



Universidade Federal
da Grande Dourados

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS – UFGD

FACULDADE DE ENGENHARIA - FAEN

**ANÁLISE DA GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE NAS USINAS
SUCROENERGÉTICAS E SIMULAÇÕES DE MÉTODOS PARA O
AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO**

GUSTAVO EDUARDO DA SILVA SANTIAGO

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2021**

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE NAS USINAS SUCROENERGÉTICAS E SIMULAÇÕES DE MÉTODOS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO

Gustavo Eduardo da Silva Santiago

Orientador: Prof. Dr. Liomar de Oliveira Cachuté

Artigo Técnico apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia, como Trabalho Final de Conclusão de Curso para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: 3.05.02.01-2 Aproveitamento da Energia

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2021**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

ANEXO D - AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluno: **GUSTAVO EDUARDO DA SILVA SANTIAGO**

Título do trabalho e subtítulo (se houver): **ANÁLISE DA GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE NAS USINAS SUCROENERGÉTICAS E SIMULAÇÕES DE MÉTODOS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO**

BANCA EXAMINADORA

1. **Presidente (orientador):**

Prof. Dr. Liomar de Oliveira Cachuté, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

2. **Membro:**

Prof. Dr. Rafael Ferreira Gregolin, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

3. **Membro:**

Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

De acordo com o grau final obtido pelo aluno, nós da banca examinadora, declaramos **Aprovado** o aluno acima identificado, na componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-II) de Graduação no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados.

Dourados, 6 de dezembro de 2021.

Prof. Dr. Liomar de Oliveira Cachuté

Assinatura do avaliador
Prof. Dr. Rafael Ferreira Gregolin

Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos

RESUMO

Com a constante busca por fontes de energia renováveis, em razão das mudanças climáticas causadas pela poluição do meio ambiente, uma das alternativas que se destacam é a geração de energia elétrica através da biomassa. No Brasil, por ser um grande produtor de cana-de-açúcar, a biomassa com mais potencial de crescimento para este fim é a biomassa da cana. O processo que proporciona a geração de bioeletricidade nas usinas sucroenergéticas é a cogeração, que, fundamentada pelo ciclo termodinâmico de Rankine, tem nos seus principais componentes um gerador de vapor (caldeira) e um conjunto turbogerador. No presente artigo são apresentados alguns métodos científicos de como aumentar a eficiência de geração. Dentre eles, são avaliados os ganhos obtidos na geração quando se utiliza caldeiras de alta pressão e temperatura e incremento de palha e ponta de cana-de-açúcar na combustão na caldeira. Através de simulações envolvendo equações e leis termodinâmicas, foi visualizado um aumento de 9,6% de ganho de vapor gerado, se utilizado 10% de palha e ponta de cana-de-açúcar junto ao bagaço. Foi também obtido um aumento de 39,76 % na geração de energia elétrica na substituição de uma caldeira de média pressão e temperatura por uma de alta pressão e temperatura, além da queima também da palha e da ponta junto ao bagaço. Portanto, alguns desses métodos são comprovadamente eficientes, podendo então ser viáveis para usinas que queiram aumentar sua lucratividade e contribuir na geração de energia elétrica através de fontes renováveis.

Palavras chaves: Biomassa. Bioeletricidade. Cogeração. Cana-de-açúcar. Indústria sucroenergética.

ABSTRACT

With the constant search for renewable energy sources, due to climate changes caused by environmental pollution, one of the alternatives that stand out is the generation of electricity from biomass. In Brazil, as it is a large sugarcane producer, the biomass with the greatest growth potential for this purpose is sugarcane biomass. The process that provides the generation of bioelectricity in sugarcane plants is cogeneration, which, based on Rankine's thermodynamic cycle, has in its main components a steam generator (boiler) and a turbogenerator set. This article presents some scientific methods on how to increase generation efficiency. Among them, the gains obtained in generation when using high pressure and temperature boilers and the increase of straw and sugarcane tips in the boiler combustion are evaluated. Through simulations involving equations and thermodynamic laws, an increase of 9.6% in the gain of generated steam was visualized, if 10% of straw and sugarcane tips were used together with the bagasse. An increase of 39.76% was also obtained in the generation of electric energy in the replacement of a medium pressure and temperature boiler with a high pressure and temperature one, in addition to the burning of the straw and the tip together with the bagasse. Therefore, some of these methods are proven to be efficient, and may therefore be viable for plants that want to increase their profitability and contribute to the generation of electricity from renewable sources.

Keywords: Bagasse. Bioelectricity. Cogeneration. Sugarcane industry.



ANÁLISE DA GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE NAS USINAS SUCROENERGÉTICAS E SIMULAÇÕES DE MÉTODOS PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO

Gustavo Eduardo da Silva Santiago, gustavo.santiago@outlook.com¹
Liomar de Oliveira Cachuté, liomarcachute@ufgd.edu.br¹

¹Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD. Rodovia Dourados/Itahum, km 12 – Cidade Universitária

Resumo. Com a constante busca por fontes de energia renováveis, em razão das mudanças climáticas causadas pela poluição do meio ambiente, uma das alternativas que se destacam é a geração de energia elétrica através da biomassa. No Brasil, por ser um grande produtor de cana-de-açúcar, a biomassa com mais potencial de crescimento para este fim é a biomassa da cana. O processo que proporciona a geração de bioeletricidade nas usinas sucroenergéticas é a cogeração, que, fundamentada pelo ciclo termodinâmico de Rankine, tem nos seus principais componentes um gerador de vapor (caldeira) e um conjunto turbogerador. No presente artigo são apresentados alguns métodos científicos de como aumentar a eficiência de geração. Dentre eles, são avaliados os ganhos obtidos na geração quando se utiliza caldeiras de alta pressão e temperatura e incremento de palha e ponta de cana-de-açúcar na combustão na caldeira. Através de simulações envolvendo equações e leis termodinâmicas, foi visualizado um aumento de 9,6% de ganho de vapor gerado, se utilizado 10% de palha e ponta de cana-de-açúcar junto ao bagaço. Foi também obtido um aumento de 39,76 % na geração de energia elétrica na substituição de uma caldeira de média pressão e temperatura por uma de alta pressão e temperatura, além da queima também da palha e da ponta junto ao bagaço. Portanto, alguns desses métodos são comprovadamente eficientes, podendo então ser viáveis para usinas que queiram aumentar sua lucratividade e contribuir na geração de energia elétrica através de fontes renováveis.

Palavras chave: Biomassa. Bioeletricidade. Cogeração. Cana-de-açúcar. Indústria sucroenergética.

Abstract. With the constant search for renewable energy sources, due to climate changes caused by environmental pollution, one of the alternatives that stand out is the generation of electricity from biomass. In Brazil, as it is a large sugarcane producer, the biomass with the greatest growth potential for this purpose is sugarcane biomass. The process that provides the generation of bioelectricity in sugarcane plants is cogeneration, which, based on Rankine's thermodynamic cycle, has in its main components a steam generator (boiler) and a turbogenerator set. This article presents some scientific methods on how to increase generation efficiency. Among them, the gains obtained in generation when using high pressure and temperature boilers and the increase of straw and sugarcane tips in the boiler combustion are evaluated. Through simulations involving equations and thermodynamic laws, an increase of 9.6% in the gain of generated steam was visualized, if 10% of straw and sugarcane tips were used together with the bagasse. An increase of 39.76% was also obtained in the generation of electric energy in the replacement of a medium pressure and temperature boiler with a high pressure and temperature one, in addition to the burning of the straw and the tip together with the bagasse. Therefore, some of these methods are proven to be efficient, and may therefore be viable for plants that want to increase their profitability and contribute to the generation of electricity from renewable sources.

Keywords: Bagasse. Bioelectricity. Cogeneration. Sugarcane industry.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um dos temas mais discutidos na atualidade, estando diretamente relacionado com o desenvolvimento e com a qualidade de vida de qualquer país. Essa discussão não se diz respeito apenas a sua disponibilidade, mas também a respeito da forma de como se obter essa energia. Buscam-se, principalmente, meios sustentáveis para a obtenção da mesma, pois é necessário levar-se em conta a situação vivida atualmente acerca da poluição do meio ambiente e da camada de ozônio.

O Brasil é hoje uma potência em relação à utilização de fontes renováveis para a obtenção de energia elétrica, tendo como principal fonte a das usinas hidrelétricas. Porém, uma outra alternativa vem crescendo cada vez mais em nosso solo: a energia elétrica oriunda da biomassa. Podemos dizer que literalmente essa energia vem do solo brasileiro, pois o Brasil é beneficiado por possuir um grande território fértil, aliado ao clima tropical e ao grande índice de chuva se comparado aos outros países. Esses fatores criam um ambiente quase perfeito para o cultivo de vegetais que no futuro podem ser utilizados como biomassa.

