

**UM ESTUDO DE CASO DA
EFICÁCIA TÉCNICO-
ECONÔMICA NA GERAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA EM
UMA USINA DE AÇÚCAR E
ÁLCOOL NO PONTAL DO
TRIÂNGULO**

**A CASE STUDY OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICACY IN
ELECTRICITY GENERATION IN A SUGAR AND ALCOHOL PLANT IN PONTAL
DO TRIÂNGULO**

Engenharias · 11/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/778370578](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/778370578)

Lineker de Souza Alves¹

Mário Vinícius Xavier de Araujo²

Kátia Lopes Silva³

Mauro Hemerly Gazzani⁴

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a eficácia técnico-econômica da geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar em uma usina sucroalcooleira localizada no Pontal do Triângulo Mineiro. Os dados operacionais da safra 2023/2024, avaliou-se o desempenho do sistema de cogeração composto por três turbogeradores operando em ciclo *topping*. Os resultados demonstraram que a usina atendeu integralmente sua demanda energética média de 12,6 MW/h, gerando excedente comercializável que atingiu picos superiores a 17 mil MWh mensais. A receita estimada com a exportação de energia, baseada nos preços mínimos da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), superou os custos totais de manutenção (R\$ 295.283,14), confirmando a viabilidade financeira do sistema. Tecnicamente, destacou-se o gerador 3 com o menor consumo específico (3,61 tvapor/MW/h), e a estratégia de acionamento deste equipamento mostrou-se eficaz para reduzir perdas por abertura de válvulas de alívio. Conclui-se que a cogeração a partir da biomassa é uma solução madura, eficiente e rentável, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, a autossuficiência energética da planta e a diversificação da matriz elétrica brasileira.

Palavras-chave: Cogeração; Biomassa; Usinas de álcool e água; Eficiência energética; Viabilidade econômica.

ABSTRACT

This work presents a case study on the technical and economic effectiveness of generating electricity from sugarcane bagasse in a sugar and ethanol plant located in the Pontal do Triângulo Mineiro region. Using operational data from the 2023/2024 harvest, the performance of the cogeneration system, composed of three turbogenerators operating in a topping cycle, was evaluated. The

results demonstrated that the plant fully met its average energy demand of 12.6 MW/h, generating a marketable surplus that reached peaks exceeding 17,000 MWh per month. The estimated revenue from energy exports, based on the minimum prices of the Brazilian Chamber of Electric Energy Commercialization (CCEE), exceeded the total maintenance costs (R\$ 295,283.14), confirming the financial viability of the system. Technically, generator 3 stood out with the lowest specific consumption (3.61 tvapor/MW/h), and the drive strategy for this equipment proved effective in reducing losses due to the opening of relief valves. It is concluded that cogeneration from biomass is a mature, efficient, and profitable solution, contributing to environmental sustainability, the plant's energy self-sufficiency, and the diversification of the Brazilian electricity matrix.

Keywords: Cogeneration; Biomass; Alcohol and water plants; Energy efficiency; Economic viability.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de fontes de energia renováveis e sustentáveis tornou-se uma prioridade frente ao aumento da demanda energética global e às crescentes preocupações ambientais. Nesse cenário, a biomassa se apresenta como uma forte alternativa, especialmente em áreas agrícolas, onde resíduos podem ser aproveitados para a produção de energia. As usinas de açúcar e álcool, que utilizam o bagaço de cana-de-açúcar como insumo para cogeração, são exemplos de como esses resíduos podem ser convertidos em energia, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a diminuição das emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa.

Uma visão geral do setor mostra que existem 345 unidades produtoras em atividade hoje no País. Cerca de 1.200 municípios brasileiros estão envolvidos no cultivo da cana-de-açúcar (20% do total), com quase 10 milhões de hectares cultivados em 2023, US\$ 19,8 bilhões em divisas externas geradas durante o ciclo de abril de 2023 a março de 2024, com as exportações de açúcar e de etanol. Como resultado, o setor sucroenergético foi o 3º segmento na pauta de exportação do agronegócio do Brasil naquele ano, superado apenas pelo complexo da soja, carnes e produtos florestais. As exportações de açúcar totalizaram 35,24 milhões de toneladas para um montante de US\$ 18,23 bilhões – recorde histórico. As exportações de etanol alcançaram 2,55 bilhões de litros e uma receita de exportação da ordem de US\$ 1,53 bilhões. (Mapa,2024)

O Pontal do Triângulo Mineiro, região de destacada vocação agroindustrial, é um importante polo produtor de açúcar e etanol no Brasil, abrigando diversas usinas com potencial para gerar energia a partir do bagaço de cana. O uso desse resíduo para a produção de eletricidade, além de aumentar a eficiência energética dos processos produtivos, pode resultar na geração de excedentes que podem ser comercializados no sistema elétrico nacional, proporcionando uma fonte adicional de receita para as usinas.

A cogeração citada anteriormente é um processo no qual temos como resultado duas energias, térmica e elétrica, a partir da mesma fonte primária. Segundo Coelho (1999) é fundamental notar que o processo de cogeração é, acima de tudo, uma forma de usar a energia de maneira eficiente. Isso ocorre porque o rendimento do processo de geração de energia, segundo a segunda lei da termodinâmica, é maior quando a produção é combinada, o que

permite um melhor aproveitamento da energia contida no combustível.

Para tanto, este trabalho apresenta um estudo de caso da eficácia técnico-econômica na geração de energia elétrica em uma usina de açúcar e álcool localizada no pontal do triângulo mineiro, considerando tanto aspectos técnicos como eficiência e capacidade de geração quanto aspectos econômicos, incluindo os custos envolvidos e a viabilidade de comercialização do excedente de energia.

2. ESTADO DA ARTE

Rezende (2018) apresentou um estudo sobre a geração de energia a partir de biomassa e suas possíveis fontes energéticas, com ênfase nas opções disponíveis no Brasil. São destacadas as principais fontes com o objetivo de comparar seu potencial energético e sua disponibilidade no país. Visando à diversificação da matriz energética brasileira, foi realizado um estudo de caso utilizando o bagaço de cana-de-açúcar como fonte para a geração de energia elétrica em um biodigestor modelo canadense. Em seguida, foi feita uma análise de viabilidade técnica e econômica para a implementação de usinas de biomassa. Os resultados indicam que, embora o investimento inicial nessa tecnologia seja elevado, ele é altamente atrativo, pois utiliza apenas o bagaço da cana-de-açúcar, o que pode aumentar a rentabilidade com a venda ou uso da produção de cana. A implantação desse tipo de usina é especialmente recomendada para pequenos produtores que já possuem a lavoura de cana plantada.

A dissertação de Fernandes (2018) analisou uma usina que atualmente não comercializa energia elétrica, com o objetivo de identificar formas viáveis para exportar energia, seja para o mercado livre ou para utilização em seu sistema de irrigação. Para isso, foi realizado um levantamento abrangente de informações tanto do setor agrícola quanto do setor industrial, visando traçar um diagnóstico detalhado da usina. Considerando que o preço é um fator crucial para a decisão de investir na venda de energia excedente, foi analisada a estrutura de regulação de preços e os elementos que influenciam esse mercado.

