

COGERAÇÃO DE ENERGIA EM USINA SUCROALCOLEIRA ALMEJANDO SUSTENTABILIDADE

ENERGY COGENERATION IN A SUGAR ALCOHOLIC PLANT AIM SUSTAINABILITY

Fernando de Lima Caneppele - Doutor em Agronomia Energia na Agricultura. Universidade de São Paulo. - E-mail: caneppele@usp.br

Emmanuel Zullo Godinho - Doutorando em Agronomia Energia na Agricultura. Universidade Estadual Paulista. - E-mail: emmanuel.godinho@unesp.br

Rodrigo Serra Daltin - Doutorando em Agronomia Energia na Agricultura. Universidade Estadual Paulista. - E-mail: rs.daltin@unesp.br

Hélio Vagner Gasparotto - Mestrando em Agronomia Energia na Agricultura. Universidade Estadual Paulista. - E-mail: helio.vagner@unesp.br

Luís Fernando Soares Zuin - Doutorado em Engenharia da Produção. Universidade de São Paulo. - E-mail: lfzuin@usp.br

RESUMO

O trabalho objetiva analisar e implantar um projeto de cogeração de energia por meio do bagaço proveniente da produção de açúcar e etanol em uma agroindústria localizada na cidade de Pontal, São Paulo. Tendo em vista que a região de Ribeirão Preto é um grande polo de usinas de cana-de-açúcar, encontram-se nessa área os principais geradores de bagaço de cana do país; matéria-prima essa que poderia ser utilizada para gerar energia. A necessidade de novas matrizes energéticas fez com que o investimento nesse setor se tornasse atrativo. Para se obter o potencial de cogeração foram feitos cálculos utilizando dados fornecidos pela usina, como a quantidade de cana-de-açúcar processada por hora durante a safra anual. Dessa forma, o trabalho se encontra adaptado às necessidades apresentadas e pode obter boa eficiência. Atualmente o bagaço residual produzido por essa usina é vendido e seu potencial energético não é utilizado. Objetiva-se, pois, a criação de uma fonte de renda para a agroindústria gerar receita, possivelmente um aumento de riqueza a partir de um subproduto que é vendido com um valor menor se comparado ao preço da energia que ele teria potencial de produzir.

Palavras-chave: Bagaço. Cana-de-açúcar. Eficiência energética. Usina.

ABSTRACT

The work aims to analyze and implement an energy cogeneration project using bagasse from sugar and ethanol production in an agribusiness located in the city of Pontal, São Paulo. Bearing in mind that the Ribeirão Preto region is a major pole of sugar cane mills, the main sugarcane bagasse generators in the country are found in this area; raw material that could be used to generate energy. The need for new energy matrices made investment in this sector attractive. In order to obtain the potential for cogeneration, calculations were made using data provided by the plant, such as the amount of sugarcane processed. Thus, the project is adapted to the needs presented and can achieve good efficiency. Currently, the residual bagasse produced by this plant is sold and its energy potential is not used. This project aimed to create a source of income for the agribusiness and generate revenue, possibly an increase in wealth from a by-product that is sold at a lower price compared to the price of the energy it has and its potential to produce.

Keywords: Cogeneration. Bagasse. Sugar cane. Usine.

INTRODUÇÃO

Os principais produtos oriundos da cana-de-açúcar são: o açúcar, o etanol e o bagaço proveniente do processo produtivo. Tais elementos, ao longo da história, foram sofrendo mudanças com alteração de leis e com a criação de incentivos (PAULILLO *et al.*, 2007).

Segundo Paulillo *et al.*, (2007), dentro do ranking mundial de produção de etanol de cana o Brasil está no topo, atualmente existem aproximadamente quatrocentas usinas distribuídas por todo país e setenta mil agricultores responsáveis por produzir cana-de-açúcar.

Nosso país também é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Com toda essa produção, resíduos são gerados e, entre eles, está o bagaço, que representa aproximadamente 25% do total da planta de cana (RODRIGUES, 2010).