Um dos vegetais que está cada vez mais sendo produzido no fértil solo brasileiro é a cana-de-açúcar, pois é um vegetal utilizado na produção de dois importantes produtos: o açúcar e o etanol. Nas muitas usinas sucroenergéticas que há no Brasil, o bagaço, resíduo este que sobra da produção do açúcar e do etanol, é utilizado como combustível nas caldeiras, produzindo o vapor utilizado nos processos da usina e também a energia elétrica, em um processo termoeletrico chamado de cogeração. A energia elétrica proveniente de biomassa é chamada de bioeletricidade.

Olhando para um cenário mais amplo, muitas dessas usinas utilizam dessa energia não apenas como fonte própria para manter seu pólo industrial, mas também comercializam este produto para o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, o SIN (Sistema Interligado Nacional), aumentando sua lucratividade e também contribuindo no aumento do já alto índice de obtenção de energia elétrica através de fontes renováveis no país. Porém, para que esta geração venha a se elevar e, conseqüentemente, elevar também a lucratividade das usinas, são necessários estudos visando o aumento de eficiência nos processos de obtenção da bioeletricidade.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a importância do aumento da bioeletricidade obtida da biomassa da cana-de-açúcar na matriz elétrica brasileira, avaliando o potencial que essa fonte possui e também fazendo uma análise científica a respeito da geração da bioeletricidade, além de apresentar alguns métodos que possam aumentar a eficiência de geração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo teve, como base, um estudo e revisão bibliográfica de alguns temas e fatores que envolvem a cogeração de bioeletricidade através do bagaço da cana-de-açúcar. Esses temas sofram subdivididos nos seguintes tópicos: matriz elétrica brasileira; produção e demanda da cana-de-açúcar e seus derivados no Brasil; a biomassa da cana-de-açúcar; benefícios socioambientais e potenciais de geração da bioeletricidade; e processo de cogeração. Esses estudos serão destacados a seguir.

2.1. MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

Tendo em vista que o setor sucroenergético no Brasil é um dos mais competitivos do mundo (Nachiluk, 2021), existe uma perspectiva de que o país venha a ser um dos grandes nomes se tratando em produção de bioeletricidade, pois, a cana-de-açúcar, além de ter um alto teor de açúcar e alto teor energético, possui também um bom nível de combustão na queima do bagaço, sendo este a principal biomassa da cana-de-açúcar a ser usada na geração da bioeletricidade (Tolmasquim, 2016).

Como se pode observar na Figura 1, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 65,2% da oferta interna. As fontes renováveis (hidroeletricidade, solar, eólica e biomassa) representam 84,8% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE – Empresa de Pesquisa Energética e MME – Ministério de Minas e Energia, 2021).

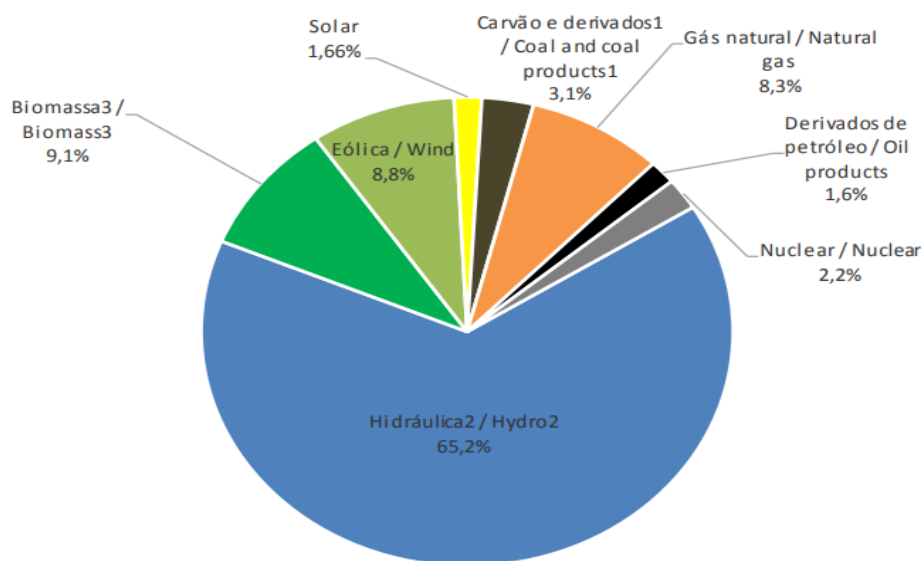


Figura 1. Gráfico da Matriz Elétrica Brasileira (EPE – Empresa de Pesquisa Energética e MME – Ministério de Minas e Energia, 2021)

É destacável que a bioeletricidade equivale a 9,1% da matriz elétrica, sendo atualmente a segunda principal fonte do país. É sabido que a energia elétrica obtida através do petróleo, do gás natural, do carvão mineral, energia nuclear e hidroeletricidade têm vários fatores que dificultam seu aumento de geração, como a degradação do meio ambiente, disponibilidade de recursos, etc (Tolmasquim, 2016). Portanto, existe um ótimo cenário para que fontes alternativas de energia elétrica - como energia solar, eólica e, claro, através da biomassa - venham a ter um grande aumento em seu percentual na matriz elétrica brasileira em um futuro próximo.

Outra questão importante na geração de bioeletricidade é que essa fonte é muito necessária no período de seca no Brasil (meses de maio a outubro), pois nesse período as hidrelétricas operam à baixa capacidade, reduzindo a geração de energia elétrica nesses terminais. Em contrapartida, é nesse período que a safra de cana-de-açúcar está em sua máxima capacidade de produção e, conseqüentemente, é nesse período que se tem o pico na geração de bioeletricidade nas usinas (Amaral, 2017).

Acontece o mesmo com a energia eólica, onde o pico de ventos no Brasil ocorre no período de seca, como é observado no gráfico da Figura 2. Portanto, a bioeletricidade e a energia eólica são fundamentais para a complementariedade de energia elétrica no Brasil e, se houver uma expansão na geração dessas fontes, no futuro não iria mais ser necessário o acionamento emergencial de usinas termelétricas nesse período, algo que acontece frequentemente todos os anos (Sant'Ana, 2021).

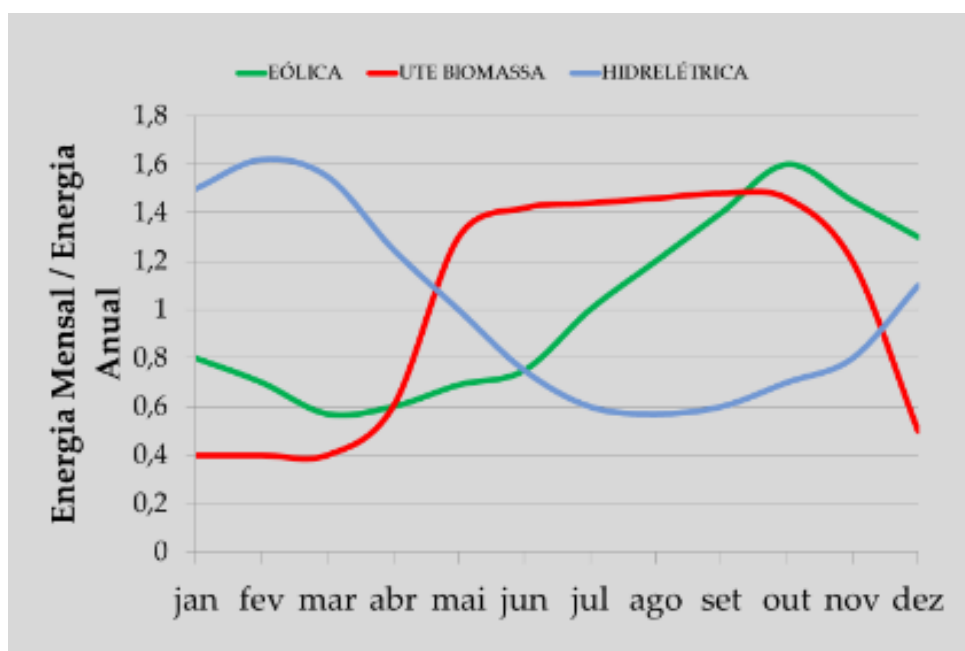


Figura 2. Gráfico da complementariedade das fontes renováveis do ano de 2016 (Amaral, 2017)

Em um levantamento feito pela maior organização representativa do setor de açúcar e etanol do Brasil, a UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar), é possível ter uma ideia do quanto a bioeletricidade é importante no período de seca. No mês de outubro de 2020, considerado o outubro mais seco dos últimos 90 anos, a bioeletricidade gerada forneceu mais de 3 mil GWh ao Sistema Interligado Nacional. Esse valor ajudou a amenizar o impacto da falta de chuva nos reservatórios das hidrelétricas (UNICA, 2020).

