

VIABILIDADE DA BIOELETRICIDADE A PARTIR DA CANA-DE- AÇÚCAR

Thaís Jeruzza Maciel Póvoas Souto*

Antônio Carlos Duarte Coelho**

Romildo Morant de Holanda***

Alex Souza Moraes****

Yenê Medeiros Paz*****

Rivaldo Antônio Jerônimo da Silva*****

RESUMO: Buscou-se analisar o estudo do sistema de cogeração para o setor sucroalcooleiro, usando o bagaço, as pontas e as palha da cana e discutir a viabilidade para uso em larga escala. Para tal foram realizadas simulações de cálculo para determinar o balanço de energia elétrica, no qual as informações foram copiladas da literatura e de dados fornecidos pelas usinas do Estado de Pernambuco. Com isso, pelos resultados obtidos observou-se que a adição das pontas e palha no processo ocasionou aumento de aproximadamente 5% em relação à cogeração realizada exclusivamente com o bagaço. De acordo com os cálculos o faturamento obtido só com a utilização do bagaço como combustível era de R\$ 13.104.000,00 diante disso surgiu a utilização da palha para melhorar a eficiência energética e aumentar a produção de bioeletricidade, passando para aproximadamente R\$ 15.600.000,00. O excedente energético produzido poderá ser negociado para a concessionária responsável pela distribuição de energia na região. Todavia, nas últimas décadas, as usinas sucroenergéticas têm sido autossuficientes na demanda de energia térmica, mecânica e elétrica. Mais recentemente, há a possibilidade de comercialização da energia excedente, aumentando a receita dos produtores. Com o incremento da utilização da biomassa, a matriz energética brasileira está se tornando cada vez mais

* Doutoranda em Química na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife (PE), Brasil. E-mail: thaispovoas@hotmail.com

** Pós-Doutor em Processos Industriais de Engenharia Química pela École Centrale Paris. Professor adjunto da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Campus Recife (PE), Brasil

*** Doutor em Recursos Naturais pela Universidade de Campina Grande, UFCG, Brasil. Professor adjunto da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife (PE), Brasil

**** Pós-Doutor em Transporte de Poluentes Emergentes em Solo pela Université Joseph Fourier, Grenoble França. Professor adjunto da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife (PE), Brasil

***** Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Campus Recife (PE), Brasil

***** Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife (PE), Brasil

limpa. Conseqüentemente, deve-se romper a cultura de que a usina tem como seu principal produto o açúcar e o etanol, e que a bioeletricidade também deve ser um dos principais produtos, pelo grande potencial de cogeração e a autossuficiência dotada nas usinas.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; Cogeração; Usinas sucroenergéticas.

VIABILITY OF BIO-ELECTRICITY FROM SUGARCANE

ABSTRACT: Current analysis investigates the co-generation system in the use of sugarcane bagasse, tips and straw for the sugar-alcohol sector, and discusses its large-scale viability. Simulations were undertaken to calculate electric energy with data from the literature and from databases of plants in the state of Pernambuco, Brazil. Results showed that the addition of leaf tips and straw in the process provided a 5% increase when compared to the co-generation using exclusively bagasse. Since income from bagasse as fuel reached R\$ 13,104,000.00, straw was included to improve energy efficiency and increase the production of bio-electricity, with an estimate of R\$ 15,600,000.00. Energy surplus may be sold to the region's energy-distributor firm. However, during the last decades, sugarcane-energy plants have become self-sufficient to demands for thermal, mechanical and electrical energy. Selling surplus energy has recently become a possibility, with an increase in producers' assets. Increase in the use of biomass has made Brazilian energy matrix cleaner. The idea that sugar and ethanol are the main products of sugarcane plants should be superseded. Bio-electricity should also be one of their products due to the plants' great co-generation capacity and self-sufficiency.

KEY WORDS: Biomass; Co-generation; Sugar-energy plants.

INTRODUÇÃO

Com a iminência da escassez das reservas de petróleo, principal fonte energética mundial, juntamente com as preocupações geradas pelas graves conseqüências que o efeito estufa tem provocado ao meio ambiente, a procura por melhorias nos sistemas energéticos existentes e a busca por novas fontes de produção de energia têm sido cada vez mais significativas (HIMMEL et al.,2007).

