1986)
2	12,48	25,30	7,00	Aguilar et al. (1996)
3	15,88	-	7,20	Arias et al. (1992)
4	15,86	-	13,20	Armas e Rubio (1990)
5*	14,80	50,00	6,00	Magasiner (1996)

* Dados do bagaço de cana para comparação;

** 30,38 é o conteúdo de umidade inicial, a partir do quinto corte a umidade mantém-se mais ou menos constante em torno de 7,8 %.

Na Tabela 3 abaixo, tem-se a composição química da palha de cana e, para fins de comparação, é mostrado também os dados correspondentes à cinza do bagaço da cana.

Tabela 3- Composição química das cinzas da palha e cana de açúcar (Arias et al., 1992)

Combustível	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
Palha de cana	64,71	4,21	13,77	6,22	1,37	6,87	1,00	0,27	0,01
Bagaço	67,52	3,50	7,60	3,50	8,95	3,75	2,17	1,70	0,03

Custo de colheita e enfardamento (USAID, 1989):

- República Dominicana (Central Romana) - US\$ 7,10 por tonelada;
- Filipinas - US\$ 18,00 por tonelada;
- Jamaica (Central Monymusk) - US\$ 8,47-10,44 por tonelada;
- Costa Rica (Central El Viejo) - US\$ 11,80 por tonelada;
- Tailândia (Central Nong Yai) - US\$ 16,00 por tonelada.

O custo neste caso depende consideravelmente da quantidade total de palha coletada, sendo menor quanto maior for a quantidade.

4. RESULTADOS

Para o cálculo da eficiência de cogeração propõem-se diferentes expressões na literatura (Horlock, 1997), que pretendem considerar a eficiência “integral” de geração de eletricidade e calor segundo diferentes critérios de avaliação destes produtos. Os dois primeiros critérios são convencionais e não introduzem diferenças qualitativas entre a potência e o calor. Considera-se que a taxa de economia de energia do combustível é um dos melhores indicadores baseados na primeira lei, pois determina a economia de combustível inerente a cogeração, em comparação com a geração convencional de calor e energia por separado. Os critérios 4 e 5 utilizam-se do conceito de exergia para destacar a diferença de “qualidade” do trabalho e do calor, sendo portanto uma medida mais real da eficiência do processo de cogeração.

1. Fator de utilização de energia (FUE)

$$FUE = \frac{P_{\text{mec. total}} + Q_u}{F} \quad (1)$$

2. Eficiência térmica artificial (η_A)

$$\eta_A = \frac{P_{\text{mec. total}}}{\left[F - \left(\frac{Q_u}{\eta_{\text{cald}}} \right) \right]} \quad (2)$$

3. Taxa de economia da energia do combustível (FESR)

$$FESR = \frac{\left(\frac{Q_u}{\eta_{\text{cald}}} \right) + \left(\frac{P_{\text{mec. total}}}{0,35} \right) - F}{\left(\frac{Q_u}{\eta_{\text{cald}}} \right) + \left(\frac{P_{\text{mec. total}}}{0,35} \right)} \quad (4)$$

4. Eficiência exergética (η_E)

$$\eta_E = \frac{P_{\text{mec. total}} + E_H}{F} \quad (5)$$

5. Eficiência de cogeração (η_{CG})

$$\eta_{CG} = \frac{P_{\text{mec. total}} + E_H + \phi \times (Q_u - E_H)}{F} \quad (6)$$

W	- potência mecânica total, (kW);
Q_u	- potência térmica, (kW);
η_{cald}	- eficiência da caldeira;
F	- potência do combustível, (kW);
E_H	- taxa de exergia do calor, (kW);

$\phi \times (Q_u - E_H)$ - valor da irreversibilidade inevitável quando Q_u deve ser fornecido.

Os resultados dos cálculos das eficiências dos sistemas de cogeração considerados, segundo os critérios mostrados acima, são apresentados na Tabela 4. De acordo com todos os critérios o sistema TV-C2E apresenta uma maior eficiência. É notável o fato de que para este sistema a taxa de economia de combustível FESR é muito maior, assim como a eficiência artificial.

Tabela 4. Eficiências dos sistemas de cogeração segundo diferentes critérios

Sistema de cogeração	Eficiência, %				
	FUE	FESR	η_A	η_E	η_{CB}
TV-CP	74,0	3,0	42,0	22,0	28,0
TV-C2E	80,0	20,0	66,0	28,0	34,0

Os indicadores técnico-econômicos dos sistemas de cogeração e o custo de geração são apresentados nas Tabelas 5 e 6. A alocação de custos entre o calor e a eletricidade foi realizada pelo método da extração, isto é, para o custo do calor gerado considerou-se o preço da caldeira, enquanto que para o custo da eletricidade considerou-se o custo das turbinas. Não foi assumido um custo “zero” para o bagaço, ele foi realmente considerado um resíduo de baixo custo (R\$ 5 por tonelada), o que fica mais perto da realidade. Além disso, para o período fora de safra, não se determinou o custo da eletricidade gerada com combustíveis auxiliares para o sistema TV-CP pois não existem consumidores de calor e, desta forma, não justificaria gerar energia elétrica por este sistema. Esse é o fato da baixa flexibilidade dos sistemas TV-CP descrito anteriormente.