O autor concluiu que a geração de energia elétrica para comercialização é viável, desde que seja realizada no período de entressafra, utilizando o bagaço excedente da safra e instalando uma turbina de condensação específica para essa finalidade. Isso permite aproveitar a infraestrutura já existente, como tubulações, caldeiras e geradores previamente instalados.

Caneppele et al. (2020) analisaram e implementaram um projeto de cogeração de energia a partir do bagaço gerado na produção de açúcar e etanol em uma agroindústria localizada na cidade de Pontal, São Paulo. A região de Ribeirão Preto, conhecida como um importante polo de usinas de cana-de-açúcar, reúne os principais produtores de bagaço de cana no Brasil, um subproduto com elevado potencial para geração de energia. A crescente necessidade de diversificar as matrizes energéticas tornou o investimento nesse setor ainda mais promissor. Para avaliar o potencial de cogeração, foram realizados cálculos com base em dados operacionais fornecidos pela usina, como o volume de cana processada por hora durante a safra anual.

O projeto foi adaptado às características da usina, demonstrando viabilidade técnica e eficiência satisfatória. Os autores concluíram que a implantação de um sistema de cogeração seria economicamente viável caso a usina fosse completamente eletrificada, permitindo a comercialização de uma quantidade significativa de energia, o que resultaria em uma nova e importante fonte de receita.

Santos (2023) analisou a cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar em duas etapas: uma análise preditiva nacional da geração e demanda de energia, considerando diferentes cenários hidrológicos, desde períodos de baixa hidrologia, como em 2020, até condições mais favoráveis, como as de 2023; e um estudo de caso aplicado à Usina Monte Alegre, incluindo projeções para os períodos de 2021-2022 e 2023. A pesquisa aborda o potencial, os desafios e as oportunidades dessa fonte de energia, com o objetivo de aprofundar a compreensão sobre esse tema crucial para a sustentabilidade ambiental no Brasil.

Ribeiro (2023) analisou a cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar em duas etapas: uma análise preditiva nacional da geração e demanda de energia, considerando diferentes cenários hidrológicos, desde períodos de baixa hidrologia, como em 2020, até condições mais favoráveis, como as de 2023; e um estudo de caso aplicado à Usina Monte Alegre, incluindo projeções para os períodos de 2021-2022 e 2023. A pesquisa aborda o potencial, os desafios e as oportunidades dessa fonte de energia, com o objetivo de aprofundar a compreensão sobre esse tema crucial para a sustentabilidade ambiental no Brasil.

Oliveira (2023) realizou um estudo focado na otimização de uma planta industrial de cogeração de energia a partir da biomassa da cana-de-açúcar, utilizando simulações para analisar os parâmetros que influenciam a eficiência termodinâmica na geração de energia elétrica. O objetivo de avaliar o potencial de otimização da planta foi atingido, demonstrando que a redução do índice de umidade do bagaço aumenta a eficiência, melhora a capacidade de geração de trabalho líquido e, conseqüentemente, eleva a produção de energia.

No entanto, a utilização do calor descartado pelo condensador mostrou-se inviável, pois a temperatura do vapor de entrada não proporciona uma diferença térmica suficiente para realizar uma troca eficiente com o ar sugerido para a secagem do bagaço. Esse obstáculo foi superado com a adoção de gases de exaustão da caldeira para realizar a troca térmica.

Finalizando, Casado e Barbosa (2024) abordaram a necessidade global de desenvolver novas fontes de energia e aprimorar as existentes, devido à crescente demanda energética mundial, impulsionada por fatores como o aumento populacional, o consumismo e a competitividade econômica. As pesquisas realizadas indicaram que a contribuição das usinas sucroenergéticas para a matriz energética brasileira é muito relevante, especialmente no que diz respeito à energia gerada pela queima da biomassa. Além disso, um aspecto crítico para a eficiência global do sistema termoelétrico no ciclo Rankine são as turbinas. Como muitas usinas possuem décadas de operação, grande parte de suas turbinas são obsoletas. Em contraste, os modelos mais modernos disponíveis no mercado operam em alta pressão, proporcionando maior eficiência energética em comparação às turbinas antigas, que trabalham com baixa pressão de vapor saturado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Setor Sucroenergético

O setor sucroenergético é um ramo da agroindústria que produz açúcar, álcool, aguardente e outros derivados da cana-de-açúcar.

O Brasil obteve nos últimos anos investimentos direcionados ao setor sucroenergético devido ao seu destaque pela capacidade de produzir energia limpa em grande escala, sendo elas etanol e a geração de bioeletricidade com base no bagaço da cana. Com o direcionamento dos investimentos, as usinas sucroalcooleiras produtoras de açúcar começaram a evoluir suas tecnologias para a adaptação da produção do etanol e a bioeletricidade.

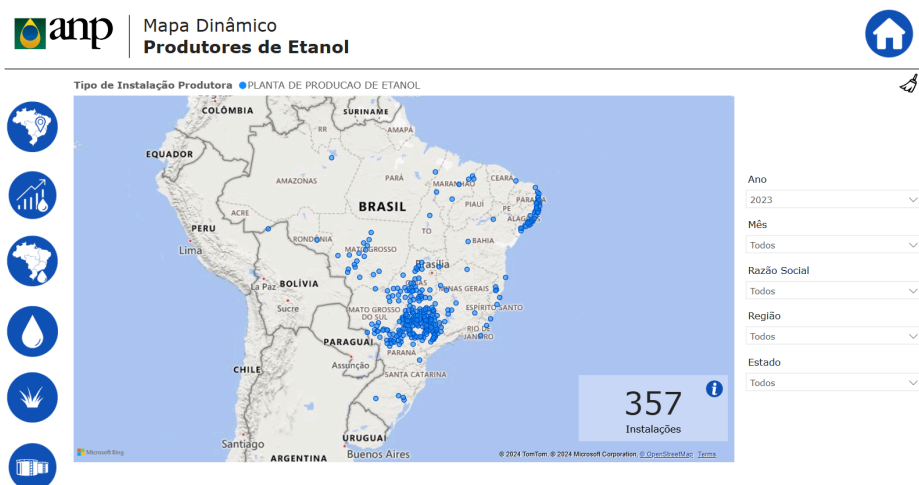
Com a diversificação na produção de etanol, açúcar e bioeletricidade, novos elos foram acrescentados à cadeia produtiva do setor. Contudo, a flexibilidade trazida pela cana-de-açúcar que impulsionou o crescimento nas últimas décadas, vem atrapalhando. Isso deve ao baixo crescimento na demanda por açúcar e ao aumento constante da demanda interna por etanol, o que tem alterado o equilíbrio entre os produtos e impactado a dinâmica de investimento e produção no setor sucroenergético.

Um fator importante para o aumento dessa demanda por etanol é o crescimento da frota de veículos flex no Brasil, que recentemente completou 20 anos de sua criação. Segundo dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2024)) cerca de 90% dos automóveis em circulação no país são flex, reforçando a importância do etanol como combustível sustentável no mercado interno.

A capacidade de produção de energia limpa, a flexibilidade da cana e o aumento da demanda por etanol devem manter o setor em crescimento contínuo, ainda que necessite de um planejamento cuidadoso para adaptação das mudanças do mercado. Apesar dos desafios enfrentados pelo setor sucroenergético no equilíbrio dos produtos derivados da cana-de-açúcar, ele continua sendo um dos pilares da transição energética no Brasil.