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com atenção voltada para a produtividade energética e a garantia da sustentabilidade, reduzindo ao máximo os impactos ao meio ambiente. Tanto no mercado internacional, como no Brasil, a biomassa vem sendo a principal escolha para a diversificação da matriz energética e diminuição da utilização dos combustíveis fósseis (VIANA, 2011).

A bioenergia através da biomassa da cana-de-açúcar no Brasil destaca-se entre as fontes energéticas renováveis, especialmente, por este país ser considerado o maior produtor da cana-de-açúcar, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2014). Na safra de 2015/2016, o país produziu 655 mil de toneladas de cana-de-açúcar, em uma área de 8,9 milhões de hectares, apresentando a produtividade de 73,1 t.ha⁻¹, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2015).

A biomassa, derivada de materiais orgânicos como bagaço, as pontas e palha de cana-de-açúcar, casca de arroz, casca da banana, palha de milho e resíduos de cultura de soja, vem sendo estudada como principal fonte de energia alternativa do futuro (ALVES, 2011).

No Brasil, a fonte que tem sido ressaltada é a biomassa da cana-de-açúcar, por ser matéria-prima para produção de energia ou etanol de 2G. Isto se dá devido às extensas áreas agrícolas de produção de cana-de-açúcar, bem como ao elevado teor de materiais lignocelulósicos contido na maioria dos resíduos de biomassa obtidos nas atividades agrícolas e industriais, como destacado por Dias et. al. (2009).

Extraída da cana-de-açúcar, a sacarose é totalmente utilizada para a fabricação de açúcar e etanol. O bagaço tem utilização (cerca de 90%) em ciclos de potência em cogeração, contudo pela existência de sistemas ineficientes que desperdiçavam pontas e palhas para fins energéticos (SEABRA, 2008), alguns trabalhos foram desenvolvidos para discussão da eficiência de diferentes técnicas de recolhimento do palhicho (Michelazzo e Braunbeck, 2008).

Atualmente, os resíduos são utilizados para a geração de energia térmica e elétrica em sistemas de cogeração nas usinas de açúcar e álcool. A maioria das usinas possui autossuficiência energética, onde algumas produzem excedentes de eletricidade para serem vendidos às distribuidoras de energia elétrica.

Para Silva (2009), a geração de energia através da biomassa da cana-de-açúcar se adequa perfeitamente como complemento, pois o período de safra brasileira da cana-de-açúcar é o mesmo que ocorre a seca no país. Em paralelo, argumenta que o aumento do setor sucroenergético, ocasiona o fim da queima de canaviais, garantindo uma produção de biomassa suficiente para gerar bioeletricidade.

Já Cardoso (2012), ao analisar o uso da biomassa como alternativa energética, argumenta que o Brasil possui vantagens comparativas para a exploração do uso da biomassa como fonte de energia, pela sua grande extensão de terras agricultáveis, além do clima e solo propício para esse fim.

Estudos realizados por Lobo (2013) afirmam que o país usufrui muito pouco dessa energia para fins comerciais, sendo ela mais utilizada para a autossuficiência energética das próprias usinas. A autora ainda argumenta que apesar da produção de energia elétrica não ser o objetivo das indústrias sucroalcooleiras, o uso para esse fim, além de reduzir os custos de energia na indústria, também pode ser um fator para geração de renda aos serem comercializadas para concessionárias.

O potencial de geração de energia elétrica nas usinas de cana-de-açúcar está relacionado diretamente à tecnologia empregada, pelos custos unitários (R\$/kW instalado) serem influenciados pelo efeito escala. A maior parte das usinas utiliza de caldeiras de média pressão (22 bar, 300° C), apesar de disponíveis caldeiras de 40 a 100 bar, o que aumentaria de forma significativa a eficiência energética (GOLDEMBERG; COELHO, 2008).

O potencial de geração de vapor produzido pela caldeira numa usina está relacionada com a quantidade de biomassa disponível para utilização como combustível e também com as características das caldeiras. Para determinar a vazão de vapor gerado por uma caldeira pode ser calculada a partir de (SANTOS, 2012):

$$\frac{m}{Q} = \frac{PCI \cdot \eta}{H_2 - H_1} = P_{cal} \quad (1)$$

em que:

m = Vazão mássica de vapor ($t.h^{-1}$)

PCI = Poder calorífico inferior ($kJ.kg^{-1}$)

Q = Vazão de combustível ($t.h^{-1}$)

H_1 = Entalpia da água de alimentação da caldeira ($kJ.kg^{-1}$)

