

COGERAÇÃO NO SETOR SUCROALCOOLEIRO A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR EM UMA USINA DO INTERIOR DE SÃO PAULO

(Casa de Força/ Turbogenerador)

Diego Henrique Viegas Fogari (Centro Universitário da Fundação Hermínio Ometto)
diihfogari@alunos.fho.edu.br diihfogari@gmail.com

Prof.Dr. Daniel Augusto Paggi Ferreira (Centro Universitário da Fundação Hermínio Ometto) danielferreira@fho.edu.br

RESUMO

Como uma alternativa sustentável e econômica, as usinas do setor sucroalcooleiro no Brasil apostaram na redução da dependência de combustíveis fósseis utilizando a cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar, como uma geração de energia limpa. Este estudo de caso analisa o processo de cogeração de energia elétrica na Usina São João, em Araras, SP, abordando o sincronismo com a rede elétrica da concessionária ELEKTRO, os avanços tecnológicos da Indústria 4.0 e os benefícios econômicos e ambientais. A modernização da usina, com investimento de R\$ 82 milhões para a Caldeira 2 e o Gerador 5, elevou a eficiência energética, permitindo autossuficiência e a comercialização de excedentes de até 12 MW, reforçando o papel do setor sucroalcooleiro na diversificação da matriz energética nacional. O retorno do investimento, estimado em 3,3 anos, concretizou-se em 5,9 anos. O trabalho destaca a contribuição da cogeração para a mitigação das mudanças climáticas, com redução de emissões de gases de efeito estufa, e aborda a gestão das demandas de importação e exportação de energia, incluindo penalidades por ultrapassagem dos limites contratados com a concessionária.

Palavras-chave: Cogeração de energia; bagaço de cana-de-açúcar; sustentabilidade; Indústria 4.0; eficiência energética.

1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções energéticas sustentáveis, energia limpa não é apenas uma tendência, mas uma necessidade global urgente. Diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, pelo esgotamento iminente dos combustíveis fósseis e pela essencial segurança energética, o mundo se volta para alternativas mais limpas e eficientes. Nesse cenário, o Brasil se destaca. Com sua vasta riqueza natural e uma forte vocação agroindustrial, nosso país tem sido pioneiro na utilização da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar como uma fonte renovável de energia. O setor sucroalcooleiro, em particular, desempenha um papel chave na diversificação da matriz energética nacional, especialmente pela cogeração de energia a partir desse subproduto (Lora, 2016). Essa prática não só otimiza o uso da biomassa, mas também contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, fortalecendo a sustentabilidade ambiental do Brasil (Cavalcante et al., 2019).

Historicamente, a geração de eletricidade sempre evoluiu acompanhando o crescimento da demanda e o surgimento de novas tecnologias. Desde a Revolução Industrial, nossa sociedade passou a depender de fontes como carvão, petróleo e gás natural. No Brasil, a abundância de recursos hídricos consolidou a hidreletricidade como a principal matriz. Contudo, os impactos ambientais, as variações climáticas e a crescente necessidade de diversificação impulsionaram o desenvolvimento de fontes alternativas, como a biomassa da cana-de-açúcar (Reis et al., 2022). Um marco importante foi a crise do petróleo na década de 1970, que, junto às preocupações ambientais, estimulou investimentos em energias renováveis. Isso levou à criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975, iniciativa que fomentou a produção de etanol e incentivou o uso do bagaço da cana na geração de energia, promovendo a autossuficiência das usinas e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (Macedo et al., 2015). Desde então, a cogeração tem se consolidado como uma solução eficiente para a geração descentralizada de eletricidade, contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico nacional e para a sustentabilidade do nosso setor energético.

A cogeração no setor sucroalcooleiro é um processo engenhoso que aproveita o bagaço da cana-de-açúcar, um subproduto da moagem, como biomassa para gerar energia térmica e elétrica. Tudo começa com a queima do bagaço em caldeiras de alta pressão, que produzem vapor. Esse vapor, por sua vez, aciona turbinas e geradores que convertem a energia mecânica em eletricidade. E o melhor: o vapor residual pode ser reaproveitado

em outros processos industriais, elevando a eficiência energética e reduzindo desperdícios (Silva, 2018). Esse modelo se destaca pela sua alta eficiência energética, pois permite o aproveitamento simultâneo de calor e eletricidade. Diferentemente das termelétricas convencionais, que costumam dissipar boa parte da energia térmica, a cogeração maximiza o uso da biomassa, resultando em maior rendimento e menor impacto ambiental. Essa eficiência é vital para a competitividade do setor sucroalcooleiro e para a consolidação da biomassa na matriz energética brasileira (Ferreira & Almeida, 2021).

Nos últimos anos, a Indústria 4.0 tem promovido transformações significativas no setor energético, integrando tecnologias digitais, automação avançada e inteligência artificial aos processos produtivos. No setor sucroalcooleiro, essas inovações estão revolucionando a cogeração ao permitir o monitoramento preciso das caldeiras, turbinas e geradores, além de otimizar a gestão da biomassa e a distribuição da eletricidade (Pereira & Souza, 2021). A digitalização possibilita a manutenção preditiva dos equipamentos, reduzindo falhas operacionais e custos. Sensores inteligentes e sistemas de controle remoto garantem maior estabilidade na geração de energia, enquanto algoritmos de inteligência artificial analisam dados em tempo real para aprimorar o desempenho da cogeração. Assim, a modernização tecnológica não apenas melhora a eficiência do sistema, mas também fortalece a segurança energética e a competitividade do setor sucroalcooleiro (Santos & Oliveira, 2022).

