



EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS AQUATUBULARES DIANTE COMBUSTÃO DE DIFERENTES CULTIVARES DE CANA DE AÇÚCAR

M. C. DIAS², A. M. B. SILVA^{1,2}, L. R. JÚNIOR¹

¹ Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Elétrica

² Universidade de Uberaba, Programa de pós-graduação – mestrado em engenharia química

RESUMO – *A crescente demanda por energia de fontes renováveis busca cada vez mais a implantação de sistemas eficientes de produção energética. Assim, o objetivo deste trabalho é determinar a eficiência térmica de uma caldeira aquatubular que ao queimar o bagaço de quatro cultivares de cana de açúcar. Essa eficiência será determinada através dos métodos de cálculo: PCI - poder calorífico inferior, PCS - poder calorífico superior e método direto. Os resultados obtidos mostram a importância da análise energética de diferentes cultivares proporciona para a cogeração energética. Dentre os benefícios do manejo controlado tem-se: maximização dos processos e uma otimização do aproveitamento energético de cada cultivar. O rendimento ótimo da caldeira na produção de energia em relação à produção de vapor depende das variáveis intrínsecas de cada cultivar, como teor de bagaço e umidade.*

1. INTRODUÇÃO

A biomassa do bagaço da cana-de-açúcar possui alto potencial energético para a produção de eletricidade por meio da cogeração, pois o processamento da cana-de-açúcar gera matéria-prima energética e possui vasta área para cultivo em solo brasileiro. Dentro dessa perspectiva, o objetivo deste trabalho é identificar qual cultivar SP 80-1816, RB72-454, SP80-3280 e SP81-3250 apresenta os melhores indicadores energéticos para ser selecionada como fonte primária de energia para a caldeira.

2. BIOELETRICIDADE

Se toda a biomassa da cana-de-açúcar após o processamento fosse utilizada, a bioeletricidade no Brasil teria um potencial técnico de chegar a 146.000 GWh, considerando o processo de produção de energia por cogeração nas usinas.



3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da biomassa

O bagaço com origem na moagem da cana-de-açúcar é um subproduto de alto valor energético utilizado na indústria sucroalcooleira como insumos na produção de vapor. Sua composição varia de acordo com o tipo de cultivar e pode conter em sua constituição 45 a 55% de água, 40 a 53% de fibra, 2 a 5% de sólidos e 1% de cinzas dissolvidas (Van der Poel et al., 1998). Segundo Meirelles (1984), dois grupos distintos de bagaços são observados, o primeiro grupo é formado pelas fibras (partículas maiores) e o segundo pela medula ou pó (partículas menores).

3.2 Poder calorífico

Segundo Cortez et al. (2008), o valor calorífico de qualquer fonte de energia é a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa combustível, sendo medido em kJ / kg ou em cal / kg. Os cálculos realizados neste estudo são baseados no PCS e PCI das cultivares SP 80-1816, RB72-454, SP 80-3280 e SP81-32.50. As amostras foram coletadas coincidentemente durante a colheita da cana-de-açúcar em outubro de 2007 (Lima, 2009).

Tabela 1. Poder calorífico dos cultivares pesquisados.

Cultivar	Volume de palha (m ³ /t)	PCS (Mcal/t)	PCI (Mcal/t)	Umidade %
SP 80-1816	7,964	4582,70	4247,90	69,04
RB 72-454	8,610	4511,34	4176,79	70,57
SP 80-3280	9,369	4426,97	4092,17	69,60
SP 81-3250	10,619	4331,77	3996,97	69,13

Após a realização dos cálculos, os resultados encontrados foram apresentados na tabela 1, na qual pode-se verificar que a variedade SP 80-1816, mesmo com o menor valor de volume da canudo em m³ / t, apresentou os maiores valores de PCS e PCI, uma vez que a porcentagem de umidade não apresentou diferença significativa entre as variedades. O cientista russo Mendeliev (1987) propôs uma expressão para o cálculo do PCI em kJ / kg a partir da composição elementar do combustível evidenciada pela expressão 1 (Cortez et al., 2008).