2.2. PRODUÇÃO E DEMANDA DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS DERIVADOS NO BRASIL

A cana-de-açúcar é uma planta do gênero *Saccharum* e, no Brasil, são cultivados predominantemente as espécies *Saccharum officinarum* e *Saccharum spontaneum*, dependendo se é preferível a cana com mais teor de açúcar ou mais teor de fibra. Diferente de outros recursos energéticos, como os de origem mineral, a biomassa ocorre em função das atividades urbanas e rurais. A cana-de-açúcar, sendo um produto oriundo da atividade agrícola, depende da demanda que seus produtos possuem e da disponibilidade de terra para seu cultivo (Tolmasquim, 2016). Logo, o bagaço segue esse mesmo critério. E para entender o quanto se produz de bioeletricidade através da cana-de-açúcar e o potencial que se pode produzir no futuro, é preciso entender também a produção e a demanda dos outros produtos derivados da cana-de-açúcar.

No Brasil, a cana-de-açúcar é atualmente o segundo maior produto agrícola (Medina, 2018) e o país é o maior produtor mundial dessa cultura (Nachiluk, 2021). Em 2019, segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a cana-de-açúcar teve uma participação de 15,2% na produção agrícola nacional, atrás apenas da soja (IBGE, 2020). Também, de acordo com a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), na safra de 2019-2020

foram colhidas mais de 642,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. A área colhida foi de aproximadamente de 8,4 milhões de hectares (CONAB, 2020).

O açúcar é um produto com enorme mercado doméstico e internacional, pois, como uma *commodity*², é essencial na vida cotidiana em várias partes do mundo. É previsto que ocorra um aumento mundial no consumo de açúcar devido ao próprio crescimento da população, do crescimento do poder de compra em diversas regiões do mundo e também do aumento no consumo de alimentos processados em todo o mundo (ADVNF, 2020). Segundo dados da SECEX (Secretaria de Comércio Exterior), em 2020 foram exportados pelo Brasil 30,8 milhões de toneladas de açúcar, o maior valor já registrado na série histórica, com um aumento de 72,1% em relação ao ano anterior (SECEX, 2021).

No caso do etanol, a projeção também nos diz que é necessária uma maior produção nos próximos anos. Segundo dados da CONAB, na safra 2019/2020 o Brasil registrou a maior produção de etanol em sua história, produzindo 34 bilhões de litros do biocombustível de cana-de-açúcar. Desse total, 10,12 bilhões de litros corresponderam ao etanol anidro, usado na composição com a gasolina, e 23,89 bilhões de litros ao etanol hidratado. O total de etanol produzido nesta safra, somando etanol da cana-de-açúcar e do milho teve um aumento de 7,5% em relação à safra anterior (Barbosa, 2020).

Com o entendimento, portanto, dos dados de produção e consumo de açúcar e etanol e a projeção de crescimento para esses dois produtos, é de se esperar que, no futuro, as terras da agropecuária que serão destinadas à agricultura, terão uma boa parcela atribuída para plantação da cana-de-açúcar. E para os fins de aumentar a produção da bioeletricidade nas usinas, é de suma importância que ocorra também um aumento na produção da cana-de-açúcar, pois aumenta também a quantidade de biomassa disponível para a geração da bioeletricidade.

² Determinado bem ou produto de origem primária comercializado nas bolsas de mercadorias e valores de todo o mundo e que possui um grande valor comercial e estratégico. (Abreu, 2021)

2.3. BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Além da elevada produtividade de açúcar e etanol por área de plantio, a cana-de-açúcar fornece um volume significativo de bagaço e outros resíduos para o uso como combustível na geração de vapor e bioeletricidade, tornando as usinas sucroenergéticas autossuficientes e também exportadoras de energia elétrica (Tolmasquim, 2016).

O bagaço é por definição o resíduo fibroso da cana resultante do último terno de moagem ou prensagem da cana, constituído de fibra mais o caldo residual. O bagaço é a principal fonte de energia das usinas sucroenergéticas, utilizado como insumo para produção do açúcar e do etanol e para a exportação de energia elétrica. Em geral, a média de toda a cana processada tem 27% do seu peso como bagaço. Outras biomassas também aproveitadas da cana-de-açúcar são a ponta e a palha da cana, e vinhaça (Tolmasquim, 2016). A Figura 3 ilustra um esquema dos componentes da planta da cana-de-açúcar, onde o ponteiro representa a ponta da cana-de-açúcar e as folhas secas e verdes representam a palha. O colmo é a cana-de-açúcar propriamente dita, usada na produção do açúcar, do álcool e de onde sai o resíduo bagaço.



Figura 3. Desenho esquemático dos componentes da planta da cana-de-açúcar (Linerio, 2015)

É recorrente que para cada tonelada de cana-de-açúcar processada nas usinas resulta na produção de 270 quilogramas de bagaço, constituído de 50% de fibras lignocelulósicas e 50% de umidade. Nas usinas mais comuns, cerca de 70% do bagaço processado é utilizado para atender as demandas energéticas da unidade e, os 30% restantes (bagaço excedente) são comercializados ou utilizados para exportação de bioeletricidade. O teor energético do bagaço com 50% de umidade é de aproximadamente 8,92 GJ por tonelada, equivalente a 2,48 MWh ou 1,5 bep (barril equivalente de petróleo) com base no poder calorífico inferior (Tolmasquim, 2016).

A ponta e a palha da cana-de-açúcar tem, no momento da colheita, cerca de 50% de umidade, que pode ser reduzida até cerca de 15% após uma ou duas semanas no campo. Para cada tonelada de cana-de-açúcar processada é produzido cerca de 155 kg de ponta e palha, com 15% de umidade. Usando como base o teor calorífico do bagaço, a ponta e a palha da cana com 15 % de umidade apresenta um teor calorífico de aproximadamente 15,16 GJ, equivalente a 4,22 MWh ou 2,55 bep, cerca de 70% superior ao do bagaço (Tolmasquim, 2016).

Já a vinhaça, o seu volume produzido depende, principalmente, da tecnologia dos processos de extração do caldo e de destilação do vinho. Na extração do caldo em moendas, é utilizada água de embebição para aumentar a recuperação dos açúcares retidos nas fibras da cana. A quantidade de água de embebição a se utilizar depende se é preferível ter um caldo com mais ou menos diluição de açúcares. Na extração por difusor, em geral, se usa mais água de embebição que nas moendas. Na destilação, se o vapor é aplicado direto sobre a corrente de vinho, parte do seu condensado pode se juntar à corrente da vinhaça que é produzida, aumentando seu volume (Tolmasquim, 2016).

A maior parte da vinhaça é utilizada diretamente para fertilização no campo. O que sobra geralmente é transformada em biogás, através da biodigestão anaeróbica. Esse biogás, em muitas usinas, é também queimado nas caldeiras. O volume de biogás produzido depende do rendimento da fermentação do etanol. De modo geral, pode-se considerar que é gerado 0,079 tep (tonelada equivalente de petróleo) para cada 1000 litros de etanol produzido (Tolmasquim, 2016).

Existe uma sazonalidade na oferta de biomassa de cana-de-açúcar, restringindo sua disponibilidade em um determinado período do ano. No centro-sul do Brasil, a colheita da cana-de-açúcar é realizada entre os meses de março e outubro. Já na região norte-nordeste a colheita ocorre aproximadamente na entressafra da região centro-sul. Isso acontece em decorrência das diferenças climáticas entre as duas regiões (Tolmasquim, 2016).

O bagaço, após a moagem da cana-de-açúcar, e a ponta e a palha, caso estas sejam colhidas, são armazenadas em pátio aberto (pátio do bagaço) com o intuito que percam umidade. Existem usinas que não armazenam o bagaço e queimam assim que saem da moenda. Porém, nas usinas que têm a intenção de suprir a demanda interna de energia e exportar excedentes, a biomassa é armazenada para sua utilização na entressafra e, sua quantidade, depende da geração a ser alcançada (Tolmasquim, 2016).

Já a vinhaça não pode ser armazenada, pois com o tempo ocorre uma biodigestão não controlada no biogás, perdendo seu potencial de queima. Logo, seu aproveitamento fica restrito ao período de funcionamento da destilaria (Tolmasquim, 2016).