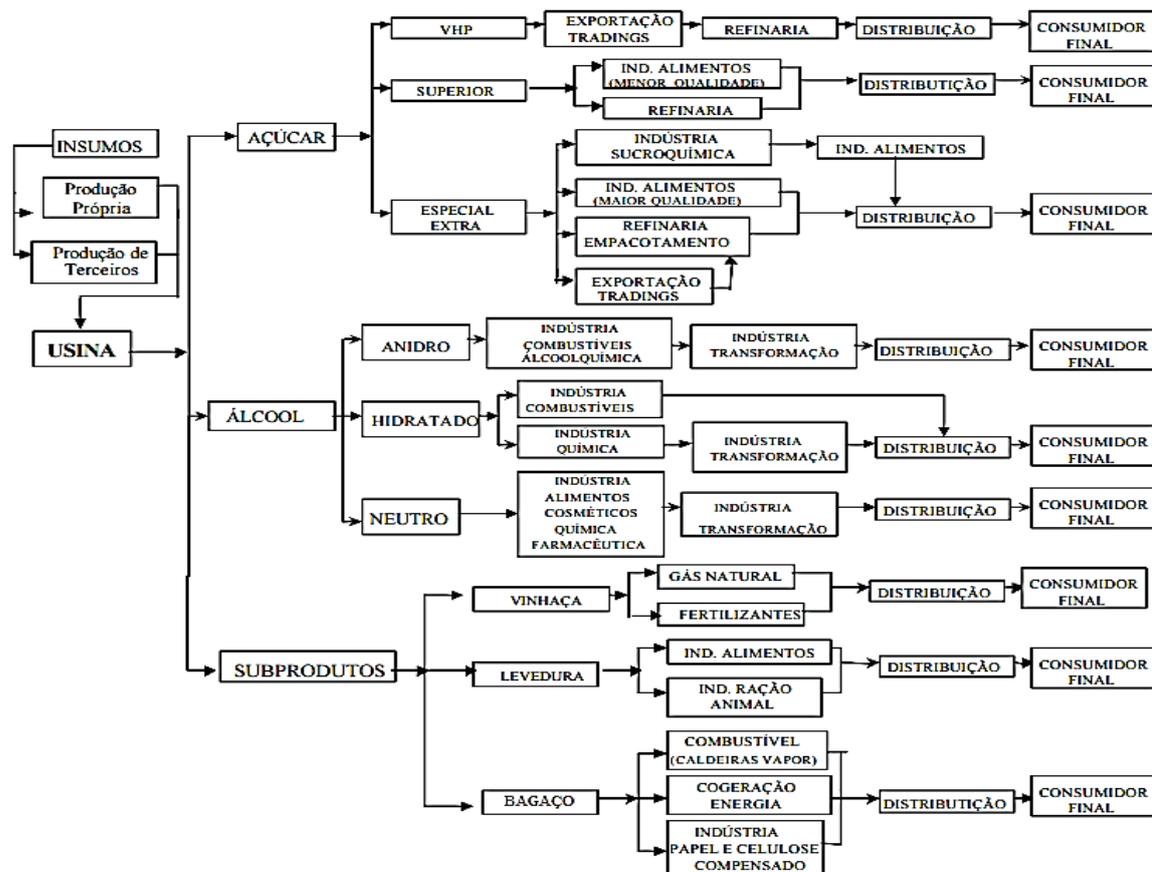
Segundo a (CONAB, 2019), a área plantada utilizada para o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, por safra, foi de 5,8 milhões de hectares, na safra de 2005/2006, e passou a ser 8.481,2 mil hectares, na safra 2019/2020. Um expressivo aumento de 48% em mais de dez anos. As usinas paulistas tiveram um avanço na produção da cana-de-açúcar, de 3.136,6 mil, na safra de 2005/2006, para 4.302,2 mil, na safra 2019/2020, representando a ampliação de aproximadamente 43% da área plantada no estado.

PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL

A produção de etanol em litros, no Brasil, obteve um total de 16,65 bilhões de litros, na safra 2005/2006, saltando para 33,83 bilhões de litros, na safra de 2019/2020. Isso representou um aumento de mais de 85% no período. No estado de São Paulo, a produção foi de 10,28 bilhões de litros, na safra 2005/2006, para 16,40 bilhões de litros, na safra 2019/2020 (CONAB, 2019).

As usinas são responsáveis por realizarem o processamento da cana e gerar etanol e açúcar como produtos principais. Essa produção é de grande importância para geração de empregos, visto que, atualmente, no país, existem centenas de usinas em funcionamento, conforme figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de produção de uma usina de cana-de-açúcar.



Fonte: Neves *et al.*, (1998).

Segundo os dados obtidos pela (CONAB, 2019), a produção de açúcar, no Brasil, na safra de 2005/2006, foi de 26,4 milhões de toneladas e saltou para 30,1 milhões de toneladas, na safra 2019/2020, o que equivale a um ganho de 27% em mais de dez anos. Já no estado de São Paulo, a produção foi de 16,7 milhões de toneladas em 2005/2006 subindo para 18,6 milhões de toneladas, na safra de 2019/2020, totalizando, assim, um aumento de 12,0% na produção neste período.

Segundo Santos *et al.* (2011), a cana é constituída por 30% de caldo e o resto formado por biomassa, que é o bagaço e a palha. O caldo é usado extensivamente como fonte primária na indústria sucroalcooleira. Já, a biomassa começou a ser mais utilizada recentemente.

Dos resíduos gerados, os mais abundantes são o bagaço e a vinhaça. Somente no ano de 2014, 160 milhões de toneladas (ton) de bagaço foram produzidos no Brasil, que é uma biomassa com grande potencial energético, para ser utilizada como matéria-prima para geração de energia (BRASIL, 2019).

A COGERAÇÃO

Com grande potencial de produção de energia, o bagaço vem sendo utilizado em sistemas de cogeração, onde é queimado e seu vapor alimenta um turbo-gerador, gerando energia elétrica. As agroindústrias estão percebendo o aumento deste mercado e têm ampliado os investimentos no setor.

A safra nas usinas geralmente coincide com períodos de estiagem no sudeste e Centro-Oeste do Brasil, época em que o nível dos reservatórios das hidrelétricas está baixo, aumentando,

dessa forma, o preço da energia elétrica. Assim sendo, o bagaço se torna uma alternativa viável para suprir esta necessidade de energia.

Com a implantação de um sistema de cogeração, a usina tem a possibilidade de vender o bagaço diretamente ou produzir e vender energia gerada por um preço superior ao que se conseguiria com a venda do bagaço. A capacidade de originar energia, através do bagaço da cana no Brasil é equivalente à produção energética da usina hidrelétrica de ITAIPU (GOLDEMBERG, 2009).

A maior parte da energia elétrica brasileira vem de usinas hidrelétricas. Contudo, uma desvantagem desse sistema é a inconsistência produtiva, uma vez que a produção depende do clima e das chuvas. Com o crescimento do consumo, surge a necessidade vigente de se encontrarem novas fontes alternativas de energia, como por exemplo, a energia proveniente do bagaço.