A Figura 1 apresenta a distribuição geográfica da produção de etanol no Brasil, com o mapa atualizado com relação ao ano de 2023. A produção de etanol concentra-se nas regiões Sudeste e Centro-Oeste com destaque para os estados de São Paulo que possui 145 usinas, Goiás com 43, e Minas Gerais com 35 unidades onde juntos representam 62% das usinas produtoras de etanol nacional. A alta concentração se deve às características agrônômicas da cana-de-açúcar, que exige regiões tropicais com estações intercaladas de chuva (período vegetativa) e seca (período de concentração do açúcar) favorecendo essas regiões como polos de produção.

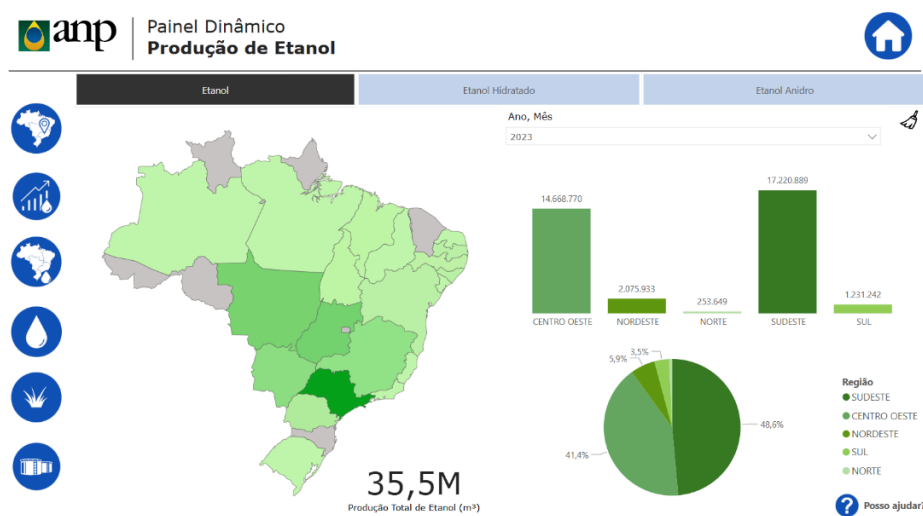
Figura 1 – Produção de Etanol no Brasil



Fonte: (ANP, 2024)

De acordo com a ANP (Agência Nacional do Petróleo), Figura 2, em 2023 a produção de etanol atingiu a marca de 35,5 milhões de metros cúbicos, superando o recorde de 2019 que foi de 35,3 milhões. Desses, 14 milhões foram de etanol anidro e 21,5 milhões de etanol hidratado. No entanto, essa produção não foi proveniente apenas da cana-de-açúcar, ela também incluiu outras matérias-primas como o milho e outros.

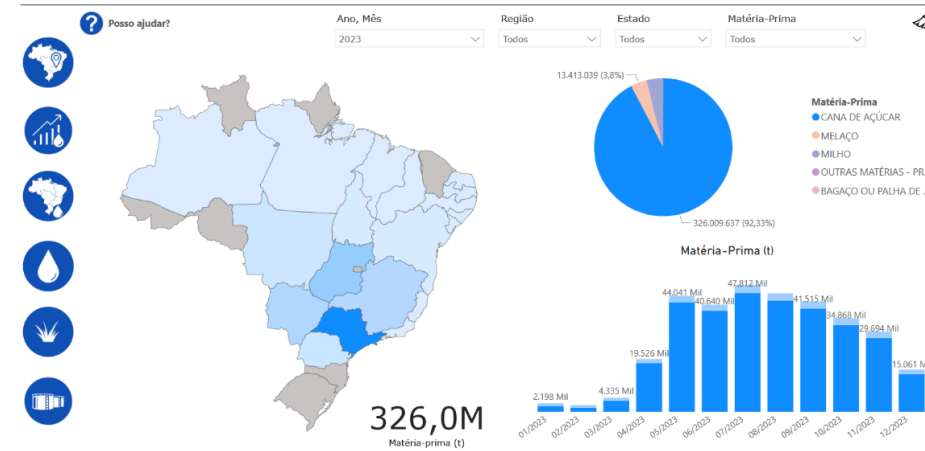
Figura 2 – Produção de Etanol no Brasil



Fonte: (ANP, 2024)

Como evidenciado na Figura 3, para alcançar a marca de 35,5 milhões, foi necessária a produção de 326.009.637 toneladas de cana-de-açúcar com destaque para as regiões Sudeste e Centro-Oeste que contribuíram juntas com 289.939.838 toneladas. Em especial, o estado de São Paulo teve um papel fundamental onde foi responsável por 156.270.095 toneladas, consolidando-se como o maior produtor de cana-de-açúcar do país e reforçando sua liderança na produção de etanol.

Figura 3 – Produção de Etanol no Brasil



Fonte: (ANP, 2024)

Biomassa

A biomassa é uma fonte de energia renovável que apresenta resultados ambientais significativamente menores que os combustíveis fósseis. Segundo o Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2023 a contribuição da biomassa para a produção de energia bateu o recorde de 4,6% de toda a demanda energética do Brasil.

O país possui uma capacidade instalada de 17.385 MW, gerados por 637 empresas que utilizam da biomassa como fonte de energia. Dentre essas, 422 usinas utilizam da cana-de-açúcar como matéria-prima para geração de energia termelétrica aproveitando do bagaço resultante do processo de moagem da cana.

Após a extração do suco, o bagaço composto por fibras e cascas são reaproveitados para geração de energia. O processo utilizado tem início com a queima desta biomassa em caldeiras, produzindo o vapor responsável por mover as turbinas a vapor que geram energia e que alimenta todo processo de fabricação da unidade. Essa estratégia de reutilização dos subprodutos da cana-de-açúcar oferece vantagens significantes para o aspecto ambiental,

otimização dos processos de fabricação e autossuficiência energética.

Esta forma de geração destaca-se pela sustentabilidade ao se aproveitar de recursos que seriam descartados no meio ambiente reduzindo o impacto ambiental e contribuindo para a eficiência operacional. No entanto, devemos observar que a eficiência desse processo pode variar de acordo com a tecnologia implementada para a melhor utilização dos recursos extraídos. Fatores como a quantidade e qualidade do bagaço, além da utilização da palha como fonte adicional de energia, influenciam diretamente a eficiência do sistema de geração termelétrica.

Deste modo a geração a partir da biomassa da cana-de-açúcar promove a sustentabilidade, autossuficiência das usinas e reduz a dependência de fontes de energias fósseis. Porém, para a maximização dos benefícios desse processo é fundamental o investimento em tecnologias avançadas que visam melhorar a conversão de resíduos em energia, garantindo um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e a redução de impactos ambientais.