$$PCI' = 339C' + 1030H' - 109(O' - S') - 24W' \quad (1)$$

Ainda sobre o poder calorífico, a equação 2 pode ser usada para converter o PCS de base seca em base de trabalho, e para converter o valor calorífico superior da base seca em valor calorífico inferior em base de trabalho, a equação 3 é usada (Cortez et al., 2008).

$$PCS' = PCS^s (100 - W') \quad (2)$$

$$PCI' = \left\{ \left[PCS^s - \lambda(r + 0,09H^s) \right] \left(\frac{100 - W'}{100} \right) \right\} \quad (3)$$

3.3 Caldeira

Existem basicamente dois tipos de caldeiras, são elas: caldeiras flamotubulares e aquatubulares, que podem receber diferentes classificações quanto à sua empregabilidade e utilização. A caldeira flamotubular é um dos equipamentos mais utilizados geradores na indústria, não precisam trabalhar com alta pressão e vazão de vapor, não precisam de espaços consideráveis, podem ser posicionados verticalmente quando necessário e seu custo é relativamente baixo.

A caldeira aquatubular, funciona com a circulação de gases quentes pelo exterior dos tubos e a água passa por eles. Os tubos neste modelo de caldeira são dispostos como se fossem paredes de água ou vigas tubulares. Esta mudança na configuração permite que as peças onde as maiores pressões estarão com diâmetro reduzido, permitindo que maiores valores na pressão sejam alcançados, porém, para o bom funcionamento deste modelo é necessário um maior controle das variáveis do processo.

3.4 Metodologia e dados

Os valores de PCS das quatro cultivares de cana-de-açúcar SP 80-1816, RB72-454, SP80-3280 e SP81-3250 foram obtidos da seguinte forma: as amostras das cultivares foram trituradas,



secas, peneiradas na peneira ABNT 70 conforme ABNT - Norma NBR 8633, após esse processo foram prensados na forma de comprimidos com massa de aproximadamente 1 g. Uma bomba calorimétrica ALEMMAR KL-5 foi utilizada para queimar a amostra e obter o poder calorífico superior, o processo de obtenção foi baseado no manual de instruções do calorímetro e este foi adaptado de acordo com a norma ABNT-NBR 8633 (Lima, 2009).

Após a determinação do PCS das cultivares, Doat (1977) foi utilizado para determinar o PCI, este método leva em consideração a quantidade de hidrogênio presente na amostra, o calor absorvido pela vaporização da água contida na amostra e a proporção de água que se formou durante a combustão (Lima, 2009).

Para calcular a eficiência da caldeira são utilizados parâmetros semelhantes aos de uma caldeira real. A produção de vapor da caldeira utilizada como modelo é de 300.000 kg / h a uma temperatura de 520°C com uma pressão de trabalho de 6,7 Mpa. O gás resultante da combustão tem temperatura de 160°C e o rendimento estimado do PCI é de 90%. A eficiência da caldeira é alcançada usando o método PCI determinado pela equação 4 e o método PCS especificado pela equação 5, respectivamente.

$$\eta = \left[\frac{m_s (h_{soc} - h_{wic})}{m_b PCI_b} \right] 100(\%) \quad (4)$$

$$\eta = \left[\frac{m_s (h_{soc} - h_{wic})}{m_b PCS_b} \right] 100(\%) \quad (5)$$

Outro cálculo a ser realizado para determinar a eficiência da caldeira é através do método de entradas e saídas, também denominado de eficiência bruta, para o qual se utiliza a expressão 6.

$$\eta_b = \frac{Q_u}{Q_d} 100(\%) \quad (6)$$

Calor útil é a energia transferida para a substância de trabalho, considerando os seguintes dados: energia consumida para a evaporação da água de alimentação e o superaquecimento do vapor para as condições de pressão e temperatura exigidas e a energia contida nas águas de extração contínua (Cortez et al., 2008). O cálculo do calor útil (Q_u) é obtido pela equação 7.



$$Q_u = \left[\frac{\dot{m}_{vs}}{C} (h_{vs} - h_{aa}) + \frac{\dot{m}_e}{C} (h_e - h_{aa}) \right] \quad (7)$$

O calor disponível determinado por unidade de massa de combustível (kg) é calculado usando a equação 8.

$$Q_d' = PCI' + Q_{fc} + Q_{paa} + Q_{at} \quad (8)$$

Utilizando os parâmetros de cálculo e para atender a aspectos normativos, o cálculo da eficiência da caldeira para as quatro cultivares utilizadas foi realizado com base no manual de recomendações publicado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) (Camargo, 1990). Outros valores utilizados nos cálculos de eficiência são os dados da caldeira que serviu de modelo para o trabalho são os seguintes: temperatura do vapor 520 °C, gases de combustão 160 °C, pressão de trabalho 6,7 MPa e energia proveniente do vapor produzido na caldeira de 991.858,2 MJ / h.