H_2 = Entalpia do vapor que sai da caldeira ($kJ.kg^{-1}$)

η = Rendimento da caldeira

P_{cal} = Produção de vapor gerado pela caldeira ($Kg_{vapor} \cdot Kg_{biomassa}^{-1}$)

Os turbogeradores a vapor, responsáveis pela geração de bioeletricidade, agem como válvulas redutoras de pressão, disponibilizando o vapor para o processo industrial. A grande vantagem em relação às válvulas redutoras é que a turbina aproveita a energia contida no vapor para efetuar trabalho mecânico para geração de energia. Este aproveitamento energético para geração de energia elétrica pode ser calculado da seguinte forma (SANTOS, 2012):

$$P_e = m \cdot \Delta H \cdot \eta \quad (2)$$

em que:

P_e = Potência elétrica nos terminais do gerador (kW)

m = Vazão mássica de vapor ($t.h^{-1}$)

ΔH = Queda de energia entálpica ($kJ.kg^{-1}$)

η = Rendimento do conjunto (turbina + gerador)

A queda de energia entálpica é a diferença entre os canais da turbina (entrada e saída de vapor).

A preocupação com melhor aproveitamento energético da biomassa da cana vem sendo estimulada pelo histórico de crises no fornecimento de energia elétrica no país, pois se torna uma possibilidade para longos períodos de estiagem e déficit hídrico nas hidrelétricas. Com isso, espera-se uma busca contínua pelo aumento da eficiência energética na operação das usinas. Na verdade, investimentos em sistemas de geração de energia em alta pressão e a opção por equipamentos e configurações de processo, e a energia elétrica vem se consolidando aos poucos como mais um produto das usinas (SEABRA, 2008).

Neste trabalho, buscou-se analisar o sistema de cogeração para o setor sucroalcooleiro, por meio da simulação do sistema de cogeração de energia a partir do bagaço, das pontas e palha da cana e discutir a viabilidade (excedente energético) para uso em larga escala, que possam proporcionar melhor aproveitamento energético dos resíduos da cana de forma mais eficiente em relação às praticadas tradicionalmente nas usinas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Baseado nos dados da União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA), entre os maiores produtores do setor sucroalcooleiro na safra 2014/2015, obtém-se o valor anual de 3.000.000 toneladas de cana processada por usina, considerando uma usina de médio porte. A partir disso, realizaram-se simulações de cálculos para determinar o balanço de energia elétrica. As informações como o tempo de safra, aproveitamento do tempo, percentual de bagaço e palha, foram obtidos por informações coletadas na UNICA e informações obtidas por entrevistas em duas usinas no Estado de Pernambuco. De acordo com as usinas da região, cerca de 6% da palha é deixada no campo para proteção do solo. A coleta das pontas e palha da cana foi realizada juntamente com a cana-de-açúcar. As fórmulas aplicadas correspondem às equações 1 e 2.

A simulação foi realizada por meio da cogeração do sistema de condensação com extração; foi necessária a utilização de dados agrícolas e industriais (Tabela 1), da caldeira e do turbogerador. Os dados foram obtidos por meio de levantamentos bibliográficos.

Tabela 1. Dados agrícolas e industriais

Moagem anual de cana	3.000.000 t
Tempo de safra	240 dias
Aproveitamento do tempo	85%
Relação bagaço/cana*	25%
Relação pontas e palha/cana*	20%
Consumo específico de vapor /t. de cana**	350 - 450 kg.t ⁻¹
Consumo espec. médio de eletríc./t cana ***	40 kWh.t ⁻¹
PCI do bagaço (50% de umidade) ****	7536,24 kJ.kg ⁻¹
PCI do bagaço (20% de umidade) ****	13397,76 kJ.kg ⁻¹
Reserva de bagaço para partidas da caldeira	4% do total produz.

* 1 ton. de cana é possível gerar 250 kg de bagaço e 200 kg de palha. (UNICA, 2009).