Cogeração

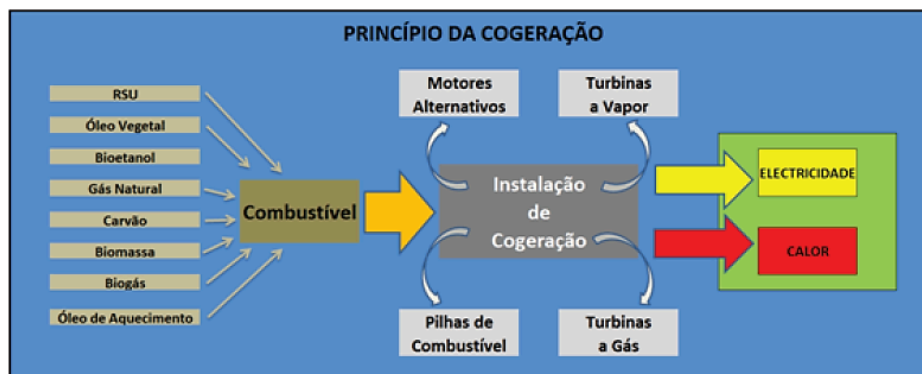
De acordo com Silva e Nascimento Neto (2023), cogeração se refere a produção energética a partir de uma mesma fonte primária, sendo possível produzir energia elétrica, mecânica ou energia térmica útil. Este sistema ganhou maior visibilidade nos Estados Unidos e Europa na busca por descentralizar a produção energética das grandes centrais elétricas, assim, empresas menores passaram a buscar por meios de produzir sua própria energia.

Segundo a resolução normativa ANEEL N° 1.031, de 26 de julho de 2022 (ANEEL, 2022) no artigo 14. Inciso I:

Cogeração: processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária [...].

A cogeração, também conhecida como CHP (*Combined Heat and Power*), pode ser aplicada em qualquer situação em que a eletricidade seja gerada por meio de processos de combustão, utilizando combustíveis fósseis ou fontes renováveis. Trata-se de uma solução altamente eficiente do ponto de vista energético. O conceito de cogeração abrange uma ampla variedade de tecnologias, mas sempre se baseia na combinação de um motor térmico com um sistema que aproveita o calor dissipado no processo. O diagrama mostrado na Figura 4 ilustra o princípio básico da cogeração, bem como diversos fatores associados ao seu funcionamento.

Figura 4 – Diagrama esquemático do princípio da Cogeração



Fonte: Santos (2010)

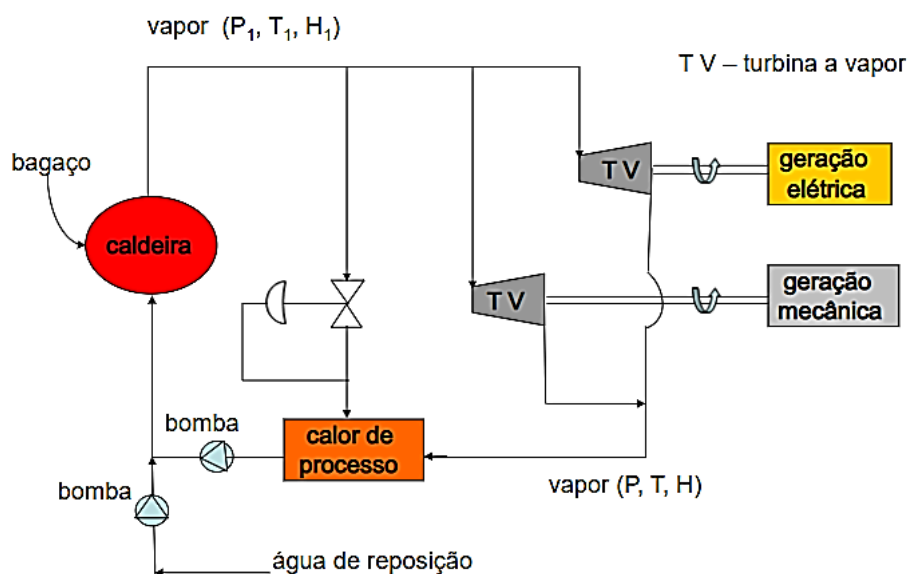
No setor sucroenergético o combustível é a biomassa ou bagaço de cana. O diagrama térmico na Figura 5 mostra o ciclo da cogeração neste setor. Nesse sistema, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras, gerando energia térmica que é utilizada para a produção de vapor. Esse vapor é utilizado tanto para acionar turbinas mecânicas, que impulsionam o processo produtivo, quanto turbinas destinadas à geração de energia elétrica. Após cumprir sua função nas turbinas, o vapor é redirecionado para atender às demandas térmicas do processo produtivo.

Os sistemas de cogeração são classificados com base na relação entre a geração de calor e potência, de acordo com o fluxo de energia. Sendo assim, esses sistemas se dividem em dois grupos: ciclos *bottoming* e ciclos *topping*.

Conforme Santos (2010), no ciclo *topping* (superior), a eletricidade é gerada inicialmente, e o calor residual resultante das perdas térmicas do processo de combustão é aproveitado em seguida. Turbinas a gás, ciclos combinados, motores alternativos ou de combustão interna e turbinas a vapor de contrapressão operam seguindo esse princípio. Já no ciclo *bottoming* (inferior), o calor gerado em um processo industrial é recuperado e utilizado para a produção de eletricidade. Esse tipo de ciclo é mais comum em ambientes industriais, sendo as caldeiras de recuperação os

principais equipamentos empregados nesse processo. No setor sucroenergético brasileiro adota-se o tradicional ciclo *topping*.

Figura 5 - Diagrama padrão de Cogeração utilizado no setor sucroenergético



Fonte: Pessine (2008)

Regimes de Cogeração

Os sistemas de cogeração podem operar seguindo regimes específicos, como por exemplo os regimes de paridade térmica ou paridade elétrica.

Segundo Barbeli (2015), no regime de paridade térmica, o sistema de cogeração é planejado e operado para atender às necessidades térmicas da planta industrial, sendo o calor o produto principal e a eletricidade o subproduto. Nesse caso, o sistema deve estar conectado à rede da concessionária local, permitindo que, conforme a demanda e as condições operacionais, a planta possa adquirir energia elétrica da concessionária ou fornecer o excedente de eletricidade à rede.

Por outro lado, no regime de paridade elétrica, a prioridade é atender às necessidades de energia elétrica da planta industrial, tornando a eletricidade o produto principal e o calor o subproduto. Se o calor gerado for insuficiente para o processo produtivo, um sistema auxiliar deve ser instalado para suprir a demanda. Caso o calor exceda o necessário, ele é descartado no ambiente.

Caldeiras

Caldeiras são equipamentos utilizados para gerar vapor a partir do aquecimento de um fluido com alta pressão, comumente água, ou seja, é um equipamento com a função de transformar energia térmica em mecânica.

De acordo com a NR 13 (Brasil, 2022), item 13.4.1.1, estabelecida pelo Ministério do Trabalho e Emprego, as caldeiras são classificadas em duas categorias: A e B. As caldeiras de categoria A operam com pressão igual ou superior a 19,98 kgf/cm², enquanto as caldeiras de categoria B funcionam na faixa de 0,61 kgf/cm² até um máximo de 19,98 kgf/cm².

As caldeiras possuem diferentes construções, dependendo da sua operação e finalidade. As Aqua tubulares são caracterizadas pela água fluir pelo lado de dentro da tubulação enquanto o calor aquece externamente, dessa forma gerando uma quantidade maior de vapor comparado com as flamo tubulares que operam de forma inversa, com o calor resultante do processo de queima do combustível fluindo pelo interior dos tubos enquanto a água é aquecida na parte exterior.