2.4. BENEFÍCIOS SOCIOAMBIENTAIS E POTENCIAIS DE GERAÇÃO DA BIOELETRICIDADE

A bioeletricidade oriunda da cana-de-açúcar é uma fonte energética totalmente viável e benéfica para a matriz elétrica brasileira, pois com ela existe uma garantia da segurança do suprimento com sustentabilidade ambiental, já que é uma energia gerada a partir da biomassa residual do processo de produção do açúcar e do etanol.

A biomassa da cana-de-açúcar é, em geral, uma fonte renovável de energia que pode ser produzida em escala suficiente para desempenhar um papel expressivo na matriz elétrica nacional. O uso da biomassa como fonte energética é também uma excelente maneira de evitar desperdícios, pois seu aproveitamento energético tem uma dupla função: aperfeiçoar o processo produtivo e minimizar os impactos decorrentes da disposição inadequada dos resíduos no meio ambiente (Tolmasquim, 2016).

Nos aspectos socioambientais, a maior vantagem da bioeletricidade é o fato de ser uma energia renovável e que contribui para a mitigação das mudanças climáticas. Apesar da queima da biomassa gerar emissões de CO₂, entende-se que o carbono emitido é o mesmo que foi absorvido pela planta no processo de fotossíntese e, assim, o balanço é nulo. Caso exista um avanço nos estudos de Captura e Armazenamento de Carbono e seja aplicado em projetos de geração de bioeletricidade, é possível que se obtenha um balanço negativo de emissões, ocorrendo absorção de carbono da atmosfera (Tolmasquim, 2016).

Na questão da logística da bioeletricidade, por ser gerada próxima aos centros consumidores, ocorre uma economia de investimentos em linhas de transmissão, reduzindo perdas que ocorrem nos transportes de energia elétrica e também reduzindo impactos socioambientais (Tolmasquim, 2016).

Como visto anteriormente, a energia elétrica oriunda da biomassa atualmente é a quarta maior fonte da matriz elétrica brasileira. Com base nos estudos da UNICA e do Observatório da Cana, em 2020 foram ofertados aproximadamente 27,5 GWh de bioeletricidade no país e destes, aproximadamente 22,6 GWh de bioeletricidade foram gerados a partir de biomassa da cana-de-açúcar (UNICA, 2021)

Segundo a UNICA, atualmente é aproveitado apenas 15% do potencial de geração e, se houvesse o aproveitamento total da biomassa presente nos canaviais, a bioeletricidade teria potencial técnico para chegar a 148 TWh, o que representaria atender mais de 30% do consumo de energia elétrica no Sistema Integrado Nacional (UNICA, 2021).

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) realizou um estudo usando um ambiente de negócios favoráveis e estipulou que a bioeletricidade oriunda da biomassa da cana-de-açúcar tem um potencial para crescer mais de 50% até 2027 (UNICA, 2021).

Portanto, por definição, a bioeletricidade é uma fonte de energia renovável, eficiente e sustentável, além de ter um grande potencial. É também um processo que garante bons fatores para a segurança da oferta brasileira de eletricidade, como diversificar a nossa matriz e complementar a geração energia hidrelétrica, além de ser sustentável ambientalmente, pois, ao contrário de outras fontes de geração térmica, a bioeletricidade não emana grandes quantidades de poluentes na atmosfera.

2.5. PROCESSO DE COGERAÇÃO

Nas usinas sucroenergéticas, uma das máquinas mais essenciais que compõem o processo fabril é a moenda, onde a cana-de-açúcar é processada e a partir dela resultam-se dois produtos: o caldo e o bagaço. O caldo é o produto usado na fabricação do açúcar e do etanol e, o bagaço, usado na geração de vapor e bioeletricidade (Tolmasquim, 2016).

Após passar pela moenda, o bagaço é transportado através de esteiras para o pátio do bagaço, onde é armazenado junto com as pontas e as palhas da cana, quando colhidas. Posteriormente, estas biomassas são inseridas nas caldeiras, onde ocorre sua combustão. É a partir da caldeira que ocorrem os processos que geram o vapor e a bioeletricidade nas usinas e, este processo, é um ciclo termodinâmico chamado de cogeração (Tolmasquim, 2016).

Cogeração é um processo termoelétrico, isto é, a geração de energia combinada de calor e eletricidade, com uso útil de ambas as formas de energia. Durante a produção do açúcar e do etanol, muitos dos processos requerem a utilização de eletricidade e vapor d'água em determinadas condições de pressão e temperatura. O vapor, por exemplo, é usado no acionamento mecânico das moendas e picadores que processam a cana-de-açúcar, além de outros processos de fabricação do açúcar e do etanol. (Tolmasquim, 2016).

Uma geração termelétrica é baseada na conversão de energia térmica em energia mecânica, e da conversão desta em energia elétrica, ou seja, é um ciclo de geração de potência a vapor. A energia térmica é obtida através da queima de combustíveis fósseis ou renováveis, ou pela fissão nuclear de combustíveis radioativos. Em uma central termelétrica não nuclear, a combustão é o primeiro estágio na transformação da energia química do combustível em energia elétrica (Tolmasquim, 2016).

Do ponto de vista termodinâmico, o ciclo de geração de potência a vapor é conhecido como ciclo Rankine, onde o vapor é gerado através de uma grande diferença de temperatura. Os gases gerados pelo processo de combustão têm temperatura na faixa de 1000 a 1300 °C, porém, a temperatura do vapor varia entre 500 e 550 °C (Tolmasquim, 2016). A Figura 4 apresenta o fluxograma do ciclo Rankine.

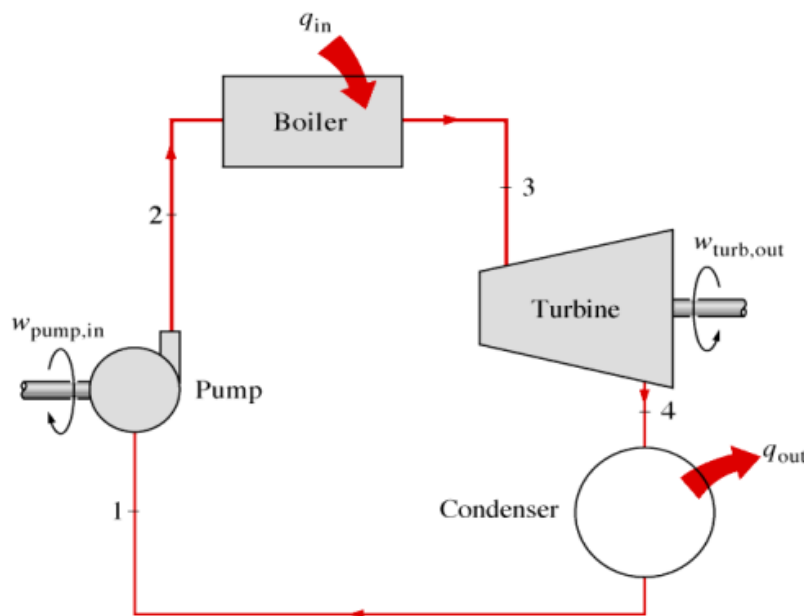


Figura 4. Fluxograma do ciclo Rankine (Franklin, 2017)

O ciclo Rankine é composto de 4 etapas. Na primeira, o fluido de trabalho é bombeado para aumentar a pressão até o nível requerido para a próxima etapa. Na segunda etapa, que ocorre à pressão constante, o fluido de trabalho é aquecido para passar para o estado de vapor saturado. Na terceira etapa, o vapor saturado a elevada pressão e

Uma das maneiras de ocorrer essa redução do consumo do vapor é reduzir o consumo específico do vapor nos equipamentos. Essa redução do consumo específico do vapor afeta diretamente a reserva de biomassa, onde quanto menor for o consumo específico de vapor na indústria, maior será a reserva de biomassa. Essa biomassa adicional pode promover uma extensão no tempo de geração de energia elétrica, podendo ser utilizado inclusive na geração durante a entressafra (Neto, 2011).

Usinas mais modernas voltadas para a geração de bioeletricidade já buscam promover rotineiramente melhorias na eficiência termodinâmica dos equipamentos industriais e corrigem algumas práticas de operação que desperdiçam vapor.