Com a implantação de novas técnicas ao processo produtivo, como o aproveitamento de insumos, muitos benefícios surgem na região onde a agroindústria estiver instalada. Desse modo, é possível produzir e utilizar um subproduto que gera fonte de renda e impulsiona novas atividades e oportunidades de emprego (SHIKIDA; SOUZA, 2009).

CONTEXTUALIZAÇÃO DA BIOMASSA NA AGROINDÚSTRIA

Segundo Flausinio (2015), houve a implantação das agroindústrias do setor sucroalcooleiro, em meados do século XX, o que permitiu modelar e construir usinas com o intuito de gerar sua própria energia elétrica. Antes, a produção de energia era feita por meio de aproveitamentos hidrelétricos e combustíveis fósseis. Com o aumento de custos e a falta de energia para o processo de produção, um novo modelo de aproveitamento foi implantado para que as usinas operassem. Tal parâmetro consiste em produzir energia e um subproduto (bagaço), derivado de seus principais produtos (etanol e açúcar).

A cana-de-açúcar tem um grande potencial como fonte de biomassa e pode ser utilizada para produção de energia com o uso do bagaço e da palha. Com a diversificação da matriz energética, estão se tornando muito importantes os novos recursos, como a biomassa. Outro motivo para esta utilização é o período de estiagem do Sudeste e Centro-Oeste que coincide com a safra, momento em que o potencial de produção de energia através da biomassa é grande e as usinas hidrelétricas estão com seus reservatórios reduzidos (ANEEL, 2008).

Contudo, segundo Rodrigues (2010), o bagaço é formado por lignina e celulose com 30% da cana e outros 30% constituídos por folhas e ponteiros não são levadas para a indústria, isso após a cana ser colhida. O volume deste material obtido por tonelada fica entre 240 e 250 kg a cada 1000 kg de cana que a usina utiliza. Este bagaço processado é utilizado comumente para produzir energia através de caldeiras, gerando energia térmica e mecânica, através do vapor que movimenta. Tal processo é conhecido como cogeração.

O bagaço, que foi moído recentemente, tem 50% de água em sua composição, 45% de fibras lignocelulósicas, entre 2% e 3% de sólidos insolúveis e 2% a 3% de sólidos solúveis. Seus principais compostos são celulose, hemicelulose e lignina que dão um alto teor energético para o bagaço (SANTOS *et al.*, 2011).

A busca por gerar lucros pelas empresas, através dos subprodutos como o bagaço da cana-de-açúcar, faz com que as empresas tenham um maior ganho e rentabilidade, se diferenciando em um mercado que se tornou muito competitivo (SHIKIDA; SOUZA, 2009). Além de produzir energia e tornar a usina autossuficiente, a partir da década de 1980, o bagaço permitiu a geração e venda de energia para o sistema elétrico brasileiro (COELHO *et al.*, 2016).

A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Segundo Brand *et al.* (2014), comparando com outros Estados produtores sucroalcooleiros, o Brasil possui uma matriz energética limpa, pois utiliza recursos renováveis para a produção de energia, gerada através da biomassa, mesmo que ainda que não tenha recebido o destaque que merece no cenário energético do país.

O setor de energia brasileiro passou por transformações que mudaram o até então panorama estável sob o controle do governo. Dessa forma, passou a chamar a atenção para novas fontes mais atrativas para o meio competitivo (SILVA *et al.*, 2015).

SETOR SUCROALCOOLEIRO - PROTOCOLO DE KYOTO

O setor sucroalcooleiro ameniza o aquecimento global devido à produção de etanol como combustível e também com a cogeração de energia através do bagaço. As usinas estão ajudando a diminuir o efeito estufa utilizando o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do protocolo de Kyoto. O excedente de energia pode ser vendido para as concessionárias de energia elétrica, substituindo o uso de combustíveis fósseis. O mercado de crédito de carbono deixa projetos de cogeração através do bagaço da cana mais viáveis e atrativos para novos investimentos, aumentando a oferta e demanda de recursos renováveis e, conseqüentemente, a diminuição do uso de combustíveis fósseis (DANTAS FILHO, 2009).

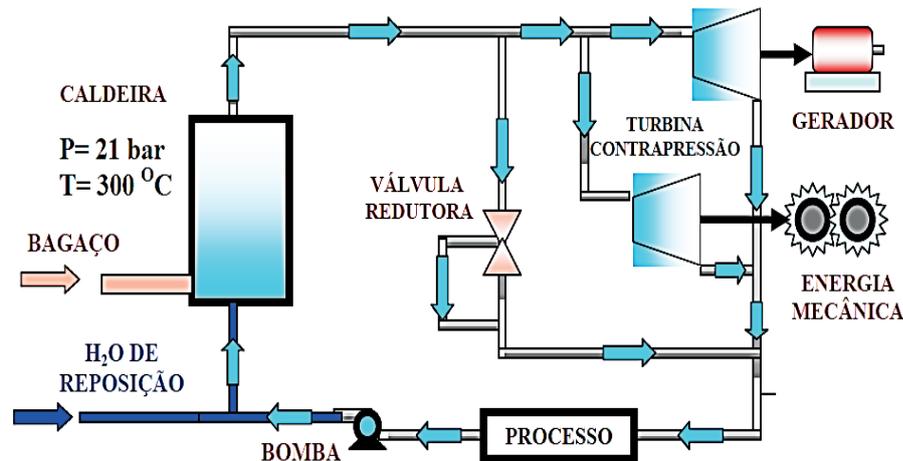
A cogeração tem a ideia de economizar recursos energéticos, aliados a uma configuração tradicional, produzindo calor e trabalho que são normalmente convertidos em energia elétrica ou mecânica (BARJA, 2006).