** Mello, 2007.

*** Corrêa Neto e Ramón, 2002

**** Poder Calorífico Inferior (PCI) ARAUTERM: excelência em caldeiras e aquecedores.

Com o aperfeiçoamento e a modernização das caldeiras, tornou-se possível a produção de vapor suficiente para garantir o funcionamento de turbinas e a geração de bioeletricidade. Segundo Santos (2012), as usinas passaram a utilizar caldeiras com pressão de 65 bar e turbogeradores, dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados da caldeira e o turbogerador

	(Continua)
Pressão de vapor de saída	65 bar
Temperatura do vapor de saída	510°C
Entalpia de vapor H ₂	3440 kJ.kg ⁻¹
Pressão da bomba de alimentação	85 bar
Temperatura de água de alimentação	116 °C
Entalpia da água de alimentação H ₁	493 kJ.kg ⁻¹
Eficiência da caldeira	86%

	(Conclusão)
Pressão de vapor de entrada	63 bar
Temperatura do vapor de entrada	505°C
Pressão do vapor de escape (processo fabril)	2,5 bar
Queda entálpica 2,5 bar	787 kJ.kg ⁻¹
Pressão do vapor de condensação	0,1 bar
Queda entálpica 0,1 bar	1254 kJ.kg ⁻¹
Eficiência do turbogerador de condensação com extração	82%

Fonte: (SANTOS, 2012)

O balanço deve ser realizado sempre com o foco no aproveitamento máximo da energia do vapor dentro das turbinas e sem comprometer o vapor que é utilizado para o processo.

O sistema de cogeração utilizado foi o de condensação com extração, segundo Corrêa Neto e Ramon (2002); o sistema tem bom aproveitamento energético de vapor e é a mais usada nas indústrias visando à geração de bioeletricidade (Figura 1).

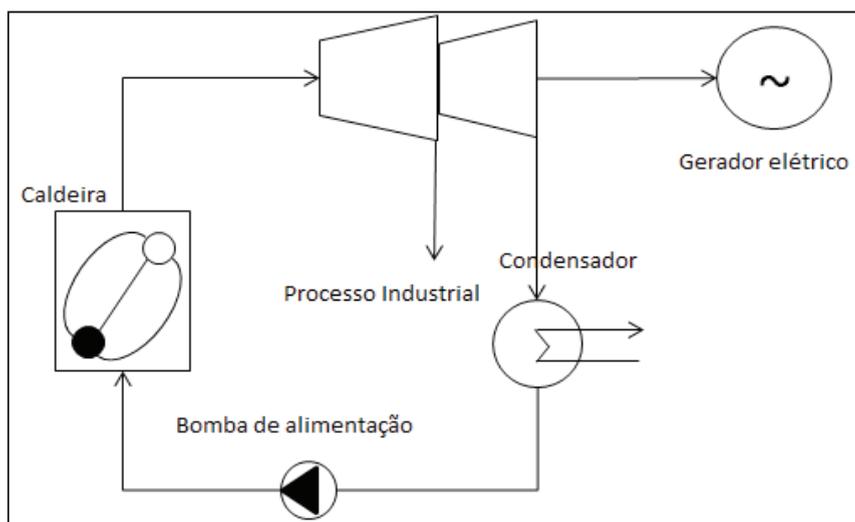


Figura 1. Esquema do processo de cogeração com turbina de condensação com extração.

Fonte: Próprio Autor, 2015.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1 LEVANTAMENTO DA BIOMASSA

Para a determinação da biomassa total produzida para a cogeração é necessário obter o tempo efetivo de moagem da cana na usina, como segue:

3.1.1 Tempo de safra

O tempo efetivo de operação da usina durante a safra leva em consideração o tempo de parada por motivos de chuvas, manutenção, emergências e outros.

Para a safra de 2014/2015, no centro-sul do país, o tempo de aproveitamento é de 85%, com oito meses de safra (ÚNICA, 2015), tem-se na Tabela 3:

Tabela 3. Tempo efetivo de safra

Tempo de safra	240 dias
Aproveitamento do tempo	85%
Tempo efetivo de safra (dias)	204 dias
Tempo efetivo de safra (h)	

3.1.2 Moagem

Estudos realizados por Romão Júnior (2009), para a cogeração de energia a partir do bagaço e da palha; foi considerada uma moagem de aproximadamente 1.501.884 toneladas de cana no ano, produzidas pela Usina Santa Isabel, situada no Estado de São Paulo. Como também uma moagem de aproximadamente 4.751.584 toneladas de cana no ano, referente à Usina Alta Mogiana, situada em São Joaquim da Barra, em São Paulo.

Para Silva e Silva (2013), uma empresa de médio porte no Estado do Paraná, no período de safra 2011/2013, obteve uma moagem de 2.640.000 toneladas de cana. Produzindo 464.100 toneladas de bagaço durante a safra.