Uma alternativa para usinas mais antigas que visam aumentar a geração de bioeletricidade é a troca de equipamentos, como os trocadores de calor. No processo de aquecimento do caldo, por exemplo, pode-se substituir o trocador de calor tubular por trocadores de calor de placa. Nos trocadores de calor a placa, a diferença entre a temperatura final do caldo e a temperatura do vapor é de no máximo 10°C. Logo, o volume necessário de vapor para aquecer o caldo a uma determinada temperatura, seria menor se comparada à trocadores de calor tubular, que tem um *approach*³ de até 20°C. Isso acontece pelo fato que os trocadores de calor a placa possui seus fluidos em maior exposição, também em uma maior superfície. Sendo assim, há a facilidade no momento da troca de calor, fazendo com que aumente a velocidade da mudança de temperatura. A Figura 6 ilustra um esquema de trocador de calor a placa. (Ackermann, 2019).

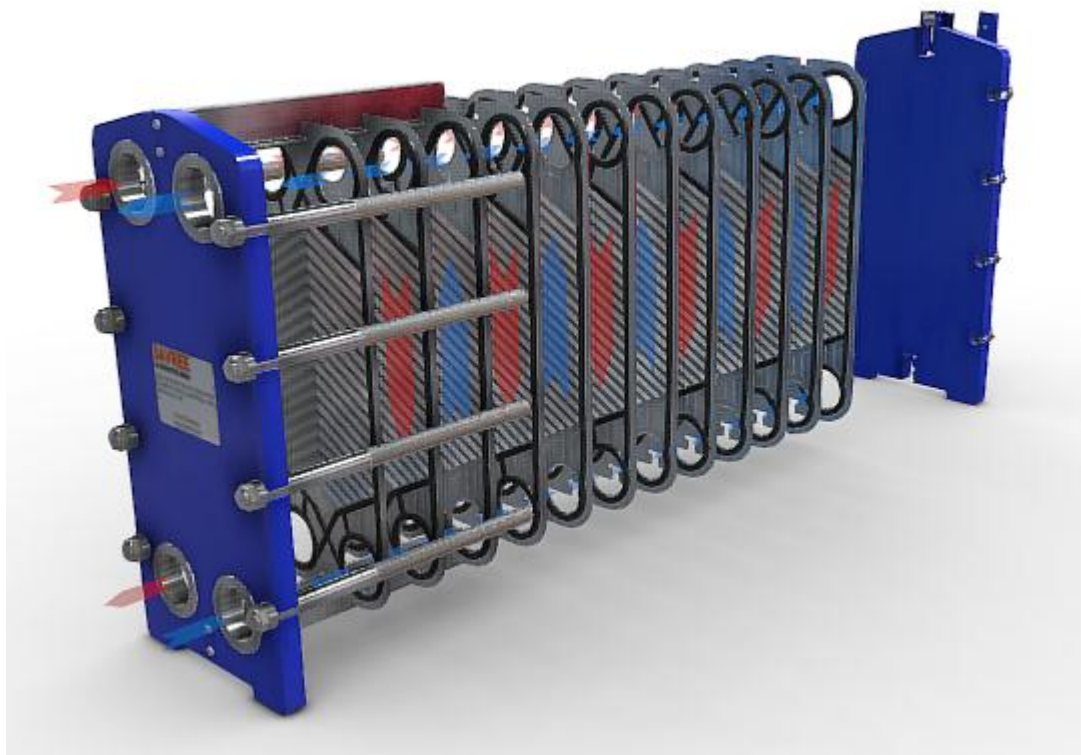


Figura 6. Imagem ilustrativa de um trocador de calor a placa (SAVREE, 2020)

³ Termo técnico utilizado em análises de desempenho de trocadores de calor, onde se refere à diferença de temperatura entre a temperatura de entrada do vapor e temperatura final do fluido resfriado ou aquecido (Redação do Guia do Ar Condicionado, 2018).

II. Utilização de caldeiras de alta pressão e temperatura

Uma outra alternativa para potencializar a geração de bioeletricidade nas usinas é investimento em caldeiras de alta pressão e temperatura. Tradicionalmente, a caldeira empregada nas usinas sucroenergéticas, eram as do tipo grelha, com pressão de 21 bar e temperatura com cerca de 380 °C. As novas usinas, construídas do zero, buscam empregar caldeiras de maior capacidade, com pressão de 40 até 65 bar e temperaturas na casa de 550 °C. Já as usinas mais antigas buscam aperfeiçoar sua planta, substituindo a caldeira por uma mais moderna e redimensionando a planta (Tolmasquim, 2016).

Um modelo de caldeira que vem sendo empregado é o de leito fluidizado, que apresenta um melhor aproveitamento de outras biomassas, além do bagaço, pois permite uma variabilidade maior das características do combustível. Isso se deve porque, nessas caldeiras, a combustão acontece sobre um leito de areia em movimento e com alta temperatura,

permitindo que o combustível queime praticamente por completo (não queimados menor que 0,5%) devido à alta temperatura e turbulência do leito de areia. Essa queima mais eficiente resulta em uma maior eficiência energética, ou seja, mais vapor é gerado por unidade de combustível. Essas caldeiras operam com pressão de até 65 bar e temperaturas até 550 °C (Revista RPA, 2020). A Figura 7 é uma foto retirada de dentro de uma caldeira de leito fluidizado e as setas representam como sua estrutura se movimenta, permitindo assim uma queima mais eficiente do combustível.

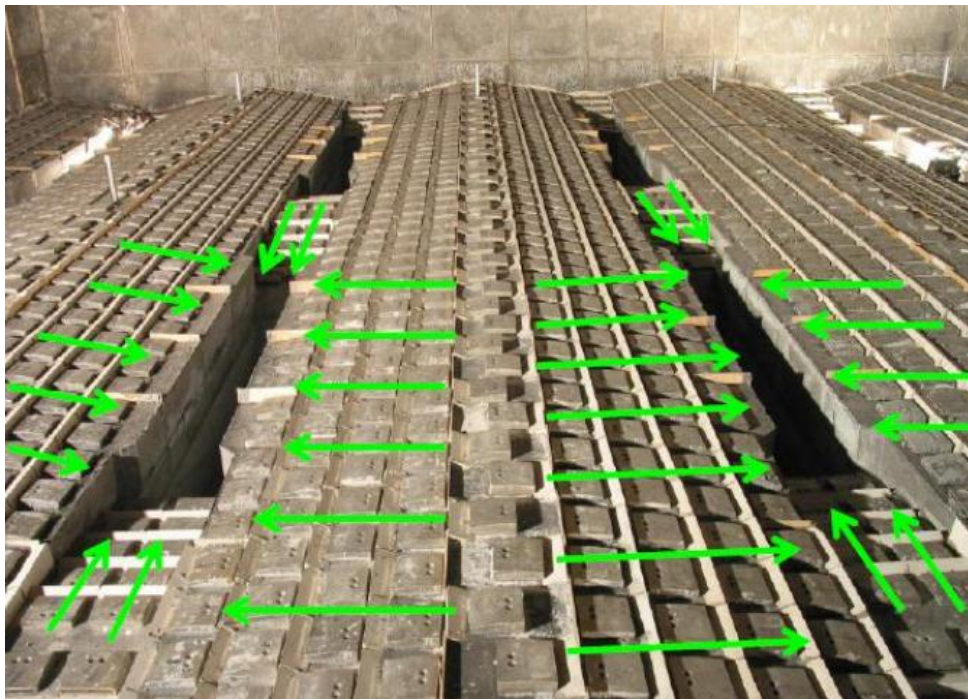


Figura 7. Foto retirada de dentro de uma caldeira de leito fluidizado (Guarani, 2016)

Outro ponto fundamental em relação às caldeiras, é que se tem buscado àquelas com alta capacidade de geração de vapor. Segundo os fabricantes, atualmente, a maior parte das vendas é de caldeiras com capacidade de geração de vapor de 150 a 250 t/h e eficiência acima de 85% (PCI⁴). Os novos projetos já instalados contam com caldeiras com capacidade de 300 a 540 t/h de vapor gerado (Nova Cana, 2014).

Uma das caldeiras que se enquadram nessas características é as do tipo monodrum. Essa caldeira possui uma grande câmara de combustão que possibilita a queima do combustível em suspensão, sem o arraste de resíduo não queimado. São também equipadas com grelhas que giram ou vibram durante a operação. São produzidas quase que exclusivamente para queimar bagaço e outros resíduos da cana, além de madeira, óleo e gás. É também muito útil se for queimar bagaço com umidade, pois existem modelos que permitem até 54% de umidade no bagaço. Alguns modelos têm uma capacidade de 420 t/h de vapor gerado, além de trabalhar com pressões maiores que 100 bar e temperatura de até 560 °C (Nova Cana, 2014).