Turbinas a Vapor

O vapor produzido pelas caldeiras é geralmente direcionado para as turbinas a vapor, as quais transformam a energia cinética do vapor em energia mecânica, que, por sua vez, é convertida em energia elétrica por meio de um gerador.

Turbinas de Contrapressão

Segundo Wórtice Energia (2024) :

As turbinas de contrapressão são amplamente utilizadas quando se necessita fluxo contínuo de vapor para o processo industrial. Este é um sistema no qual o ciclo não é fechado. O vapor superaquecido, proveniente da Caldeira, entrará na turbina e será despressurizado pela mesma até a pressão desejada para o processo fabril. As condições do vapor de escape utilizado no processo são controladas através da queda entálpica do vapor utilizado no acionamento da turbina, atingindo assim as condições ideais para o processo.

Um dos setores que utiliza deste tipo de turbina é o sucroalcooleiro, visto a necessidade térmica para os processos de fabricação do açúcar e para produção do etanol.

Turbinas de Condensação

As turbinas de condensação utilizam de toda a energia potencial do vapor vindo da caldeira, impossibilitando que este seja utilizado em

outros processos, formando assim um circuito fechado entre a caldeira e a turbina.

Segundo Turbivap(2020), as turbinas a vapor de condensação exigem grandes quantidades de água de resfriamento para dissipar o calor gerado durante o processo de condensação. As turbinas utilizadas em usinas termelétricas, por exemplo, são do tipo condensação, pois não precisam fornecer energia térmica na forma de vapor para processos industriais subsequentes.

Geração Distribuída e Cogeração Qualificada

A geração distribuída é definida como um modelo no qual a energia elétrica é produzida próxima ao local de necessidade, como por exemplo em usinas, indústrias e até mesmo residências. A instalação é realizada de tal forma que atenda a necessidade energética do local sem a utilização de longas redes de energia para transmissão.

Segundo Portal Solar (2024), a geração distribuída pode utilizar fontes como eólica, solar e biomassa para a geração de energia. Devido ao seu menor custo e maior versatilidade, a tecnologia solar fotovoltaica representa mais de 98% das instalações desse segmento no Brasil.

Já a cogeração qualificada é definida como sendo: “atributo concedido a cogeradores que atendem os requisitos definidos nesta Resolução, segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração;” (ANEEL, 2022, Art. 14. § 2º).

Os requisitos para classificação como cogeração qualificada são definidos pela resolução normativa ANEEL nº 1.031, de 26 de julho de

2022 (ANEEL, 2022) como:

I - estar regularizada perante a ANEEL, conforme o disposto na legislação específica e nesta Resolução; e

II - preencher os requisitos mínimos de racionalidade energética, mediante o cumprimento das inequações a seguir:

a)

$$\frac{E_t}{E_f} \geq 15\%$$

b)

$$(E_t / E_f) / X + E_e / E_f \geq F_c\%$$

Sendo:

Et: Energia da utilidade calor

Ef: Energia da fonte

X: Fator de ponderação

Ee: Energia da utilidade eletromecânica

Fc: Fator de cogeração

Os valores de "X" e "Fc" mencionados no inciso II devem ser aplicados conforme a potência elétrica instalada na central de

cogeração e a respectiva fonte, de acordo com o Quadro 1:

Quadro 1 – Valores de X e Fc

Fonte/potência elétrica instalada	X	Fc%
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Fonte: ANEEL, 2022.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como um estudo de caso aplicado, de natureza quantitativa e qualitativa, com abordagem descritiva e analítica, realizado em uma usina sucroalcooleira localizada na região do Pontal do Triângulo Mineiro. A adoção desse método justifica-se pela necessidade de avaliar, em condições reais de operação, o desempenho técnico e a viabilidade econômica do sistema de cogeração de energia elétrica a partir da biomassa, considerando as particularidades operacionais da planta industrial.

Inicialmente, foi realizado o levantamento e a coleta de dados operacionais referentes à safra 2023/2024. Os dados primários foram obtidos diretamente junto à usina e contemplam variáveis como vazão de vapor gerado, pressões e temperaturas nas linhas de vapor, consumo específico de vapor por gerador, potência elétrica gerada, demanda energética interna, energia exportada e custos de manutenção dos equipamentos. Complementarmente, foram utilizados dados secundários, especialmente os preços médios de comercialização de energia elétrica disponibilizados pela Câmara de

Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), fundamentais para a análise econômica do sistema.

Na etapa seguinte, procedeu-se à modelagem e análise do sistema de cogeração com base no ciclo térmico de operação adotado pela usina, caracterizado como ciclo topping. Foram realizados balanços de massa e energia do vapor, bem como a avaliação da distribuição do fluxo de vapor entre os turbogeradores e os processos industriais. Essa análise permitiu determinar o desempenho dos geradores por meio do consumo específico de vapor por unidade de energia gerada, possibilitando a identificação da eficiência individual e global do sistema.

A avaliação técnico-operacional concentrou-se na verificação da capacidade do sistema em atender à demanda energética interna da usina, bem como na análise da estabilidade operacional frente às variações de carga ao longo do processo produtivo. Também foram investigados aspectos relacionados à eficiência no aproveitamento do vapor e às perdas energéticas, como aquelas decorrentes da abertura de válvulas de alívio. Nesse contexto, foi analisada a estratégia operacional adotada pela usina, especialmente o acionamento do terceiro gerador como alternativa para otimização do uso do vapor e redução de desperdícios.

Por fim, a análise econômica foi conduzida a partir da comparação entre a receita obtida com a exportação de energia elétrica e os custos associados à manutenção do sistema de geração. A receita foi estimada com base na energia exportada mensalmente e nos preços médios praticados no mercado, enquanto os custos foram obtidos a partir dos registros de manutenção do conjunto de geradores. Com base nesses dados, foram calculados indicadores de

desempenho econômico, permitindo avaliar a viabilidade financeira do sistema de cogeração.

5. ESTUDO DO CASO

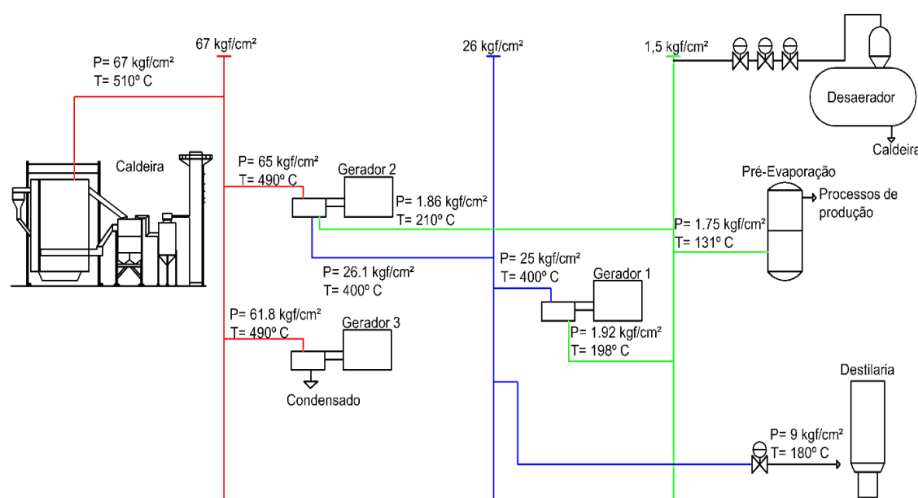
O setor sucroenergético brasileiro é de extrema importância para a indústria brasileira, seja na produção de etanol, açúcar e subprodutos. O setor produziu na safra 2023/2024 35.976.743 m³ de etanol total e 45.918.957 toneladas de açúcar (Mapa, 2024)

Os processos envolvidos na produção destes produtos necessitam maneira intensiva de energia térmica e elétrica. O calor é fundamental em várias etapas, desde a evaporação do caldo de cana para a produção de açúcar até o processo de destilação utilizado na obtenção do etanol.