A disponibilidade de gás natural no Estado de São Paulo faz-se necessário considerar a possibilidade de utilização deste combustível na época fora de safra. As faixas de variação dos preços dos combustíveis foram determinados a partir de dados retirados da literatura afim de realizar um estudo da sensibilidade da mudança do cenário de preços. O carvão natural não foi considerado tendo em vista os problemas ambientais que ele acarretaria (grandes emissões de SO_2 , particulados, etc.).

Finalmente para a avaliação técnico-econômica dos sistemas de cogeração operando na entressafra foram selecionados como combustíveis complementares a palha de cana, o eucalipto e o gás natural. Os resultados da Tabela 6 e da Fig. 3 mostram que o gás natural é a variante com menor custo de geração. A utilização da palha para custos de colheita e transporte inferiores a R\$ 25 por tonelada pode também ser uma opção viável. O custos atuais do eucalipto plantado inviabilizam o uso do mesmo como combustível complementar em sistemas com turbinas de condensação. A Fig. 4 mostra o valor do custo de geração para os combustíveis mencionados considerando os preços médios atuais do mercado.

Tabela 5. Indicadores técnico-econômicos dos sistemas de cogeração.

Sistema de cogeração	Potência instalada (MWe)	Índice de eletricidade excedente		Investimento específico (R\$/kWe)
		KWh/t cana	kWh/t açúcar	
TV-CP	3,02	4,11	41,06	3359,8
TV-C2E	18,17	79,87	798,66	1045,6

Tabela 6. Custos de geração de eletricidade e calor dos sistemas de cogeração para os períodos de safra e entressafra.

Sistema de Cogeração	Custo da eletricidade na safra (10^{-3} R\$/kWh)	Custo de geração no período fora de safra (10^{-3} R\$/kWh)									Custo calor na safra (10^{-3} R\$/kWh)
		Preço - palha R\$/t			Preço - eucalipto R\$/t			Preço - gás natural R\$/t			
		12,6	25,2	36,0	26,9	47,6	62,1	127,4	152,9	191,1	
TV-CP	290,0	-			-			-			15,0
TV-C2E	60,0	90,0	100,0	110,0	60,0	90,0	100,0	58,0	64,0	74,0	20,0

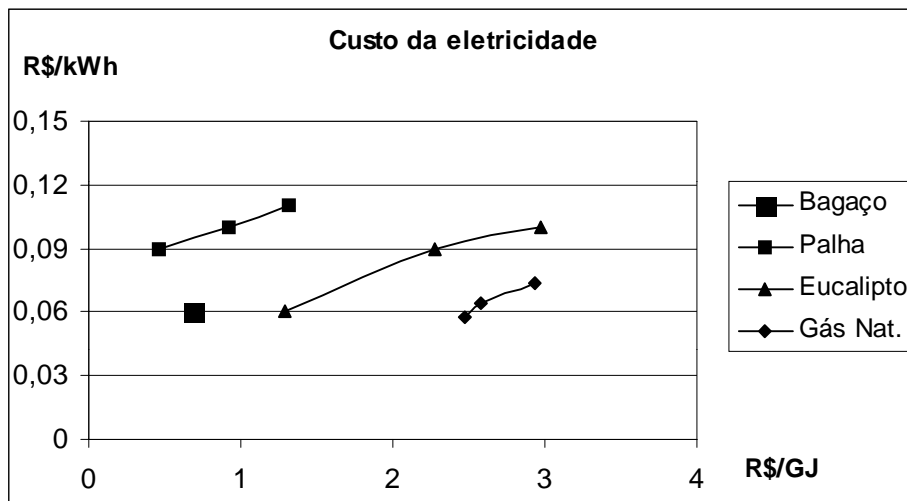


Figura 3- Análise de sensibilidade do custo de geração de eletricidade pelo sistema com turbina de condensação no período entressafra para diferentes combustíveis auxiliares.

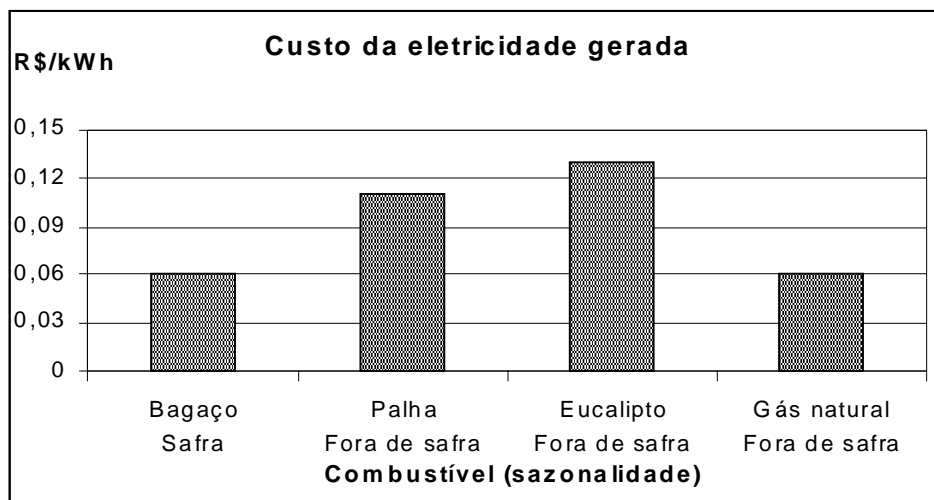


Figura 4- Custo da eletricidade gerada pelo sistema com turbina de condensação no período de safra e entressafra para os valores de mercado dos diferentes combustíveis.