⁴ Poder Calorífico Inferior: É a quantidade de calor (energia) liberado quando um material entra em combustão e os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada. (Andrade, 2016)

III. Eletrificação da moenda

No processo de moagem da cana, usualmente consiste na associação de 4 a 7 ternos de moenda. É comum observar turbinas a vapor no acionamento desses ternos de moenda, por consumir vapor de baixa pressão e também por gerar vapor de escape, que é utilizado em outros processos da planta. Porém, as usinas que buscam um maior potencial de geração de energia elétrica estão optando por introduzir motores elétricos em alguns ou até em todos os ternos de moenda (Tolmasquim, 2016).

Alguns dos benefícios da substituição de turbinas a vapor por motores elétricos nos ternos são: redução do consumo de bagaço, maior injeção de vapor de escape ao processo de produção de açúcar e etanol e, claro, no aumento no potencial de cogeração de energia elétrica, pois o consumo do vapor, que era utilizado nos ternos de moenda, passaria agora a ser usado na geração de energia. Outra vantagem dos motores elétricos é que eles costumam apresentar menores tempos de paradas para manutenção, pois as falhas em seu mecanismo são menores se comparados aos ternos de moenda de turbina a vapor (Ranuka, 2014).

Entre outros benefícios dos motores elétricos nos ternos de moendas estão: maior produtividade, extração de maior quantidade de caldo utilizando o mesmo terno, maior controle do processo e maior controle de velocidade da moenda, operação remota que reduz risco com acidentes, instalação compacta e reduzida, partida e parada suaves e sem trancos mecânicos e instalação limpa e segura (Ranuka, 2014). A Figura 8 ilustra uma moenda completamente eletrificada implantada na Usina Camaragibe, em Alagoas.



Figura 8. Moenda eletrificada na Usina Camaragibe (Jornal Cana, 2015)

IV. Incremento da palha e ponta da cana-de-açúcar na geração de vapor

A ponta e a palha da cana-de-açúcar eram usualmente queimadas, para facilitar a colheita manual. Quando começou a existir restrições às queimadas em canaviais, a ponta e a palha passaram a ser deixadas como cobertura para o campo. Para que ocorra seu aproveitamento na indústria, é necessário realizar a coleta e o transporte até a usina, o que gera um custo. Logo, o ganho que se teria gerando energia elétrica através da queima da palha e da ponta da cana-de-açúcar tem que cobrir o custo que teria para transportar essa biomassa até a unidade fabril (Henrique, 2019).

As usinas ainda não têm buscado muito a utilização da palha e da ponta da cana para cogeração. Até 2019, segundo levantamento da revista RPAnews, aproximadamente 18 usinas fizeram, em algum momento, o recolhimento da palha e da ponta da cana para produção de energia elétrica. Esse baixo número se deve, provavelmente, à falta de planejamento adequado para o referido recolhimento e transporte e uso dessas biomassas. Algumas das considerações que se deve levar em consideração, antes da usina começar a utilizar a palha e a ponta na cogeração, são: tamanho da usina (moagem total e horária), a área de cana própria, a disponibilidade da unidade para gerar e exportar energia elétrica excedente, e as características das caldeiras (Henrique, 2019).

A Usina Ferrari é uma que tem sido um dos modelos mais bem-sucedidos em relação ao aproveitamento da palha. Segundo o gerente industrial da usina, Hênio J. Respondevesk Júnior, o principal ponto levado em consideração para o investimento é a grande quantidade de energia elétrica exportada para a rede, logo existe a necessidade de mais biomassa para cumprir a meta de exportação (Henrique, 2019).

Atualmente, a coleta da cana é feita majoritariamente de maneira mecanizada e o transporte da palha e da ponta da cana pode ser realizada junto da própria cana-de-açúcar e, posteriormente, a sua separação sendo realizados nas estações de limpeza a seco ou por enfardadora, alguns dias depois da colheita. O método de enfardamento geralmente é mais eficiente para a cogeração da palha e da cana, pois é mais fácil de ser contabilizada, pois a palha e a ponta que vai junto com a cana apresentam variações devidas sua umidade, condições de colheita, entre outras (Henrique, 2019).

É fundamental, porém, que impurezas minerais presentes na palha e na ponta enfardada e, mais significativamente, na palha e ponta separada pelas estações de limpeza a seco, sejam retiradas do processo, evitando desgaste nas caldeiras. Outro ponto importante é que, no caso de limpeza a seco, a palha e a ponta sejam separadas totalmente da cana, para não trazer consequências negativas na capacidade de moagem, extração e qualidade do caldo (Henrique, 2019).

Como visto anteriormente, o teor calorífico da palha e da ponta da cana são 70% superiores ao do bagaço, logo o ganho na geração de energia elétrica seria muito grande, se, é claro, a usina tivesse um projeto muito bem elaborado quanto à colheita, transporte e separação dessas biomassas.

3.2. SIMULAÇÃO DE GANHO DE EFICIÊNCIA COM OS MÉTODOS DE UTILIZAÇÃO DE CALDEIRAS DE ALTA PRESSÃO E TEMPERATURA E INCREMENTO DE PALHA E PONTA DE CANA-DE-AÇÚCAR NA GERAÇÃO DE VAPOR

Neste item serão apresentados quatro casos para serem demonstrados que dois dos métodos apresentados possam realmente ser eficientes. Os casos apresentados serão os seguintes:

- I. Caldeira de média pressão e temperatura queimando apenas bagaço da cana-de-açúcar;
- II. Caldeira de média pressão e temperatura queimando bagaço, palha e ponta de cana-de-açúcar;
- III. Caldeira de alta pressão e temperatura queimando apenas bagaço de cana-de-açúcar;
- IV. Caldeira de alta pressão e temperatura queimando bagaço, palha e ponta de cana-de-açúcar.

Nas simulações, serão utilizadas equações termodinâmicas de análise de sistemas térmicos de potência. Através do balanço de energia em regime permanente (primeira lei da termodinâmica) podemos chegar à expressão da Eq. (1), que fornece a vazão mássica de vapor em uma caldeira (Cengel, Boles, 2013). Ela é expressa a seguir:

$$m = \frac{PCI \cdot Q}{h_2 - h_1} \cdot \eta \quad (1)$$

Onde:

m – Vazão mássica de vapor (t/h)

PCI – Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

Q – Vazão do combustível (t/h)

h_1 – Entalpia da água de alimentação da caldeira (kJ/kg)

h_2 – Entalpia do vapor que sai da caldeira (kJ/kg)

η – Rendimento da caldeira (%)

O valor de PCI, em kcal/kg, pode ser calculado pelo método de HUGOT (Garcia, Pizarro, Lavín, 2013):

$$PCI = 4250 - 12 \cdot A - 48 \cdot W \quad (2)$$

Onde:

PCI – Poder calorífico inferior da biomassa (kcal/kg)

A – Teor de açúcar na biomassa (%)

W – Umidade da biomassa (%)

O valor do teor de açúcar no bagaço pode ser considerado um valor constante de 4% (Garcia, Pizarro, Lavín, 2013). Na palha e na ponta da cana-de-açúcar, por originalmente serem descartadas na produção de açúcar, é adotado um teor de açúcar de 0%. A umidade do bagaço, da palha e da ponta já foi informada no subtópico 2.3, que são de 50%, 15% e 15%, respectivamente. Por terem os mesmos valores de teor de açúcar e umidade, o valor de PCI da palha e a ponta de cana-de-açúcar são o mesmo.

Portanto, os valores de PCI para cada uma das biomassas são:

$$PCI_{\text{bagaço}} = 1802 \text{ kcal/kg}$$

$$PCI_{\text{palha e ponta}} = 3530 \text{ kcal/kg}$$

Convertendo esses valores para kJ/kg, utilizando o fator de conversão de 4,184, se tem os seguintes resultados:

$$PCI_{\text{bagaço}} = 7539,568 \text{ kJ/kg}$$

$$PCI_{\text{palha e ponta}} = 14769,52 \text{ kJ/kg}$$

A vazão do combustível é a proporção que é queimado na fornalha para cada um dos combustíveis. Nos casos I e III será usado o valor de 100 t/h, pois 100% do combustível serão de bagaço. Já para os casos II e IV será usada uma proporção de 90% de queima de bagaço e 10% de queima de palha e pontas, logo a vazão de combustível será de 90 t/h para o bagaço e 10 t/h para a palha e ponta.

Nesta simulação, a entalpia da água de alimentação foi determinada através da Tabela A4 de (Cengel, Boles, 2013) com base na temperatura da água de alimentação. Aqui, foi estabelecida uma temperatura de 120 °C para a água de alimentação. Para este valor de temperatura, a entalpia da água de alimentação é de 503,81kJ/kg.