Tabela 2. Valores de referência para o cálculo da eficiência.

Variavel	Valor
Calor específico médio do combustível C_{pc}	3,02
Temperatura do combustível T_C	30
Temperatura de referência T_R	25
Massa de ar seco $M_{ar\ seco}$	4,79
Calor específico da água C_{pa}	4,19
Umidade do ar ambiente W	0,019
Calor específico médio do vapor d'água C_{pv}	1,9
Temperatura do ar de combustão T_{ar}	30

Os dados da tabela 2 são valores de referência que são comumente usados em cálculos de eficiência de energia térmica de caldeiras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O consumo de bagaço para queima na caldeira é determinado através da relação entre a energia do vapor da caldeira e o menor poder calorífico, a tabela 3 evidencia o consumo de bagaço na caldeira por variedade.



Tabela 3. Resultado do consumo de bagaço de cana por variedade.

Cultivar	PCI (Mcal/t)	Umidade %	Consumo de bagaço (kg/s)
SP 80-1816	4247,90	69,04	15,52
RB 72-454	4176,79	70,57	15,78
SP 80-3280	4092,17	69,60	16,11
SP 81-3250	3996,97	69,13	16,49

A comparação do consumo de bagaço em t / h desta variedade com a variedade SP81-3250 resulta em 3.492 t / h de bagaço consumido a mais do que a primeira cultivar. Para determinar a eficiência da caldeira pelo método direto através da equação (6) é necessário determinar a energia útil fornecida pelo bagaço da cana de cada cultivar.

Tabela 4. Resultado da energia fornecida e utilizada pela queima do bagaço de cana.

Cultivares	Potência fornecida (kJ/kg)	Energia útil (kJ/kg)
SP 80-1816	19.272,00	15.893,21
RB 72-454	18.973,72	15.627,16
SP 80-3280	18.621,05	15.310,56
SP 81-3250	18.127,72	14.954,37

A Tabela 4 mostra os valores da energia liberada por cada cultivar em kJ / kg e a energia útil utilizada na geração de energia. A diferença da energia útil fornecida na queima do bagaço da cana-de-açúcar das cultivares SP 80-1816 e SP81-3250 é aproximadamente 6,27% maior, justificando o consumo do bagaço da última cultivar por oferecer a mesma quantidade de energia da primeira.

Tabela 5. Resultados da energia fornecida para a queima do bagaço de cana.

Cultivar	Eficiência PCI (%)	Eficiência PCS (%)	Energia útil (%)
SP 80-1816	91,37	82,97	82,47
RB 72-454	92,93	82,87	82,36
SP 80-3280	94,85	82,74	82,22
SP 81-3250	97,11	82,59	82,49

Com os valores de magnitude apresentados nas tabelas 3 e 4, é possível determinar o desempenho da caldeira que serviu de modelo para a análise da eficiência energética com base nas características das cultivares estudadas. Este é determinado pelo método direto usando três parâmetros: energia útil para a energia fornecida, poder calorífico superior do PCS básico, PCI



calórico básico inferior, cujos valores numéricos são mostrados na tabela 5. A partir dos resultados apresentados na tabela 4, é possível observar que a eficiência da caldeira calculada pelo método PCI foi maior.