TURBINAS A VAPOR

Segundo Flausinio (2015), os principais sistemas utilizados para cogeração em agroindústrias sucroalcooleiras são os que empregam turbinas a vapor, que podem compreender três configurações: turbina de contrapressão, a junção de turbinas de contrapressão com turbina de condensação e turbinas de extra condensação.

Segundo Aguiar (2015), o estudo realizado por amostragem retiradas de setenta e sete usinas no Brasil, na safra 2013/2014, indica que 39% das caldeiras tinham tecnologia de baixa pressão até 21 bar, 34% com pressão acima de 65 bar, 22% com pressão de até 48 bar e 5% com pressão entre 48 e 65 bar. O turbo-gerador de contrapressão simples era utilizado em quase 70% das usinas. A porcentagem do modelo de extração e condensação representava os 30% restantes. A figura 2 representa um diagrama de cogeração em uma usina de cana-de-açúcar.

Figura 2 - Diagrama cogeração em usina de cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado de PESSINE (2007).

Alcarde (2007) alega que, para gerar energia térmica e elétrica através do bagaço de cana, ele deve ser queimado, gerando, assim, energia térmica em forma de vapor e se transformando em elétrica. Seu funcionamento se baseia em um forno responsável por queimar o bagaço, pois, através do calor, ocorre a produção dos vapores em uma caldeira. Esse vapor movimentará a turbina, que é ligada a um gerador, transformando esse movimento em energia elétrica.

POTENCIAL DE GERAÇÃO

Para aumentar a exportação de energia elétrica, deve-se aumentar a eficiência das turbinas, trocar turbinas a vapor por motores elétricos, elevar a pressão do vapor e utilizar turbinas de extração e contrapressão (BARBELI, 2015).

A extração de vapor ocorre a 22 bar de pressão, com a vazão dependendo do modelo e eficiência da turbina. Substituições e instalações de turbinas de multi-estágio que têm uma maior eficiência, estão sendo feitas em diversas processadoras de cana-de-açúcar, possibilitando aumento na geração de eletricidade através da cogeração (GOLDEMBERG, 2009).

Existe uma grande projeção na produção de energia calculado visando à safra total. É importante averiguar se a usina precisa de uma reforma para poder gerar energia de maneira eficiente.

As mudanças seriam a troca de equipamentos, com baixa eficiência, por novos, com tecnologias mais avançadas. Esses equipamentos substituídos têm uma vida útil considerável, garantindo a auto eficiência de energia da usina (FLAUSINIO, 2015).

Segundo Cruz (2015), duas toneladas de bagaço podem gerar 1 MWh. Em 2015, o valor pago pela venda deste MWh era o dobro, se comparado com a venda do bagaço, que teve o preço médio cotado em R\$ 100,00 a tonelada, na região nordeste paulista. Os donos de agroindústrias estão atentos a esses números para conseguir aumentar sua receita, produzindo e vendendo energia gerada através da biomassa.

O objetivo principal do projeto é verificar o potencial e a eficiência energética da geração de energia elétrica, utilizando bagaço da cana-de-açúcar como combustível. A pesquisa se baseia na análise de um sistema de cogeração, aplicado em uma usina sucroalcooleira, localizada na cidade de Pontal – SP, que atualmente utiliza energia elétrica e mecânica.

Além disso, o objetivo secundário foi a comparação do potencial produtivo de energia atual com o da produção da usina totalmente eletrificada após modernização.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados para obtenção dos resultados foram coletados em uma usina sucroalcooleira localizada no município de Pontal, no Nordeste paulista. Os valores obtidos foram avaliados e utilizados em cálculos para se obter a eficiência na produção e venda de energia. Os equipamentos utilizados na usina foram avaliados através das informações levantadas, levando em consideração seu potencial de aproveitamento e produção de energia. Para que os dados fossem entregues pela usina, foi assegurado sigilo sobre sua identificação e que estes só seriam utilizados para fins acadêmicos.

TEOR DE FIBRA E COEFICIENTE DE RESÍDUOS

Foram utilizadas as definições de Lora, Happ e Cortez (1997) para calcular o volume de biomassa final da agroindústria sucroalcooleira, levando em consideração o coeficiente de resíduo. Os valores da porcentagem de resíduo podem variar de acordo com a região e tratos culturais, utilizando a equação (1).

$$CRE = CR * MC \quad (1)$$

Em que:

Coefficiente de Resíduos (CR): é a quantidade de resíduo, em base seca, pela massa úmida colhida no campo (MC);

Coefficientes de Disponibilidade (CD): é a quantidade de resíduos, disponíveis em base seca, em relação à porcentagem da massa total de resíduos;

Quantidade total de resíduos (CRE).

O CR é determinado pela variedade da cana-de-açúcar e suas proporções de fibras, também pode ser denominado de teor de fibra. O coeficiente de disponibilidade do bagaço é de 100%, quando ele já está alocado no pátio da usina, e a CRE pode ser de 125 a 150 (kg ton⁻¹) (kg de biomassa e toneladas de cana) em base seca, quando esta base estiver 50% de umidade a C_{RE} vai de 250 a 300 (kg_{biomassa}/ton_{cana}). Considerando o coeficiente de disponibilidade com o valor máximo de 100%, admite-se que toda biomassa tem condições técnicas e econômicas de aproveitamento (CORRÊA NETO, 2001).