A entalpia do vapor que sai da caldeira diz a respeito da pressão e temperatura de trabalho da caldeira. São estabelecidos para os casos I e II, valores de 42 bar e 450 °C, respectivamente. Já para os casos III e IV, os valores serão de 65 bar e 550 °C, respectivamente. Interpolando os valores da Tabela A-6 de (Cengel, Boles, 2013), os valores de entalpia do vapor que sai das caldeiras são de: 3328,4 kJ/kg para os casos I e II, e 3536,45 kJ/kg para os casos III e IV.

A eficiência da caldeira foi considerada de 87%. Com todos estes valores definidos, é possível calcular, através da Eq. (1), a vazão mássica de vapor que sai da caldeira, para cada um dos casos:

I - Caldeira de média pressão e temperatura queimando apenas bagaço de cana-de-açúcar

PCI _{bagaco}	7539,568 kJ/kg
Q	100 t/h
h ₁	503,8 kJ/kg
h ₂	3328,4 kJ/kg
η	87%
m	232,22 t/h

Tabela 1. Dados e resultado da vazão mássica do caso I (Autor)

II - Caldeira de média pressão e temperatura queimando bagaço, palha e ponta de cana-de-açúcar

PCI _{bagaco}	7539,568 kJ/kg
PCI _{palha e ponta}	14769,52 kJ/kg
Q _{bagaco}	90 t/h
Q _{palha e ponta}	10 t/h
h ₁	503,8 kJ/kg
h ₂	3328,4 kJ/kg
η	87%
m	254,49 t/h

Tabela 2. Dados e resultado da vazão mássica do caso II (Autor)

III - Caldeira de alta pressão e temperatura queimando apenas bagaço de cana-de-açúcar

PCI _{bagaco}	7539,568 kJ/kg
Q	100 t/h
h ₁	503,8 kJ/kg
h ₂	3536,45 kJ/kg
η	87%
m	216,29 t/h

Tabela 3. Dados e resultado da vazão mássica do caso III (Autor)

IV - Caldeira de alta pressão e temperatura queimando bagaço, palha e ponta de cana-de-açúcar

PCI _{bagaco}	7539,568 kJ/kg
PCI _{palha e ponta}	14769,52 kJ/kg
Q _{bagaco}	90 t/h
Q _{palha e ponta}	10 t/h
h ₁	503,8 kJ/kg
h ₂	3536,45 kJ/kg
η	87%
m	237,03 t/h

Tabela 4. Dados e resultado da vazão mássica do caso IV (Autor)

Nesta primeira simulação, observa-se que a vazão mássica de vapor na caldeira aumentou quando foram inseridos 10% de palha e ponta junto ao bagaço. Esse aumento na vazão mássica de vapor foi de aproximadamente 9,6% para os dois tipos de caldeira. Portanto, fica claro que a utilização da palha e da ponta da cana-de-açúcar na cogeração trás resultados muito positivos quanto ao vapor gerado pela caldeira.

Entretanto, não foi possível, através do cálculo da vazão mássica de vapor, conferir o aumento de eficiência com a mudança de uma caldeira de média pressão e temperatura para uma de alta pressão e temperatura. Aliás, o vapor gerado é maior na caldeira de média pressão. Porém, em termos de geração de energia elétrica, a eficiência como um todo depende tanto da caldeira quanto do conjunto turbogerador, portanto, para analisar o ganho de eficiência com o uso de uma caldeira de alta pressão e temperatura, é necessário uma análise em termos de potência gerada no conjunto turbogerador. (Cengel, Boles, 2013).

Como já foi dito, a turbina do conjunto utiliza a energia contida no vapor (gerado pela caldeira) para realizar trabalho mecânico útil, para, posteriormente, converter em energia elétrica no gerador. A quantidade de energia elétrica produzida pelo turbogerador pode ser calculada pela Eq. (3) (Cengel, Boles, 2013):

$$P_e = m \cdot \Delta h \cdot \eta \quad (3)$$

Onde:

P_e – Potência elétrica nos terminais do gerador (kW)

m – Vazão mássica de vapor (kg/s)

Δh – Queda de energia entálpica (kJ/kg)

η – Rendimento do conjunto turbogerador (%)

Para o cálculo da potência elétrica nos terminais do gerador, serão utilizados os valores de vazão mássica de vapor obtido na simulação anterior, tendo apenas que realizar a conversão de unidade, de t/h para kg/s. O rendimento do conjunto turbogerador será definido como 85%;

A queda de energia entálpica é definida como a diferença entre a entalpia na entrada e na saída da turbina. Para esta simulação, foi escolhida uma turbina de contrapressão, turbina esta que é mais favorável ao processo de cogeração, pois a energia térmica é convertida em trabalho e o vapor de escape vai para o processo com temperatura e pressão adequadas conforme a necessidade do mesmo, sendo que o vapor de escape possui uma pressão maior que a atmosférica (Turbivap, 2020).

Nesta simulação, são definidos que a pressão e a temperatura do vapor de escape na turbina são de 2,5 bar e 150 °C, respectivamente. Logo, a entalpia na saída da turbina, interpolando da Tabela A-6 de (Cengel, Boles, 2013), será de 2765,15 kJ/kg.

Já a pressão e a temperatura do vapor na entrada da turbina têm seus valores iguais àqueles que saem da caldeira. Portanto, as entalpias serão as mesmas utilizadas na simulação anterior, 3328,4 kJ/kg para os casos I e II, e 3536,45 kJ/kg para os casos III e IV.

Com todos os valores da Eq. (3) definidos, é possível então calcular a potência elétrica nos terminais do gerador para cada um dos casos:

I - Caldeira de média pressão e temperatura queimando apenas bagaço de cana-de-açúcar

m	64,51 kg/s
h_{entrada}	3328,4 kJ/kg
$h_{\text{saída}}$	2765,15 kJ/kg
Δh	563,25 kJ/kg
η	85%
P_e	30884,97 kW

Tabela 5. Dados e resultado da potência elétrica do caso I (Autor)

II - Caldeira de média pressão e temperatura queimando bagaço, palha e ponta de cana-de-açúcar

m	70,69 kg/s
h_{entrada}	3328,4 kJ/kg
$h_{\text{saída}}$	2765,15 kJ/kg
Δh	563,25 kJ/kg
η	85%
P_e	33843,72 kW

Tabela 6. Dados e resultado da potência elétrica do caso II (Autor)

III - Caldeira de alta pressão e temperatura queimando apenas bagaço de cana-de-açúcar

m	60,08 kg/s
h_{entrada}	3536,45 kJ/kg
$h_{\text{saída}}$	2765,15 kJ/kg
Δh	771,3 kJ/kg
η	85%
P_e	39388,75 kW

Tabela 7. Dados e resultado da potência elétrica do caso III (Autor)

IV - Caldeira de alta pressão e temperatura queimando bagaço, palha e ponta de cana-de-açúcar

m	65,84 kg/s
h_{entrada}	3536,45 kJ/kg
$h_{\text{saída}}$	2765,15 kJ/kg
Δh	771,3 kJ/kg
η	85%
P_e	43165,04 kW

Tabela 8. Dados e resultado da potência elétrica do caso IV (Autor)

Nesta segunda simulação, foi possível perceber o efeito que uma caldeira de alta pressão e temperatura faz em termos de aumento de eficiência de geração de energia elétrica, além de evidenciar novamente um aumento de geração com o incremento de palha e ponta de cana-de-açúcar na queima na caldeira.

Em termos de valores, na simulação apresentada, se antes operava com uma caldeira de média pressão e temperatura e queimava apenas bagaço, se passasse agora a operar com uma caldeira de alta pressão e temperatura e queimar bagaço, palha e ponta, o ganho seria de aproximadamente 39,76 % na geração de energia elétrica. Porém, vale ressaltar novamente que parte do vapor gerado na caldeira é direcionada para outros processos da usina, logo esse aumento de geração é apenas uma projeção caso todo o vapor fosse diretamente para os terminais de geração de bioeletricidade.

Portanto, em termos de ganho de eficiência para vários processos da usina, o incremento de palha e ponta de cana-de-açúcar é mais interessante, pois o ganho de geração de vapor é significativo. Agora, se a usina quer principalmente aumentar a eficiência na geração de bioeletricidade, o uso de uma caldeira de alta pressão e temperatura seria o mais recomendável, dependendo da capacidade de investimento da usina.

4. CONCLUSÃO

Com o crescente aumento de demanda de energia e a mitigação de fontes não renováveis, a bioeletricidade se enquadra como uma das melhores soluções em termos de energia de fontes renováveis. E o Brasil, por ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tem, nesse produto, excelentes potenciais para gerar grande quantidade de bioeletricidade através de suas biomassas.