5. CONCLUSÃO

O menor fluxo de alimentação do bagaço na caldeira foi encontrado para o cultivo SP80-1816 a uma taxa de 15,52 kg / s, enquanto a cultivar SP81-3250 teve a maior taxa de alimentação de 16,49 kg / s. mostra que para manter as mesmas condições de trabalho, a câmara de combustão da caldeira deve ser abastecida com uma quantidade maior de bagaço da segunda cultivar, que atinge o patamar de 0,97 kg / s. Em relação à transferência de energia para o vapor, o destaque fica novamente com as cultivares SP 80-1816 com energia fornecida de 19.272,00 kJ / kg e a cultivar SP81-3250 com 18.127,72 kJ / kg. Já para a energia útil os valores encontrados são: cultivar SP80-1816 com energia útil de 15.893,21 kJ / kg e cultivar SP81-3250 com 14.954,37 kJ / kg. Mais uma vez fica evidente que a cultivar SP80-1816 é a melhor opção para a produção de energia térmica, pois a diferença energética entre as duas cultivares é de 938,84 MJ / ton. O método calculado levando em consideração o PCI apresentou eficiência térmica da caldeira em valor acima de 90%.

Das cultivares analisadas, a melhor escolha para utilizar o bagaço da cana como fonte primária de energia é a cultivar SP80-1816 por apresentar menor consumo de bagaço na caldeira e maior disponibilidade de energia útil para geração de vapor.

6. REFERÊNCIAS

ACOSTA, J. The boiler efficiency fueled bagasse. *International Sugar Journal*. v. 97, no.1158, pp.248- 255, 1995.

ARALDE, L. E., Tosi, E., Tapiz, L., Paz, D., Cárdenaz, G. J. Determinação da velocidade de transporte pneumático do bagaço de cana de açúcar, *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, v. 69, pp. 15-22, 1991.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2019. Rio de Janeiro: Energy Research Company, 2019. Available at: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Accessed on: 23 jul. 2019.



BOTELHO, Manoel Henrique Campos. Boiler operation - Management, control and maintenance. São Paulo: Blucher, 2011.

CAMARGO, Carlos Augusto de (coord.). Energy conservation in the sugar and alcohol industry: Manual of recommendations. São Paulo: Technological Research Institute, 1990. 796 p.

CORTEZ, Luis Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMES, Edgardo Olivares. Biomass for energy. Campinas: Unicamp, 2008.

HASSUANI, S. J.; VERDE LEAL, M. R. L; DE CARVALHO MACEDO, I. Biomass power generation. Sugar cane bagasse and trash. Piracicaba, PS, Brazil: UNDP, CTC 2005.

INNOCENT, A.F. Cogeneration from residual sugarcane biomass - Case study. 2011. 124p. Dissertation (Master in Agronomy / Energy in Agriculture) - Paulista State University "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2011.

JENKINS, B.M.; BAXTER; L.L., MILES Jr., T.R.; MILES, T.R. Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology, Amsterdam, v. 54, p. 17-46, 1998.

LIMA, Adriano Dawison de. Optimization of the use of sugarcane straw. 2009. Thesis (Doctorate) - Universidade Estadual Paulista - Faculty of Agronomic Sciences, Botucatu, 2009. Available at: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/90515?show=full>>. Accessed on: 10 ago. 2019.

LOPES SILVA, D.A.; DELAI, I.; DELGADO MONTES, M.L., OMETTO, A.R. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Amsterdam, v.32, p. 532-547, 2014.

MEIRELLES, A. J. A., Drying sugarcane bagasse in a fluidized bed in a fluidized bed. State University of Campinas, 1984, Dissertation (Master's).

SAMPAIO, Raquel Paschoal. Case study of the possible deleterious effects caused by the fuel derived from the residue (CDR) in boilers aimed at the production of electric energy burning mainly sugarcane bagasse. Advisor: Prof. Dr. Josmar Davilson Pagliuso. 2014. Dissertation (Master) - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, [S. l.], 2015.

SANTINI, João Bosco; TELHADO, Daniel..In: SANTINI, João Bosco; ROOF, Daniel. Mechanical-structural design of steam boilers. [S. l.]: Petroblog, 6 nov. 2015.

SOARES, Paulo Augusto; ROSSELL, Carlos Eduardo Vaz. The sugar and alcohol sector and the technological domain. São Paulo: Nappé / USP, [2006].

VAN der Poel, P. W., Schiweck, H., Schwartz, T. Sugar Technology Beet and Cane Sugar Manufacture. Berlin, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Germany, 1998, 1118p.