O calor do processo é fornecido pela caldeira através da queima de um dos subprodutos, o bagaço da cana-de-açúcar, aquecendo a água e liberando vapor em alta temperatura. O vapor gerado é direcionado para a turbina dos geradores elétricos, as quais controlam a pressão e a temperatura do vapor, permitindo que a usina ajuste o uso desse recurso conforme as demandas específicas de cada fase do processo. A cogeração de calor e eletricidade resultante é vital tanto para reduzir os custos operacionais quanto para ampliar a eficiência energética da usina, configurando-se como um elemento estratégico para a sustentabilidade econômica e ambiental do setor sucroalcooleiro.

A usina em questão possui um conjunto de geradores elétricos composto de três geradores elétricos, sendo divididos conforme esquema mostrado nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Diagrama de distribuição de vapor



Fonte: Autores

Figura 7 – Geradores de energia elétrica



Fonte: Autores

Analisando separadamente os geradores, o gerador 2 (Figura 8) recebe o vapor da linha principal de saída da caldeira. Preferencialmente este vapor apresenta 67kgf/cm² de pressão e 510° C de temperatura. Porém, ao longo do circuito ele perde parte da pressão e temperatura, chegando ao gerador 2 com 65kgf/cm² e 490° C. Sua turbina libera vapor de extração a uma pressão de 26.1kgf/cm² e uma temperatura de 400° C, o qual é direcionado para o gerador 1 e também para o processo de destilação, e vapor de escape a uma pressão de 1.86kgf/cm² e temperatura de 210° C, o qual

é direcionado para os processos de evaporação do caldo e, conseqüentemente, produção de açúcar.

Figura 8 – Gerador 2



Fonte: Autores

O gerador 1 recebe esse vapor de extração a uma pressão de 25kgf/cm² e temperatura de 400° C. Sua turbina redireciona o excedente como vapor de escape, a uma pressão de 1.92kgf/cm² e uma temperatura de 198°C. Este vapor de escape é direcionado para a mesma linha que alimenta os processos de evaporação e produção de açúcar.

Diante desse cenário, os geradores 1 e 2 são configurados conforme a necessidade de vapor dos processos, ou seja, quando a indústria se encontra em pleno funcionamento, ambos estão em operação com sua potência nominal. Contudo, há momentos em que o vapor de escape excede os 1,8 kgf/cm² por conta de paradas dos processos que diminuem o consumo, fazendo com que as válvulas de alívio que trabalham com esta faixa de pressão máxima abram gradativamente, liberando vapor para a atmosfera, aumentando o consumo de água desmineralizada na caldeira.

Como alternativa para que não ocorra uma baixa na produção e exportação de energia e perda de insumo industrial, o 3° gerador do

conjunto é iniciado. Sua turbina recebe vapor da linha de 67 kgf/cm² porém apresenta maior perda quando comparada a do gerador 2, chegando com cerca de 61.8 kgf/cm² e 490° C. O vapor sobressalente é direcionado para o cooler do gerador, onde é resfriado e direcionado de volta para a caldeira, formando um circuito fechado e diminuindo a perda de vapor para a atmosfera e contribuindo para geração total de energia elétrica.

Com relação a produção de energia do conjunto de geradores, o gerador 1 possui uma relação de 9,375 toneladas de vapor por MW/h produzido, podendo ser configurado para uma geração máxima de 15,5MW/h, consumindo 145,3 toneladas de vapor por hora.

Pela distribuição do vapor conforme a Figura 6, o gerador 2 possui uma relação de consumo de 9,158 toneladas de vapor para cada MW/h produzido, podendo ser configurado para uma geração máxima de 27,5MW/h. Nesta configuração, o consumo de vapor é de 251,62 toneladas de vapor hora.

Já o gerador 3 possui uma relação de consumo de 3,61 toneladas de vapor para cada MW/h produzido, sendo o mais econômico do conjunto. Possuindo uma capacidade máxima de 18MW/h, seu consumo máximo é de 64,98 toneladas de vapor hora.

A limitação de geração de energia elétrica está na operação da caldeira, que possui uma geração de vapor de 270 toneladas hora. Durante o período de safra com todos os equipamentos em pleno funcionamento, a caldeira trabalha com a média de 245 toneladas de vapor hora, os geradores 1 e 2 na barra com sua potência próxima da máxima, gerando uma média de 40MW/h.

A demanda energética da planta apresenta oscilações por fatores da própria produção como a diversidade da própria cana-de-açúcar e resíduos que chegam no conjunto dos caminhões, causando oscilações no torque dos motores do processo de extração do caldo, além de paradas de processos diminuindo o consumo em diferentes áreas. O Quadro 2 apresenta o consumo industrial em um momento de plena operação da planta.

Quadro 2 – Perfil de consumo industrial

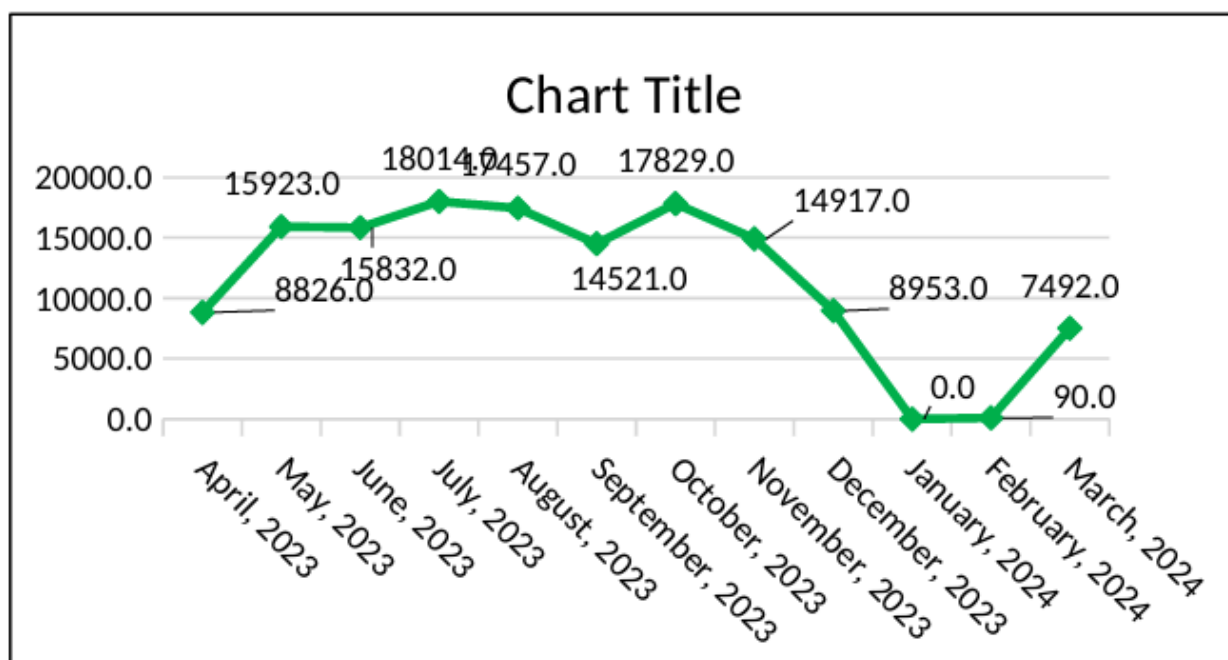
Área	Consumo (MW/h)
Desfibrador	3,59
Caldeira	2,77
Difusor/Secagem	1,30
Fábrica de açúcar	0,88
Destilaria/Fermentação	0,93
Tratamento de Caldo	0,72
Torres de Resfriamento	2,11
ETA/Incêndio	0,36
Recepção/Preparo	0,21
Serviços Aux. Caldeira	0,93
Rede Externa Captação	0,90
Total	14,7