A partir do coeficiente de resíduo, calculou-se a quantidade total de biomassa disponível através da equação (2), considerando os dados fornecidos pela usina. O CR da cana-de-açúcar é a quantidade de fibra que ela possui. (CORRÊA NETO, 2001).

$$M_b = \frac{M_{cm} * X_f}{(1-U)} \quad (2)$$

Em que:

M_b = Quantidade total de bagaço disponível (ton);

M_{cm} = Quantidade total de cana moída (ton);

X_f = Teor de fibra da cana (ton_{fibra}.ton_{cana}⁻¹);

U = Teor de umidade do bagaço (ton_{H2O}.ton_{bagaçoúmido}⁻¹).

QUANTIDADE DE ENERGIA GERADA

A usina forneceu a proporção de bagaço queimado (kg em quilos de vapor gerado), a cada 1 kg representa 2,70 kg, respectivamente. A posteriori, foi calculado a quantidade de energia gerada em MW por tonelada de bagaço, utilizou-se a equação (3) para encontrar a quantidade de MW fornecida com o uso do bagaço como combustível e compará-la com os dados fornecidos pela usina (GERMEK, 2005).

$$P_b = TCH * BTC * PCI_b * \alpha * \Omega * \phi * \mu \quad (3)$$

Em que:

P_b = Potência gerada pelo bagaço.

TCH = Toneladas de cana-de-açúcar esmagada por hora, (t/h).

BTC = produção de bagaço por tonelada de cana, (kg/t).

PCI_b = Poder calorífico inferior do bagaço, (Mcal/t).

= fator de conversão de trabalho em MJ Mcal⁻¹ (4,18 MJ Mcal⁻¹).

Ω = fator de conversão do tempo (1/3.600 seg h⁻¹).

ϕ = fator de conversão de energia MW/MJ seg⁻¹ (10⁻³ MW/kJ seg⁻¹).

μ = rendimento de transformação da turbina, % (20 - 25%).

Para determinar o potencial ideal de MW gerado a partir da queima de uma tonelada de bagaço, utilizou-se o valor encontrado na equação anterior, na equação (4) a seguir:

$$Q_{tb} = \frac{P_b}{TBH} \quad (4)$$

Em que:

Q_{tb} = Quantidade MW gerado por tonelada de bagaço 1 MW (MW t⁻¹);

P_b = potência gerada pelo bagaço (MW); TBH = Tonelada de bagaço hora. (t h⁻¹).

O valor PCI_b utilizado na equação (3) foi encontrado com o auxílio da tabela 1, que compara os valores dos PCI do bagaço da cana-de-açúcar em diferentes porcentagens de umidade, conforme PERES (1982).

Tabela 1 - Poder calorífico inferior do bagaço da cana-de-açúcar.

Item avaliado	Valores			
Umidade (%)	50,00	40,00	30,00	20,00
PCI (kcal/kg)	1790,00	2270,00	2760,00	3250,00
PCI (Mcal/kg)	1,79	2,27	2,76	3,25
Aumento PCI (%)	0	26,80	54,10	81,50
Aumento calor corrido ao peso (%)	0	5,70	30,10	13,50

Fonte: Adaptado por Peres (1982).

O período de safra considerado para este trabalho, que possibilita base comparativa para safras de outros anos, foi de 240 dias, com início em abril e finalização em novembro. Considerou-se que, em 15% do período de safra, ela permanecerá parada por conta de chuvas ou de algum componente quebrado, totalizando 36 dias. A partir daí, define-se, então, o total de 204 dias efetivos de safra ou 4896 horas de moagem (LACERDA, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com visitas realizadas à usina sucroalcooleira, dados foram obtidos através de perguntas efetuadas aos responsáveis técnicos pelos setores energético e de produção. Durante as visitas, a indústria se encontrava parada e em manutenção, pois o período era de entressafra e quase todos seus componentes estavam sendo revisados e, mediante eventual necessidade, consertados ou substituídos.

A agroindústria optou, naquele momento, por não vender seu excedente, por conta de impasses técnicos, uma vez que havia iminente necessidade da construção de linhas para a transmissão da energia elétrica então produzida – quesito mínimo exigido pela concessionária.

Se a agroindústria tomar a decisão de começar a produzir energia elétrica para venda, a instalação de um projeto de sistema de exportação de energia deverá ser feita. Nesse caso, a energia elétrica gerada seria utilizada para o funcionamento da planta de produção inteira e o excedente vendido para a rede. A produção na safra 2016/2017 foi de 3,4 milhões de ton e a previsão de 3,6 milhões de ton para a safra 2017/2018.

Para encontrar a CRE - *quantidade total de resíduos em base seca* ($\text{kg}_{\text{biomassa}}/\text{ton}_{\text{cana}}$) foi utilizada a equação 1, o valor do coeficiente de resíduos considerado foi de 0,139 ($\text{ton}_{\text{fibra}}/\text{ton}_{\text{cana}}$), que é a quantidade média de fibras encontradas nas canas moídas nesta agroindústria, estando dentro dos valores de 0,125 a 0,150 determinado por Correa Neto (2001).

O CRE calculado foi de 139 ($\text{kg}_{\text{biomassa}}/\text{ton}_{\text{cana}}$) em base seca e de 278 ($\text{kg}_{\text{biomassa}}/\text{ton}_{\text{cana}}$) em base com umidade de 50%. Esse valor encontrado se refere à quantidade de bagaço, em Kg, produzido por tonelada de cana processada.

Para calcular a quantidade total de bagaço, utilizou-se a equação 2, novamente foi utilizado o teor médio de fibra de 0,139 ($\text{ton}_{\text{fibra}}/\text{ton}_{\text{cana}}$), a quantidade de cana moída durante a safra e a umidade considerada foi de 50%.