Junto a estas projeções, o meio científico tem buscado alternativas para aumentar a eficiência de geração de bioeletricidade nas usinas sucroenergéticas. Apesar de serem alternativas que requerem um grande investimento, dependendo do projeto que a usina utilizar para aumentar o dimensionamento da sua central termoeletrica, o ganho em energia elétrica gerada pode chegar a quase 40%, conforme as simulações feitas no presente artigo. Se uma usina optar “apenas” por utilizar as palhas e as pontas da cana, sem trocar a sua caldeira de média pressão e temperatura, o ganho de geração já seria de quase 10%.

Portanto, o investimento que será feito, por exemplo, na compra de caldeiras de alta pressão e temperatura e na logística para o recolhimento e separação da palha e da ponta da cana, podem ser pagas com a própria venda da energia elétrica para o SIN e, após pagar o investimento, a lucratividade da usina atingiria valores interessantes, além de, é claro, contribuir com uma energia limpa para a população.

Para trabalhos futuros, é sugerido o estudo de outros métodos que façam aumentar a eficiência de cogeração de bioeletricidade nas usinas sucroenergéticas. Outra sugestão é o dimensionamento uma planta sucroenergética, analisando todo o ciclo de vapor da planta e aplicando os métodos necessários para diminuir o consumo de vapor nos processos da usina e verificar, ao final, o ganho na geração da bioeletricidade.

5. REFERÊNCIAS

- Abreu, Julia. O que são commodities e quais são os tipos? Serasa Ensina. 2021. <<https://www.serasa.com.br/ensina/dicas/commodities/>> Acessado em 12/12/2021
- Ackermann, H. P. H., 2019. Técnicas recomendadas para a produção de açúcar e etanol. Revista Opiniões – Sucoenergético, <<https://sucroenergetico.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/15-tecnicas-recomendadas-para-producao-de-acucar-e/>> Acessado em 17/11/2021
- ADVFN, 2020. Introdução ao Açúcar. ADVFN BR, <<https://br.advfn.com/investimentos/commodities/acucar/introducao>> Acessado em 17/11/2021
- Amaral, Alessandra G. D., 2017. Potencial de geração de energia da cana. Cana Online. <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/potencial-de-geracao-de-energia-da-cana.html>> Acessado em 17/11/2021
- Andrade, Alan Sulato. Máquinas Térmicas AT-101. Universidade Federal do Paraná. 2016. <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT101-Aula01.pdf>> Acessado em 12/12/2021
- Barbosa, F.,2020. Brasil registra a maior produção de etanol da sua história. União Nacional da Bioenergia. Globo Rural. <<https://www.udop.com.br/noticia/2020/04/24/brasil-registra-a-maior-producao-de-etanol-da-sua-historia.html>> Acessado em 17/11/2021
- Cardoso, Tiago Fiori. Cogeração de Energia Através do Bagaço da Cana-de-açúcar: Revisão de Literatura. Sertãozinho. 2011. <<https://www.mta.ufscar.br/arquivos/publicacoes/sertaozinho-ii/monografia-tiago-fiori-cardoso.pdf>> Acessado em 12/12/2021
- Cengel, Yanus A., Boles, Michael A. Thermodynamics: An Engineering Approach, 7th Editon. The McGraw-Hill Companies, Inc. New York. 2011
- Conab, 2020. Conab divulga levantamento final da safra de cana-de-açúcar 2019/20. Nova Cana, <<https://www.novacana.com/n/cana/safra/conab-divulga-levantamento-final-safra-cana-de-acucar-2019-20-230420>> Acessado em 17/11/2021
- Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2021. Balanço Energético Nacional. Ano Base 2020, Rio de Janeiro
- Franklin. Ciclos de Vapor a Potência. 2017. <http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/turbina_vapor_ciclo.pdf> Acessado em 12/12/2021
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G.,2013 et al., “Biomass proximate analysis using thermogravimetry” Bioresource Technology, v. 139
- Guarani. Caldeira de Leito Fluidizado x Grela. Guarani Tereos Açúcar & Energia Brasil. 2016. <http://www.stab.org.br/17sba/13_luiz_fabiano.pdf> Acessado em 12/12/2021
- Henrique, Alisson. Os segredos do uso da palha na cogeração de energia. Revista RPAnews. 2019. <<https://revistarpanews.com.br/os-segredos-do-uso-da-palha-na-cogerao-de-energia/>> Acessado em 12/12/2021
- IBGE, 2020. Valor da produção agrícola atinge R\$ 361 bilhões em 2019 e bate novo recorde. Censo 2022 IBGE, <<https://censo2022.ibge.gov.br/2012-agencia-de-noticias/noticias/29006-valor-da-producao-agricola-atinge-r-361-bilhoes-em-2019-e-bate-novo-recorde.html>> Acessado em 17/11/2021
- Jornal Cana. Usinas do Nordeste vão operar com tecnologia G3 Full. Jornal Cana. 2015. <<https://jornalcana.com.br/usinas-do-nordeste-vaio-operar-com-tecnologia-g3-full/>> Acessado em 12/12/2021
- Linero, Francisco. Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar Planta CTC – Palha Flex. 16º SBA – Seminário Brasileiro Agroindustrial. Ribeirão Preto. 2015. <http://www.stab.org.br/16sba/palestras/francisco_linero.pdf> Acessado em 12/12/2021
- Medina, J.,2018. Veja 5 Culturas mais Cultivadas nas Lavouras Brasileiras!. Agropós, <<https://agropos.com.br/lavoura/>> Acessado em 17/11/2021
- Nachiluk, K., 2021. Alta na Produção e Exportações Marcam a Safra 2020/21 de cana. Análises e Indicadores do Agronegócio, São Paulo, v.16, n. 6, jun. 2021, p. 1-5. <<http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925>> Acessado em 17/11/2021
- Neto, J. I., 2011. Implementação da Cogeração no Grupo São José de Araras – Redução do Consumo de Vapor através da Eletrificação das Moendas Secadoras, Ribeirão Preto
- Nova Cana, 2021. Exportação brasileira de açúcar bate recorde em 2020, com 30,8 milhões de toneladas. Nova Cana, <<https://www.novacana.com/n/acucar/exportacao/exportacao-acucar-fecha-2020-alta-64-5-receita-62-6-volume-050120>> Acessado em 17/11/2021
- Nova Cana, 2014. Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucoalcooleira. Nova Cana – Usina, <<https://www.novacana.com/usina/cogerao-como-funciona-producao-energia-eletrica#sistemas-vapor>> Acessado em 17/11/2021
- Ranuka, 2014. Moenda Eletrificada. Ranuka Brasil, <<http://www.renukabrasil.com.br/br/tecnologia/moenda-eletrificada>> Acessado em 17/11/2021
- Redação do Guia do Ar Condicionado. Approach – O que é? Qual sua importância? Guia do Ar Condicionado. 2018. <<https://guiadoarcondicionado.com.br/approach-o-que-e-qual-sua-importancia/>> Acessado em 12/12/2021

- RPA News, Revista.,2020. Cana-de-açúcar: entenda como definir o modelo ideal de caldeira na industria. Revista RPA News, <<https://revistarpanews.com.br/cana-de-acucar-entenda-como-definir-o-modelo-ideal-de-caldeira-na-industria/>> Acessado em 17/11/2021
- Sant’Ana, J.,2021. Crise hídrica: governo poderá acionar mais usinas termelétricas sem contrato. Grupo Globo, Brasília, <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/06/07/crise-hidrica-governo-libera-acionar-mais-usinas-termeletricas-sem-contrato.ghtml>> Acessado em 17/11/2021
- SAVREE. Plate Heat Exchanger. SAVREE. 2020. < <https://savree.com/en/3d-models/plate-heat-exchanger-phe>> Acessado em 12/12/2021
- Tolmasquim, M. T., 2016. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro
- Turbivap, 2020. Nas turbinas de contrapressão não há condensador após a turbina. O vapor vai para o processo industrial e de lá retorna parcialmente para a caldeira na forma líquida. Turbivap – Conteudos, <<https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-contrapressao/>> Acessado em 17/11/2021
- Unica, 2020. Bioeletricidade ameniza falta de chuva na produção de energia. Unica, <<https://unica.com.br/noticias/bioeletricidade-ameniza-falta-de-chuva-na-producao-de-energia/>> Acessado em 17/11/2021
- Unica, 2021. Bioeletricidade em Números. Edição Especial – Fechamento de 2020
- Unica, 2021. Bioeletricidade. Unica – Setor Sucroenergético, <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>> Acessado em 17/11/2021

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O autor é o único responsável pelas informações incluídas neste trabalho.