Fonte: Autores

Realizando a média do consumo industrial durante a safra 23/24 temos o valor de 12,6 MW/h, ou seja, a geração total é mais que suficiente para atender a demanda energética da unidade, possibilitando que o excedente seja negociado com a concessionário de energia.

A Figura 9 apresenta os valores relacionados a exportação de energia durante a safra 23/24.

Figura 9 - Exportação de energia durante a safra 23/24:



Fonte: Autores

Os valores negociados com a concessionária referente ao preço do MWh não foram divulgados pela empresa, portanto utilizaremos o valor de mercado fornecido pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. O Quadro 3 apresenta estes valores:

Quadro 3 - Valor de mercado do MWh fornecido pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

Mês	Valor Mensal (R\$)
-----	--------------------

Abril/2023	R\$ 69,04
Maio/2023	R\$ 69,04
Junho/2023	R\$ 69,04
Julho/2023	R\$ 69,04
Agosto/2023	R\$ 69,04
Setembro/2023	R\$ 80,37
Outubro/2023	R\$ 74,84
Novembro/2023	R\$ 84,40
Dezembro/2023	R\$ 74,09
Janeiro/2024	R\$ 61,14
Fevereiro/2024	R\$ 61,20
Março/2024	R\$ 61,07

Fonte: CCEE (2024)

Estimando a receita total com base nos valores mínimos estabelecidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica no período da safra 2023/2024 e a exportação conforme Quadro 4, temos os seguintes valores:

Quadro 4 – Receita estimada da exportação

Mês	Receita
Abril/2023	R\$ 609.347
Maio/2023	R\$ 1.099.324
Junho/2023	R\$ 1.093.041

Julho/2023	R\$ 1.243.687
Agosto/2023	R\$ 1.205.231
Setembro/2023	R\$ 1.167.053
Outubro/2023	R\$ 1.334.322
Novembro/2023	R\$ 1.258.995
Dezembro/2023	R\$ 663.328
Janeiro/2024	R\$ 0
Fevereiro/2024	R\$ 5.508
Março/2024	R\$ 457.536

Fonte: Autores

Durante os meses de dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril a exportação apresenta valores diferentes por conta do período entressafras, no qual os geradores recebem as manutenções necessárias e passam por testes. Os valores relacionados a manutenção do conjunto durante a safra 23/24 são mostrados no Quadro 5.

O sistema autossuficiente mostrou adaptabilidade às variações sazonais comuns do setor sucroenergético durante o período de safra, possibilitando modificações dinâmicas na geração de energia de acordo com as necessidades específicas de cada etapa do processo industrial. Isso só foi possível devido à integração eficaz entre os geradores que operam em conjunto para suprir totalmente a demanda energética da usina e evitar desperdícios de insumos, maximizando o reaproveitamento de recursos no circuito fechado.

A cogeração comprova a eficiência do sistema, visto que atende a demanda interna e produz energia excedente para comercialização junto a concessionária, gerando receita que superou os gastos com a manutenção do conjunto de geradores, garantindo assim a viabilidade financeira. Portanto, a geração de energia elétrica através da biomassa na usina em questão mostrou-se de grande importância, diminuindo consideravelmente os custos operacionais, gerando receita e minimizando os impactos ambientais.

Quadro 5 – Custo manutenção dos geradores

Descrição	Valor
Manutenção preventiva dos retificadores e banco de baterias	R\$ 12.480,00
Peritagem dos geradores	R\$ 25.250,00
Manutenção dos disjuntores	R\$ 5.889,00
Videoscopia das turbinas	R\$ 3.553,00
Manutenção dos relés subestação	R\$ 27.626,58
Desmontagem, inspeção e montagem do redutor	R\$ 37.240,00
Manutenção em disjuntores	R\$ 22.094,73
Filtragem de óleo lubrificante - G3	R\$ 4.325,60
Filtragem de óleo lubrificante - G2	R\$ 4.325,60
Filtragem de óleo lubrificante - G1	R\$ 4.325,60
Manutenção em relés de proteção	R\$ 17.838,27
Torqueamento gerador	R\$ 9.207,00
Calibração manutenção e comissionamento de ativos	R\$ 1.960,00

Manutenção dos retificadores e banco baterias	R\$ 12.486,76
Manutenção dos redutores paralelos geradores	R\$ 34.221,00
Videoscopia em turbinas	R\$ 4.950,00
Peritagem motor e geradores	R\$ 35.250,00
Peritagem motor e geradores	R\$ 6.750,00
Peritagem motor e geradores	R\$ 8.500,00
Start-up redutores e geradores	R\$ 14.040,00
Torqueamento flange G3	R\$ 2.970,00
Total	R\$ 295.283,14

Fonte: Autores

Verifica-se que o custo da energia gerada internamente corresponde a menos de 10% da tarifa que a usina pagaria se adquirisse o mesmo montante da concessionária. Essa diferença expressiva resulta em uma economia estimada de R\$ 4,99 milhões ao longo da safra, considerando o consumo interno médio de 12,6 MW/h e 5 meses de operação contínua. A economia adicional gerada pela exportação do excedente — que não seria possível se a energia fosse adquirida externamente — amplia ainda mais o benefício financeiro do sistema de cogeração.

Esse resultado evidencia que, além de assegurar a autossuficiência energética e a estabilidade operacional, a geração própria a partir do bagaço de cana confere à usina uma vantagem competitiva significativa, protegendo-a da volatilidade das tarifas de energia elétrica e das bandeiras tarifárias.

A tarifa média de compra de energia elétrica para o segmento industrial na região Sudeste, conforme dados da ANEEL (2024) para o mesmo período, situou-se em torno de R\$ 380,00/MWh (impostos e encargos incluídos). O quadro 6 apresenta a comparação entre os dois valores.

Quadro 6 – Comparativo: custo de geração própria versus tarifa de compra

Indicador	Valor (R\$/MWh)
Custo de geração própria (CGP)	R\$ 35,36
Tarifa média de compra (concessionária)	R\$ 380,00
Economia por MWh gerado	R\$ 344,64

Fonte: Autores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo de caso demonstrou que a cogeração de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar, na usina sucroalcooleira localizada na região do Pontal do Triângulo Mineiro, é técnica e economicamente eficaz. A análise dos dados operacionais da safra 2023/2024 evidenciou que o sistema de cogeração, operando em ciclo *topping* com três turbogeradores, não apenas atendeu integralmente à demanda energética da planta (média de 12,6 MW/h), como também gerou excedente significativo para comercialização, atingindo picos de exportação superiores a 17 mil MWh em meses de plena operação.