Na Tabela 4 pode-se verificar a moagem horária média da cana-de-açúcar. Sabendo que as pontas e palhas foram processadas juntamente com a cana.

Tabela 4. Moagem horária média

Moagem total (cana + bagaço)	3.000.000 t
Moagem diária total	14706 t.dia ⁻¹
Moagem horária total	612,75 t.h ⁻¹

3.1.3 Biomassa total produzida

A biomassa da cana é composta pelo bagaço, pontas e palha que juntos representam aproximadamente 2/3 do potencial energético da cana-de-açúcar. Levando em consideração que para a simulação foram utilizados o bagaço e 50% da palha dos 94% que são levados para a usina, os 6% são deixados no campo. Na tabela 5 pode-se observar a quantidade horária de bagaço e de palha produzida durante a safra.

Tabela 5. Produção total da biomassa

Moagem horária total	612,75 t.h ⁻¹
Relação bagaço/cana	25%
Produção do bagaço	153,19 t.h ⁻¹
Relação 50% pontas e palha/cana*	50%
Produção palha	61,27 t.h ⁻¹
Produção total da biomassa	214,46 t.h ⁻¹

*Sabendo que a relação palha/cana é de 20%.

3.2 DEMANDA DE VAPOR E SOBRA DE BIOMASSA

É preciso fazer o levantamento da sobra da biomassa que será destinada exclusivamente para a geração de energia. Para este levantamento será necessária a utilização de alguns dados como a quantidade total de vapor que será destinado

à fabricação de açúcar e etanol, a relação de vapor/bagaço e vapor/pontas e palha, e a quantidade de bagaço que deve ser reservada para as eventuais partidas de emergência da caldeira.

3.2.1 Relação vapor/bagaço e vapor/palha de caldeira

Para o cálculo é considerada a aplicação da equação 1. Percebe-se que tem uma relação entre a quantidade de vapor gerado e a quantidade de combustível.

Considerando os dados da caldeira (Tabela 3) e que o bagaço tem 50% de umidade, tem-se:

$$\frac{m}{Q} = \frac{7536,34 \text{ kJ}}{\text{kg}} \cdot 86\% \cong 2,20 \text{ (adimensional)}$$

Fazendo o mesmo cálculo para a palha, considerando que as pontas e palha têm 20% de umidade, e que o PCI das pontas e palha é 70% superior ao do bagaço, tem-se:

$$\frac{m}{Q} = \frac{(13397,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1,7) \cdot 86\%}{3440 - 493 \text{ kJ/kg}} \cong 6,65 \text{ (adimensional)}$$

3.2.2 Consumo de vapor da usina

Segundo Mello (2007), o consumo de vapor no processo vai de 350 a 450 kg por tonelada de cana; o consumo horário de vapor pode ser obtido da seguinte forma:

$$v_h = \frac{v_e \cdot C_h}{1000} \quad (3)$$

em que:

v_h = Consumo horário de vapor ($t.h^{-1}$)

v_e = Consumo específico de vapor ($kg.t^{-1}$)

C_h = Moagem horária da cana (t)

Sabendo que a moagem horária da cana é $612,75 t.h^{-1}$, o consumo de vapor será:

$$v_{hMin} = \frac{350 \text{ kg} \cdot t^{-1} \times 612,75 \text{ t} \cdot h^{-1}}{1000} = 214,46 \text{ t} \cdot h^{-1}$$

$$v_{hMáx} = \frac{450 \text{ kg} \cdot t^{-1} \times 612,75 \text{ t} \cdot h^{-1}}{1000} = 275,74 \text{ t} \cdot h^{-1}$$

Já o consumo horário do combustível (bagaço + palha) pode ser obtido da seguinte forma:

Para o bagaço:

$$b_{hMin} = \frac{214,46 \text{ t} \cdot h^{-1}}{2,20} \cong 97,48 \text{ t} \cdot h^{-1}$$

$$b_{hMáx} = \frac{275,74 \text{ t} \cdot h^{-1}}{2,20} \cong 125,40 \text{ t} \cdot h^{-1}$$

Para a palha:

$$p_{hMin} = \frac{214,46 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}}{6,65} \cong 32,25 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$p_{hMáx} = \frac{275,74 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}}{6,65} \cong 41,48 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

A produção horária do bagaço é de $153,19 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, o cálculo anterior prova que o bagaço resultante da moagem da cana nesta usina é suficiente para o suprimento de vapor para o processo industrial e ainda há uma quantidade que pode ser destinada apenas para a geração de energia. O mesmo vale para as pontas e palha que têm uma produção de $61,27 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ e seu consumo mínimo e máximo de $32,25$ a $41,48 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente.