5. CONCLUSÕES

1. De acordo com os critérios considerados para a determinação da eficiência em sistemas de cogeração, o sistema TV-C2E apresenta um melhor desempenho, sendo notável o fato de que para o mesmo a taxa de economia de combustível FESR é muito maior, assim como a eficiência artificial.
2. gás natural é o combustível complementar com menor custo de geração. A utilização da palha para custos de colheita e transporte inferiores a R\$ 25 por tonelada pode também ser uma opção viável. O custos atuais do eucalipto plantado inviabilizam o uso do mesmo como combustível complementar em sistemas com turbinas de condensação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento Capes, CNPq e Fapemig pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS

- Aguilar, A. Rodriguez, M., Leal, D., Perez, F., 1995, "Cane agricultural waste fuel potential and available technology", Proceedings of the 22 ISSCT Congress, Cartagena, Colombia.
- Albert-Thenet, J., 1991. "Steam economy in cane sugar factories", Proceedings of the International Conference on Energy from Sugarcane, Hilo, Hawaii, pp. 223-243.
- Alvarez, J.C., Ramos, D.N., Rodriguez, R.D., Guada, C.L., 1986, "Caracterización de la paja de caña como combustible", Ingeniería Energética, Vol.VI, No. 3, pp. 237-246.
- Arias. A.R., Pineda, L.B., Leal, R.L., Cedeño, Y.L., Muriño, T.B., 1992, "Manual de las propiedades fisico-químicas de los combustibles sólidos disponibles en Cuba", MINBAS.
- Armas, F.R.N., Rubio, A., Victoria, B., "Caracterización de la paja como combustible", Centro Azucar, 17 (3), julio-setiembre, pp. 16-20, 1990.
- Barreda, E. Llagostera, J., 1998, "Comparação econômica de alternativas de cogeração em usinas de açúcar" Anais do Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, La Habana, Cuba.
- Braun, G., 1994, "Bioenergía para el desarrollo", Proceedings of the International Seminar "Commercial Energy Generation in the Cane Agro-industry", Ciudad de Guatemala, Guatemala, pp. 39-50.
- Herrera, M.C., 1999, Diretora do Programa de Diversificação do GEPLACEA (Grupo de Países Latino-Americanos e do Caribe Exportadores de Açúcar). Comunicação interna.
- Horlock, J.H., 1997, "Cogeneration – Combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics, Krieger Publishing Company.

- Magasiner, N., 1996, "Bagasse-fired boiler design with reference to cogeneration", International Sugar Journal, Vol. 98, No. 1167, pp. 100-109.
- Silva, E., Horta, L.A.N., 1998, "Technoeconomic evaluation of gasification technologies for small scale electricity generation from biomass", pp. 473-482, Proceedings of the Bioenergy'98 Conference.
- USAID, 1989, "Power to the grid from sugarcane residues", Bioenergy Systems Report.
- van den Broek, R., van Wjik, A., 1997, "La generación de electricidad a partir de eucalipto en ingenios azucareros en Nicaragua" Presentado y publicado en la reunión regional sobre la biomasa para la producción de energía y alimentos.
- Walter, A.C.S., Llagostera, J., Gallo, W.L.R., 1996, "Análise de parâmetros de alocação de custos em sistemas de cogeração equipados com turbinas de contrapressão", Proceedings do VI ENCIT/VI LATCYM, pp. 195-200.
- Walter, A.C.S., 1996, "Avaliação e localização do potencial brasileiro de produção de eletricidade a partir de sub-produtos da cana-de-açúcar", Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia, pp. 571-582.

THERMODYNAMICS ASSESMENT CRITERIA FOR COGENERATION SYSTEMS IN SUGAR CANE FACTORIES

Abstract. Two cogeneration plants are analyzed: the first employs a back pressure turbine with steam parameters of 2,1 MPa and 300 °C, and the other one an extraction/condensation turbine with steam parameters of 8,0 MPa and 450 °C. Both cases correspond to a sugar cane factory with 200 t/h of sugar cane milling capacity. For the electricity and heat generation efficiency different thermodynamics criteria are applied: the energy utilization factor, the artificial thermal efficiency, the fuel energy economics relationship and the cogeneration efficiency. The possibility of auxiliary fuels utilization in off-season period using cane trash, eucalyptus, and natural gas is analyzed, considering also different prices scenarios. For each case the electricity generation cost is calculated, using the extraction cost allocation method.

Keywords: Cogeneration, Sugar cane factories, Cane trash.