Do ponto de vista técnico, a configuração adotada — com destaque para o gerador 3, que apresenta o menor consumo específico (3,61 t vapor/MW/h) — mostrou-se capaz de otimizar o aproveitamento do vapor, reduzindo perdas por abertura de válvulas de alívio e contribuindo para a estabilidade operacional. A estratégia de acionamento do terceiro gerador em momentos de redução do consumo industrial mostrou-se eficaz para minimizar desperdícios e maximizar a geração elétrica, comprovando a flexibilidade e a resiliência do sistema.

Sob a ótica econômica, a receita estimada com a exportação de energia, com base nos preços mínimos da CCEE, superou os custos totais com manutenção preventiva e corretiva do conjunto de geradores (R\$ 295.283,14), resultando em saldo positivo expressivo. Esse resultado reforça a viabilidade financeira do modelo de cogeração, mesmo em um cenário de preços conservadores, e evidencia que a comercialização do excedente energético constitui uma fonte adicional de receita considerável para a usina.

Além dos benefícios econômicos, o sistema contribui para a sustentabilidade ambiental ao aproveitar um resíduo (bagaço). A geração de bioeletricidade a partir de biomassa também fortalece a matriz energética brasileira, diversificando as fontes e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Como limitação do estudo, destaca-se a não divulgação pela empresa dos preços efetivamente praticados nas negociações de energia, o que exigiu o uso de valores de referência de mercado. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a incorporação de análises de sensibilidade considerando diferentes cenários de preços e a inclusão de parâmetros como o custo de oportunidade da biomassa

e a contabilização de créditos de carbono, o que poderia ampliar a precisão da avaliação econômica e ambiental.

Em síntese, a cogeração de energia elétrica na usina analisada mostrou-se uma solução madura, eficiente e rentável, alinhada às diretrizes de eficiência energética, responsabilidade ambiental e competitividade industrial, consolidando-se como prática estratégica para o setor sucroenergético brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANFAVEA- Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. 2024. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/>. Acesso em 13 ago. 2024.

ANP-Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Painel Dinâmico dos produtores de etanol.** 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados?b_start:int=30. Acesso em 05 de ago. 2024.

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL N° 1.031, de 26 de julho de 2022.** 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221031.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2025.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifas de energia elétrica – segmento industrial (Sudeste).** Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/tarifas>. Acesso em: 27 abr. 2026.

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, Mar. 2015, p. 238-246. Disponível em: <https://fatece.edu.br/arquivos/arquivos-revistas/empreendedorismo/volume4/12.pdf>. Acesso em 25 out. 2024.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 13 (NR-13):** caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento. Brasília, DF: MTE, Redação dada pela Portaria MTb nº 1.846, de 01 de julho de 2022. Disponível em: [URL]. Acesso em: 02 maio 2026.

CANEPPELE, F. de L. et. al. Cogeração de energia em usina sucroalcooleira almejando sustentabilidade. **Expressa Extensão**, v. 25, n. 3, p. 45-59, 30 ago. 2020. Disponível em <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/expressaextensao/article/view/18256/11795>. Acesso em: 10 de out. 2024.

CASADO, L. D.; BARBOSA, A. T. R. Evaluation of energy efficiency in sugar cane bass burning processes in sugar and alcoholic plants. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa /MG, BR, v. 10, n. 2, p. 16962, 2024. DOI: 10.18540/jcecvl10iss2pp16962. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/16962>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Painel de preços.** 2024. Disponível em <https://www.ccee.org.br/web/guest/precos/painel-precos>. Acesso em 20 out. 2024.

COELHO, S. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o estado de São Paulo.** Tese. (Doutorado em Energia) – Instituto de Eletrotécnica

e Energia, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <https://www.iee.usp.br/producao/1999/teses/suani.PDF>. Acesso em: 20 dez. 2024.

FERNANDES, L. C. de A. **Viabilidade Técnico-Econômica De Geração De Energia Elétrica Na Entressafra De Uma Usina De Açúcar E Álcool**. 2018. 75f. Dissertação (Mestrado profissional em energia da biomassa) - Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2018. Disponível em <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/5347>. Acesso em: 12 de dez. 2024.

MAPA-Ministério da Agricultura e Pecuária. **Acompanhamento da Produção Sucroalcooleira**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/acompanhamento-da-producao-sucroalcooleira>. Acesso em 07 de dez. 2024.

OLIVEIRA, D. J. **Análise e otimização de uma planta industrial de cogeração de energia a partir de biomassa de cana-de-açúcar**. 2023. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36923>. Acesso em: 05 de nov. 2024.

PESSINE, R.T. **Cogeração: impactos positivos e adversos no meio ambiente**. Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP. 2008. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/10202700/>. Acesso em: 06 de out. 2024.

PORTAL SOLAR. **Geração distribuída de energia (GD): o que é, regras, benefícios e como fazer parte.** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/geracao-distribuida-de-energia.html>. Acesso em 02 set. 2024.

REZENDE, Bianca Xavier. **Estudo da viabilidade da utilização de biomassa para geração de energia elétrica.** 2018. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/836>. Acesso em: 02 de dez. 2024.

RIBEIRO, K. V. R. **Revisão bibliográfica sobre a viabilidade socioeconômica da implantação da cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro do Brasil.** 2023. 83f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Goiás, Jataí, 2023. <http://repositorio.ifg.edu.br:8080/handle/prefix/1565>. Acesso em: 03 out. 2024.

SANTOS, Michelle de Araújo. **Cogeração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar: estudo de caso na Usina Monte Alegre/PB.** 98 f. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/52954>. Acesso em: 12 out. 2024.

SANTOS, T. A. R. **Serviços de energia aplicados à cogeração**. 2010. 276 f. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrónica e de Computadores Major Energia- Universidade do Porto, Porto-Portugal. Disponível em <http://hdl.handle.net/10216/59307>. Acesso em: 06 de nov. 2024.

SILVA, J. M. M.; NASCIMENTO NETO, A. P. Estudo da cogeração de energia elétrica por turbogeradores a vapor – estudo de caso. **Engenharia Elétrica**, Volume 27 - Edição 128/NOV 2023 / 27/11/2023. REGISTRO DOI: [10.5281/zenodo.10210224](https://doi.org/10.5281/zenodo.10210224). Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados?b_start:int=30. Acesso em 12 de set. 2024.

TURBIVAP. **Turbina a vapor de condensação**. 2020. Disponível em: <https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-condensacao/>. Acesso em 08 nov. 2024.

WÓRTICE ENERGIA. **Turbinas a Vapor de Contrapressão**. 2024. Disponível em: <https://wortice.com.br/turbinas-a-vapor-de-contrapressao>. Acesso em 13 out. 2024.

¹ Engenheiro Eletricista, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Ituiutaba, MG, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Engenheiro Eletricista, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Ituiutaba, MG, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Docteur en Sciences Appliquées, Université de Liège (Ulg), Liège, Wallonie, Belgique. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-8930-1349>

⁴ Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-0562-528X>