3.2.3 Sobra de bagaço e sobra da palha

A sobra máxima e mínima do bagaço foi de $55,7$ e de $27,8 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ e da palha foi de $29,0$ e de $19,8 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente.

A sobra total do bagaço disponível para a utilização exclusiva na geração de energia elétrica é calculada da seguinte forma:

$$b_b = (s_b \cdot t) - b_r \quad (4)$$

em que:

b_b = Quant. de bagaço para uso exclusivo de geração de bioeletricidade (t)

s_b = Sobra horária de bagaço ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)

t = Tempo efetivo de moagem (h)

b_r = Reserva de bagaço para partidas da caldeira (t)

Sabendo que a reserva de bagaço para as partidas da caldeira foi de 4% de todo o bagaço produzido. Valor adotado pelas usinas em caso de eventuais paradas emergenciais ou motivos de chuvas, onde não há entrada de cana na indústria. Neste caso a reserva será de 30000 toneladas (4% de 750000 t de bagaço produzido). Calculando a quantidade de bagaço, tem-se:

$$b_{bM\acute{a}x} = (55,7 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 4896 \text{ h}) - 30000 \text{ t} = 204.707,2 \text{ t/safra}$$

$$b_{bM\acute{m}n} = (27,8 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 4896 \text{ h}) - 30000 \text{ t} = 106.108,8 \text{ t/safra}$$

Para as pontas e palha da cana, a quantidade produzida para uso exclusivo de geração de bioeletricidade é:

$$p_{bM\acute{a}x} = 29,0 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 4896 \text{ h} = 141.984,0 \text{ t/safra}$$

$$p_{bM\acute{m}n} = 19,8 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \times 4896 \text{ h} = 96.940,8 \text{ t/safra}$$

3.2.4 Potência instalada e energia elétrica total

Para o processo de cogeração foi utilizado o sistema de condensação com extração operando apenas na safra. Este processo tem como vantagem menor custo para implantação, pois necessita de apenas uma turbina para o processo. Com isso, tem-se a facilidade de operação e manutenção de apenas uma máquina que realiza a função de duas.

Considerando que a proporção da mistura do bagaço e da palha é de 90% e 10%, respectivamente. Pela Equação 3, obtém-se a vazão de vapor de escape que

é destinada exclusivamente para geração de energia elétrica, mostrada na Tabela 6.

Tabela 6. Vazão de vapor

	Máximo	Mínimo
Quantidade de bagaço (t)	204.707,2	106.108,8
Quantidade de palha (t)	141.984,0	96.940,8
Vazão de vapor de extração (t.h ⁻¹)	214,46	275,74
Vazão de vapor de escape (t.h ⁻¹)	100,98	56,07
Vazão de vapor de entrada (t.h ⁻¹)	315,44	331,80

A potência de geração é calculada pela equação 2.

$$P_{eMin} = \left[\frac{331,80 \text{ t.h}^{-1}}{3,6 \frac{\text{t.h}^{-1}}{\text{kg.s}^{-1}}} * 787 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{56,07 \text{ t.h}^{-1}}{3,6 \frac{\text{t.h}^{-1}}{\text{kg.s}^{-1}}} * (1245 - 787) \text{ kJ.kg}^{-1} \right] * 82\% = 65,4 \text{ MW}$$

$$P_{eMáx} = \left[\frac{315,44 \text{ t.h}^{-1}}{3,6 \frac{\text{t.h}^{-1}}{\text{kg.s}^{-1}}} * 787 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{100,98 \text{ t.h}^{-1}}{3,6 \frac{\text{t.h}^{-1}}{\text{kg.s}^{-1}}} * (1245 - 787) \text{ kJ.kg}^{-1} \right] * 82\% = 67,1 \text{ MW}$$

A energia elétrica mínima e máxima produzida na safra é de 320.198,4 MWh e 328.521,6 MWh, respectivamente.

Mateus (2010) avaliou a capacidade de cogeração no setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais, para a safra de 2008/2009 uma capacidade de cogeração de 1.506,7MW, sendo considerado todos os empreendimentos, ou seja, 66 usinas, pesquisados na época. Porém 29 deles não estavam operando no período. Com isso, a produção de energia elétrica, para as 37 usinas em operação, correspondeu uma capacidade de 787,0 MW. Para as unidades sem operação, foi estimado que a cogeração chegasse a 719, 7 MW.