A quantidade total de bagaço disponível durante toda a safra de 2016/2017 foi de 945.200 toneladas que estavam acessíveis para gerar energia.

Para obtenção dos valores referentes à quantidade de bagaço necessária e a quantidade de energia que poderá ser produzida considerou-se o período de safra começando em meados de abril e se prolongando até meados de novembro, totalizando 240 dias de operação da indústria. Levando em consideração as paradas, serão utilizados um total em 204 dias efetivos de moagem ou de 4896 horas de moagem na safra de 2016/2017 com 125 dias entressafra.

Considerando as 4896 horas efetivas de moagem, 945.200 ton de bagaço disponível e 3.400.000 ton de cana processada, tem-se um valor de 193,05 ton de bagaço por hora e 694,44 ton de cana moída por hora durante o período de safra efetiva.

O bagaço tem como destino as caldeiras da usina, sendo utilizado como combustível para produção energia elétrica e mecânica, que é responsável pelo funcionamento completo da agroindústria. Atualmente, devido à baixa eficiência do sistema, cerca de 10% da quantidade total de bagaço produzido não são consumidos, ou seja, para a safra de 2016/2017, 94.520 ton não foram queimadas e precisaram de outro destino. Os destinos adotados desta quantidade sobressalente são preferencialmente a venda, na maioria das vezes, para agroindústrias que produzem energia para ser exportada para a rede. O mercado para o bagaço é volátil, variando de acordo com a disponibilidade e também com necessidade dos compradores.

Em períodos de entressafra, a usina não processa cana-de-açúcar, por conseguinte, não produz açúcar, etanol e bagaço. Mediante as informações divulgadas pelo engenheiro responsável por toda cadeia produtiva da unidade, no período da entressafra, as agroindústrias sucroalcooleiras que se propõem a vender energia para a rede, ficam sem um volume necessário

de matéria-prima para a produção de energia, tornando a venda mais fácil e com um preço elevado, pois quem se propõe a fornecer energia tem que disponibilizá-la para rede durante o ano todo.

Quando a demanda externa de bagaço é baixa, o seu preço torna-se mínimo deixando inviável sua venda. Em último caso, essa usina queima os excedentes sem que haja nenhuma produção de vapor, sendo claramente um desperdício de recurso energético.

O bagaço é estocado em um pátio a céu aberto, coberto com plásticos para a proteção parcial, se houver o acúmulo de umidade, sua queima e, conseqüentemente, a produção de energia elétrica e mecânica ficam menos eficientes. Com o bagaço estocado, foi produzido o vapor para dar início ao funcionamento dos maquinários no começo safra de 2017/2018.

Segundo informações colhidas no local, para o pleno funcionamento da planta da usina, são necessárias 350 ton de vapor por hora. Os valores de geração de vapor por Kg de bagaço fornecidos pela usina foram demonstrados na tabela 2.

Tabela 2 - Geração de Vapor.

Bagaço queimado (Kg)	Vapor Gerado (Kg)
1,00	2,70
129,63	350,00
203,70	1485,00

Fonte: Fornecido pela Usina.

A usina dispõe de cinco caldeiras montadas em linha, cada uma com capacidade de queima e geração de vapor diferente, pois a caldeira 1 e 2 tiveram a capacidade de geração de vapor otimizada devido a modernizações.

A tabela 3, apresenta a capacidade de queima de cada caldeira que, se somadas, totalizam 550 ton vapor⁻¹. Como em outras etapas da produção, a caldeira tem muita perda de energia e baixa eficiência, mesmo depois que algumas modificações foram feitas.

Tabela 3 - Capacidade de produção de vapor de cada caldeira.

Caldeira	Tonelada/vapor
1	200
2	150
3	100
4	60
5	40

Fonte: Fornecido pela Usina.

A caldeira 1 é a mais moderna e tem a capacidade de trabalhar com 42 bar, mas devido à falta de eficiência e a necessidade da modernização de outros componentes da caldeira e do restante da usina, ela trabalha com apenas 29 bar de pressão.

A usina conta com três conjuntos de turbo-geradores de energia elétrica. Um gerador, adquirido recentemente pela usina, tem o funcionamento constituído por turbina de multiestágio de contrapressão com extração de vapor, redutor de velocidade e gerador elétrico. O mesmo opera com uma voltagem de 13800 V (volts), com uma rotação de 1800 rpm (rotação por minutos) e com frequência de 60 hz (hertz) com a capacidade de produção de 25 Megawatts (MW). Os outros dois geradores têm a capacidade de produzir 5 MW cada. Somente o gerador de 25 MW está em funcionamento e os outros dois estão de reserva. Com esses valores, a

potência de produção da usina é de 35 MW contando com os reservas.

O consumo total de energia desta agroindústria atualmente é de 11 MW, ou seja, com sua capacidade de 35 MW cria-se um excedente de potencial de 24 MW, desconsiderando o que é gasto com energia mecânica. De acordo com o potencial da usina, o valor de energia em MW sobressalente poderia ser vendido para a rede, gerando mais um lucro para empresa.

Mediante as informações divulgadas pelo engenheiro responsável por todo suprimento energético da usina, uma solução para melhorar a eficiência seria a eletrificação de todo sistema, pois existem componentes que ainda trabalham com energia mecânica o que ocasiona em uma alta perda de energia devido à baixa eficiência. Com a eletrificação de todos os componentes da usina, o gasto total de energia seria de 16 MW. Este valor foi utilizado para fazer os cálculos que determinaram o quanto de energia excedente poderá ser produzida.

Também foi considerado para os cálculos somente o turbo gerador mais novo de 25 MW em operação. Somente com este gerador haverá uma sobra de potencial de energia de 9 MW se a usina for eletrificada.

Pereira e Silveira (2016), explica que a escolha pela aplicação de qual produto utilizar para o tomador de decisões faz com que facilite a medida de eficiência técnica na indústria, aumentando o nível de competitividade neste setor tão competitivo, o que fortalece os números desta pesquisa.

Com os valores obtidos anteriormente e através da equação 3, criada por Germek (2005), obteve-se a potência gerada pelo bagaço de 80 MW, que é a potência ideal gerada por hora durante as 4896 horas de moagem. A quantidade de bagaço disponível por hora é de 193,05 ton durante a safra. Utilizando a equação 4, encontrou-se a quantidade de energia em MW que é gerada por tonelada de bagaço e este valor foi de 0,414 MW.

O valor de 0,414 MW seria a quantidade energia produzida a partir uma tonelada de bagaço, mas como já foi relatado, essa agroindústria conta com muitos equipamentos antigos e com baixa eficiência. O valor fornecido pela usina da quantidade de energia gerada por ton de bagaço foi de 0,138 MW, mostrando que, se a usina fosse modernizada e se sua eficiência fosse otimizada, seu potencial de geração de energia seria de aproximadamente três vezes maior do que com aquele as condições atuais. Os valores ideais e reais do potencial de energia produzida foram comparados na tabela 4.

Tabela 4 - Potencial ideal e real de energia gerada por tonelada de bagaço.

Bagaço (Toneladas)	Energia Ideal Gerada (MW)	Energia Real Gerada (MW)
1	0,414	0,138
43,10	18,842	5,948
115,94	48	16,000
159,04	65,842	21,948
193,05	79,923	26,641

Fonte: Própria autoria.

Na condição atual, a usina precisa consumir 90%, ou seja, 850.660 ton de bagaço apenas para seu funcionamento completo durante o período de safra efetiva (204 dias de moagem), restando apenas 10% do bagaço gerado 94.520 ton para produção de energia excedente. A utilização do bagaço necessário para o funcionamento da usina, durante o período de 4896 horas da safra, é de 173,75, sendo que 79,71 toneladas por hora (ton h^{-1}) são destinados para produção de energia elétrica e 94,04 ton h^{-1} para produção de energia mecânica e térmica utilizadas nos processos da usina.

O bagaço disponível para produção de energia excedente durante todo ano é de 10,79 ton h⁻¹. Durante o período efetivo de moagem de 204 dias, a quantidade de bagaço utilizado é de 184,54 ton h⁻¹ sendo 90,5 ton h⁻¹ utilizado para produção de energia elétrica. No período que a agroindústria não estiver em funcionamento (161 dias) a quantidade de bagaço queimada é de 10,79 ton h⁻¹.

Considerando que a usina reserve o bagaço para que seja possível a mesma produção de energia excedente o ano inteiro, o potencial total de energia elétrica real gerada, através do bagaço é de 66.820,80 Megawatts-hora (MWh), com 61.102,08 MWh destinado para o consumo e 5718,72 MWh para venda.

Se for considerada a opção desta agroindústria de comprar bagaço no período de entressafra para a produção, o valor de geração de eletricidade será modificado, obtendo um excedente em MW maior. A utilização de todo bagaço disponível, no período de safra efetiva, será de 193,05 ton h⁻¹ com 99,01 ton h⁻¹ destinados à produção de energia elétrica e o restante para produzir energia mecânica e calor. Os valores de energia consumida e excedente no período de safra podem ser vistos na tabela 5.

Tabela 5 - Potencial de produção de energia utilizando todo bagaço no período de safra.

	PGE (MW)	MW Consumido	MW Excedente	Horas
Safra	13,66	11	2,66	4896

Fonte: Própria autoria.

Em ambos os casos, o turbo-gerador de 25 MW é subaproveitado, gerando aproximadamente metade do seu potencial de produção de energia. Para o próximo passo, considerou-se o consumo total de energia com a usina totalmente eletrificada.

Durante o período de safra, o seu consumo de energia é de 16 MW, considerando que a usina fosse completamente eletrificada. A quantidade de bagaço necessária para seu funcionamento por 204 dias é de 115,94 ton h⁻¹. O total disponível de bagaço, durante o período de safra, é de 193,05 ton h⁻¹, subtraindo o valor de 115,94 ton h⁻¹ se obtêm 77,11 ton h⁻¹ que é a quantidade disponível de bagaço para a produção de energia excedente.

Com 204 dias de funcionamento, o total de bagaço que não é utilizado para abastecer a usina foi utilizado para se obter a quantidade de bagaço/hora disponível durante o ano todo (365 dias). Este valor foi de 43,10 ton h⁻¹ durante o ano, tendo o potencial para gerar aproximadamente 5,9 MW, considerando as condições, a eficiência de produção de energia encontra atualmente.

No período de safra, o montante a ser queimado é de 159,04 ton h⁻¹, gerando aproximadamente 21,9 MW, de 16 MW para o consumo e 5,9 MW para o mercado. O potencial total de energia real gerada através do bagaço é de 159458 MWh, com 112669,33 MWh destinados para o consumo e 46788,67 MWh, para venda.

A tabela 6 mostra a quantidade de bagaço queimado e a quantidade de vapor gerado pelas caldeiras durante o período de safra e entressafra. Além disso, mostra também o máximo que as caldeiras juntas suportam e quais são as porcentagens em relação à capacidade máxima das caldeiras.

Tabela 6 - Vapor gerado por tonelada de bagaço.