Já Flausínio (2015) analisou as usinas sucroalcooleiras no Estado de Minas

Gerais, durante a safra 2013/2014 que obteve uma capacidade de cogeração de 1.096,16 MW, sendo consideradas 39 usinas em operação. Observando aumento significativo de aproximadamente 75% na capacidade de cogeração da safra de 2008/2009 em relação à de 2013/2014.

Estudos realizados por Romão Júnior (2009), que utilizou uma caldeira de 65 bar, com eficiência de 86% e entalpia da água de alimentação da caldeira e do vapor gerado igual a 440 kJ.kg^{-1} e 3.483 kJ.kg^{-1} , respectivamente. Com uma moagem de aproximadamente 4.700.000 toneladas de cana, gerou aproximadamente 548.452 MWh, conseqüentemente a geração de energia aumenta com maior introdução de bagaço e palha na indústria.

Já Mateus (2010) utilizou três caldeiras com especificações mais elevadas de pressão de vapor e temperatura, sendo uma de 4,12 Mpa e 773 K e as outras duas de 6,37 Mpa e 783 K, respectivamente, e três turbinas de contrapressão, sem formação de condensado para realimentar a caldeira. Com isso, foi responsável pela cogeração de 155.972,9 kWh de energia na safra de 2008/2009.

Os investimentos nos projetos de modernização das usinas é o melhor propósito para o aumento do potencial de geração de bioeletricidade. Com isso foi feita uma síntese de faturamento anual com a venda da energia produzida. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o preço mais alto da venda no ano de 2016 foi de R\$ 198,59/MWh. Considerando a quantidade de energia exportada como sendo a diferença entre o total de geração e o consumo da indústria, mostrada na Tabela 7.

Tabela 7. Balanço de energia elétrica

(Continua)

Balanço de potência	
Geração	65,40 MW
Demanda	49,43 MW
Exportação	16,01 MW
Balanço de energia	
Tempo de operação	4896 h
Energia exportada	78.408,30 MWh

(Conclusão)

Faturamento	
Total de energia exportada	78.408,30 MWh
Valor da venda de energia	R\$ 198,59/MWh
Faturamento	R\$ 15.571.104,30

Com a adição das pontas e palha no processo, observou-se aumento de aproximadamente 5% em relação à cogeração realizada exclusivamente com o bagaço. De acordo com os cálculos, o faturamento obtido só com a utilização do bagaço como combustível era de R\$ 13.104.000, com isso surgiu a utilização da palha para melhorar a eficiência energética e aumentar a produção de bioeletricidade, passando para aproximadamente R\$ 15.600.000. O excedente energético produzido poderá ser negociado para a concessionária responsável pela distribuição de energia na região.

Além da utilização da palha como combustível há alternativas para o aumento da geração de energia nas usinas, investimento em caldeiras de altas pressões e temperaturas, redução do consumo específico de vapor e a utilização de eletrificação dos acionamentos mecânicos.

A biomassa da cana também pode ser utilizada para a produção do etanol de segunda geração. A geração de bioeletricidade pode ser considerada mais viável que o etanol de 2G, pois este tipo de produção do etanol consome muita energia para ser realizado o quê? . A venda de bioeletricidade para as distribuidoras tem maior lucratividade devido ao menor custo de produção e ao crescente valor da energia no País.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas, as usinas sucroenergéticas têm se tornado autossuficientes em sua demanda de energia térmica, mecânica e elétrica, além da possibilidade de comercialização da energia excedente, aumentando a receita dos produtores. Com o aumento da utilização da biomassa, ou seja, recursos renováveis,

a matriz energética brasileira está se tornando cada vez mais limpa.

A biomassa apresenta alto potencial energético, constituindo assim em alternativa econômica para o setor frente ao cenário de crise econômica verificado em grande parte das usinas sucroenergéticas.

O levantamento bibliográfico mostrou as vantagens da utilização do bagaço e das pontas e palha da cana para queima em caldeiras de cogeração. Com isso, a cada ano vem sendo rompida a cultura de que a usina tem como seu principal produto o açúcar e o etanol, e que a bioeletricidade também deve ser um dos principais produtos, pelo grande potencial de cogeração e a autossuficiência dotada nas usinas.