	BQ (ton h⁻¹)	Vapor (ton h⁻¹)	CM (%)
Entressafra	43,10	116,37	21,16
Safra	159,04	429,41	78,07
Máximo	203,70	550,00	100,00

BQ: bagaço queimado (toneladas por horas); **CM:** capacidade máxima (porcentagem)

Fonte: Própria autoria.

Para a produção estimada de aproximadamente 21,9 MW, a caldeira trabalha com 78,07% de sua capacidade, para a geração de 5,9 MW a caldeira trabalha com 21,16% de sua capacidade. Esse trabalho abaixo do limite máximo suportado é positivo, pois, se alguma caldeira precisar de manutenção, as outras podem suprir parcialmente ou totalmente a demanda.

CONCLUSÃO

Com base nos dados obtidos e também nas informações referentes à usina, pode-se concluir que um sistema de cogeração se tornaria viável caso a usina fosse totalmente eletrificada, uma vez que, esse sistema tornaria possível a venda de uma quantidade considerável de energia, acarretando numa nova fonte de renda.

Melhorias na eficiência devem ser feitas, assim como a instalação de todo um sistema para a distribuição da energia. Quanto aos números, pode-se notar que, apesar da existência de um alto potencial energético, há também um desperdício (baixa eficiência de geração de energia).

Se a usina optar por implementar esse sistema, que seria responsável pela transmissão da energia para a rede elétrica local, haverá uma grande chance de os resultados serem positivos e os lucros obtidos com a venda da energia se tornará uma nova e segura fonte de renda.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: TDA Comunicação, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 28 out. 2019.

AGUIAR, A. N. **Estudo analisou potencial de biomassa da cana-de-açúcar**. 2015. Disponível em: <http://www4.esalq.usp.br/banco-de-noticias/estudo-analisou-potencial-de-biomassa-da-cana-de-açúcar>. Acesso em: 30 out. 2019.

ALCARDE, A. R. **Geração de energia elétrica**. 2007. Disponível em: http://www.agencia.cnpqia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_107_22122006154841.html. Acesso em: 26 out. 2019.

BARBELI, M. C. A cogeração de energia e sua importância do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. **Empreendedorismo, Gestão e Negócios**, v. 4, n. 4, p. 238-246, 2015.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Curso de Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: http://aneel.gov.br/documents/656835/14876412/Dissertacao_Gabriel_de_Jesus.pdf/832f9f92-ec37-4a91-ad25-a847fe3483ec?version=1.0. Acesso em: 26 out. 2019.

BRAND, M. A. *et al.* Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 353-360, abr. 2014.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanco energético nacional**. Rio de Janeiro, 2019. 303p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf> . Acesso em: 25 fev. 2020.

COELHO, W. L. V. *et al.* Análise do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do setor sucroenergético no estado de Mato Grosso em diferentes cenários produtivos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 2, p. 332-351, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2019/20. **Terceiro Levantamento**, Brasília, v. 6, n. 3, p. 1-58, dez. 2019.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. 2001. 174 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Curso de Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CRUZ, D. M. **Fornecedor de cana quer ser pago pela cogeração**. 2015. Disponível em: <https://www.jornalcana.com.br/exclusivo-fornecedor-de-cana-quer-ser-pago-pela-cogeracao/>. Acesso em: 25 out. 2019.

DANTAS FILHO, P. L. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 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**. 2015. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GERMEK, H. A. **Análise de decisão sobre o aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar, posto na unidade industrial, para fins de cogeração**. 2005. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e Energia. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009.

LACERDA, K. A. **Remodelagem de uma usina sucroalcooleira para incremento da cogeração de energia com aproveitamento do palhiço**. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

LORA, E. S.; HAPP, J. F.; CORTEZ, L. A. B. Caracterização e disponibilidade da biomassa. *In*: UNIVERSIDADE DO AMAZONAS. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus, 1997. cap. 1.

- NEVES, M. F.; WAACK, R. S.; MARINO, M. K. Sistema agroindustrial da cana-de-açúcar: caracterização das transações entre empresas de insumos, produtores de cana e usinas. *In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL – SOBER*, 36., 1998, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Poços de Caldas, 1998. v. 1, p. 559-572.
- PAULILLO, L. F. *et al.* Álcool combustível e biodiesel no Brasil: *quo vadis?* **Revista de Economia Sociologia Rural**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 531-565, set. 2007.
- PEREIRA, C. N.; SILVEIRA, J. M. F. J. Análise exploratória da eficiência produtiva das usinas de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 54, n. 1, p. 147-166, mar. 2016.
- PERES, N. P. Bagaço de cana biomassa alternativa ao óleo. **Revista STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, p. 37-40, set./out. 1982.
- PESSINE, R. T. **Normas e regulamentos básicos sobre produtor independente de energia elétrica**. São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia; Universidade de São Paulo, 2007.
- RODRIGUES, L. D. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação**. 2010. 64 f. TCC (Especialização em Análise Ambiental) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.
- SANTOS, M. L. dos *et al.* Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 507-511, 2011.
- SHIKIDA, P. F. A.; SOUZA, E. C. de. Agroindústria canavieira e crescimento econômico local. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 569-600, set. 2009.
- SILVA, C. M. da; FRANÇA, M. T. de; OYAMADA, G. C. O setor sucroalcooleiro brasileiro e a competitividade entre os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. **Caderno de publicações: Meio Ambiente, Desenvolvimento Regional e Educação**, v. 7, p. 71-91, 2015.

Data de recebimento: 05/03/20

Data de aceite para publicação: 09/06/20