A viabilidade do excedente energético é comprovada sempre no balanço do investimento na melhoria e comparados com o ganho na comercialização da bioeletricidade adicional a ser exportada.

5 AGRADECIMENTO

A primeira autora agradece a bolsa concedida pela Capes.

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – UFRPE e ao Centro de Inovação Tecnológica Aplicada aos Recursos Naturais- CITAR

REFERÊNCIAS

ALVES, M. **Estudo de sistemas de cogeração em usina de açúcar e álcool, com utilização do bagaço e palha da cana.** Campinas, SP: [s.n.], 2011.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifa utilizada para cálculo de compensação financeira é fixada pela ANEEL.** 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2//asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/tarifa-utilizada-para-calculo-de-compensacao-financieira-e-fixada-pela-aneel/656877/pop_up?_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_viewMode=print&_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_languageId=pt_BR>. Acesso em: 04 abril 2017.

CARDOSO, Bruno Monteiro. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética**. 2012. 98f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, p. 536, 2009.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. Brasília, p. 38, 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_12_17_12_15_58_boletim_cana_portugues_-_2o_lev_-_15-16.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2016.

CORRÊA NETO, V.; RAMON, D. **Análise de opções tecnológicas para projetos de cogeração no setor sucroalcooleiro**. Brasília: SETAP, 2002.

DANTAS, D. N.; MAUAD, F. F.; OMETTO, A. R. Potential for generation of thermal and electrical energy from biomass of sugarcane: a exergetic analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIAL, 11th. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ, 2009.

DIAS, M. O. S.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S. A.; FILHO, R. M.; ROSELL, C. E. V.; MACIEL, M. R. W. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research & Design**, v. 87, p. 1206-1216, 2009.

FLAUSINIO, B. de F. P. G. **Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais**. Tese (Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, p. 2086-2097, 2008.

HIMMEL, M. E.; DING, S. Y.; JOHNSON, D. K.; ADNEY, W. S.; NIMLOS, M. R.; BRADY, J. W.; FOUST, T. D. Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science*, v. 315, 804-807, 2007.

LOBO, C. S. **A importância da cogeração utilizando bagaço de cana-de-açúcar como forma de diversificação da matriz elétrica.** 2013. 118f. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Curso de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2013.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Cana de Açúcar.** 2014. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

MATEUS, L. A. N. **Análise dos aspectos ambientais e energéticos do setor sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais.** 2010. 199f. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental) – Universidade Federal de Ouro, Ouro Preto, 2010.

MELLO, J. C. O. **Geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás: minuta do Termo de Referência 8 (TR-8).** São Paulo: Andrade & Canellas Consultoria e Engenharia, 2007.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhico na colheita mecânica da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.5, p.546-552, 2008.

NETO, C. V.; RAMÓN, D. **Análise de Opções Tecnológicas para Projetos de Cogeração no Setor Sucroalcooleiro.** Brasília: Setap, 2002.

ROMÃO JÚNIOR, R. A. **Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana-de-açúcar para cogeração de energia numa Usina Sucroalcooleira.** 2009. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2009.

SANTOS, F. A. **Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia**

elétrica: usina de açúcar, etanol e bioeletricidade. ed. rev. São Paulo: [s.n]: 2012.

SEABRA, J. E. A. **Análise de opções tecnológicas para o uso integral da biomassa no setor de cana de açúcar e suas implicações.** 2009. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2009.

SILVA, W. D. da. **A cogeração de energia elétrica a partir da biomassa inserida na matriz energética brasileira.** 2009. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SILVA, V. S.; SILVA, C. M. Análise da Viabilidade de Projetos de Cogeração de Energia por meio do Bagaço da Cana-de-açúcar: um estudo a partir de Agroindústrias Sucroalcooleiras do Paraná. **Rev. Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 9-22, 2013.

UNICA – UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Setor Sucroenergético – Mapa da Produção** - Produção de etanol do Brasil. 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 19 jun. 2015.

UNICA – UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Indústria Brasileira da Cana-de-açúcar:** uma trajetória de evolução. 2015. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/faq/>>. Acesso em: 11 abr. 2017.

VIANA, L. F. **Potencial energético do bagaço e palhico da cana-de-açúcar.** SP80-184, em área de alambique artisanal. Lavras: UFLA, 2011.

Recebido em: 02/05/2016

Aceito em: 11/05/2017