A cogeração a partir da biomassa oferece múltiplos benefícios ambientais e econômicos. O uso combinado de calor e eletricidade assegura uma eficiência energética superior aos sistemas tradicionais. A autossuficiência das usinas reduz custos operacionais, e a substituição de combustíveis fósseis pela biomassa contribui diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às metas globais de descarbonização. Além disso, o excedente de eletricidade pode ser comercializado no mercado livre, gerando uma receita adicional para as usinas (Ribeiro et al., 2021). Atualmente, a biomassa do bagaço da cana-de-açúcar representa cerca de 60,1% da capacidade instalada de cogeração no Brasil, o que sublinha sua importância para a matriz energética nacional (Jornal Cana, 2023).

Diante desse cenário promissor, este estudo tem como objetivo principal analisar a geração de eletricidade a partir do bagaço da cana-de-açúcar na Usina São João, localizada em Araras, no interior de São Paulo. Serão abordados aspectos técnicos como os equipamentos utilizados, o sincronismo com a rede elétrica da concessionária

ELEKTRO e os impactos da modernização tecnológica na eficiência operacional do sistema. Para isso, nossa pesquisa será qualitativa e descritiva, baseada em revisão bibliográfica e, crucialmente, em um estudo de caso na Usina São João. Nele, analisaremos detalhadamente seus processos de cogeração, os investimentos realizados, as tecnologias empregadas, os desafios enfrentados na operação do sistema e as implicações das penalidades por ultrapassagem dos limites contratados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evolução da Geração de Energia e a Biomassa como Alternativa Sustentável

A história da geração de energia elétrica é marcada por uma constante adaptação às inovações e à crescente demanda global. Desde a dependência pré-industrial de fontes como madeira, hídrica e eólica, a Revolução Industrial trouxe o carvão mineral como principal motor de crescimento (Reis et al., 2022). No século XX, o petróleo e o gás natural consolidaram-se, mas seu uso em larga escala gerou impactos ambientais severos, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o agravamento das mudanças climáticas (Silva & Oliveira, 2020). No Brasil, a abundância hídrica levou à consolidação da hidroeletricidade como matriz dominante. Contudo, a vulnerabilidade a períodos de seca e os impactos socioambientais das grandes usinas impulsionaram a busca por fontes complementares e sustentáveis (Macedo et al., 2015).

Nesse contexto, a biomassa emerge como uma alternativa renovável e estratégica. Definida como qualquer matéria orgânica de origem vegetal ou animal passível de conversão energética (englobando resíduos agrícolas, florestais, industriais e subprodutos da agroindústria), a biomassa pode ser convertida por processos como combustão direta, gaseificação e biodigestão anaeróbia (Ferreira & Almeida, 2021). Sua relevância reside na capacidade de reduzir a emissão líquida de CO₂, uma vez que o carbono liberado na combustão foi previamente absorvido por plantas via fotossíntese. Isso contribui para a mitigação das mudanças climáticas, diferentemente dos combustíveis fósseis, que adicionam carbono na atmosfera de forma cumulativa (Ribeiro et al., 2021).

2.2 O Setor Sucroalcooleiro e a Geração de Energia a partir da Biomassa

No Brasil, o setor sucroalcooleiro é um exemplo da utilização da biomassa para geração de energia. A produção de açúcar e etanol gera vastas quantidades de bagaço de cana-de-

açúcar, um subproduto valioso que, ao ser queimado em caldeiras, gera vapor e eletricidade. Esse processo, conhecido como cogeração, permite que as usinas atinjam a autossuficiência energética e, muitas vezes, exportem o excedente para o Sistema Interligado Nacional (SIN) (Cavalcante et al., 2019).

Além do bagaço, a palha da cana-de-açúcar tem ganhado destaque. A mecanização da colheita viabilizou a coleta e o aproveitamento dessa palha para a geração de eletricidade, ampliando significativamente a contribuição do setor para a matriz energética nacional. Estudos sugerem que a utilização combinada de bagaço e palha poderia dobrar a produção de eletricidade, fortalecendo a competitividade e sustentabilidade do setor (Pereira & Souza, 2021).

2.3 Benefícios, Desafios e Impacto da Biomassa

A geração de energia a partir da biomassa, especialmente via cogeração no setor sucroalcooleiro, apresenta uma série de benefícios substanciais, mas também enfrenta desafios inerentes à sua implementação e operação. A Figura 1 e a Figura 2 sintetizam esses aspectos, oferecendo uma visão integrada dos impactos ambientais, econômicos e sociais.

Figura 1: Benefícios e Impactos da Biomassa e da Cogeração no Setor Sucroalcooleiro

Categoria	Impactos da Biomassa da Cana	Vantagens da Cogeração e seu Efeito
Ambientais	- Neutralidade de carbono (CO ₂ reabsorvido)	- Redução de emissões vs. fósseis
	- Redução de resíduos agrícolas	- Aproveitamento integral do bagaço
	- Menor impacto por descarte inadequado	- Menor pegada ecológica operacional
Econômicos	- Redução de importação de combustíveis	- Autossuficiência e redução de custos
	- Diversificação de receitas	- Receita com excedentes comercializáveis
	- Competitividade em renováveis	
Sociais	- Geração de empregos rurais	- Empregos especializados
	- Desenvolvimento tecnológico	- Desenvolvimento regional integrado
	- Qualificação da mão de obra	- Infraestrutura local sustentável
Principais Desafios	- Logística de coleta/transporte	- Altos custos iniciais
	- Necessidade de investimento em tecnologia	- Complexidade de sincronização com a rede
	- Competitividade com outras fontes	- Dependência de políticas de incentivo

Fontes: O Autor.

Figura 2 – Impactos da Biomassa e da Cogeração no Setor Sucroalcooleiro

Categoria	Impactos Positivos	Impactos Negativos / Desafios
Ambiental	- Neutralidade de carbono (ciclo fechado de CO ₂) e redução de GEE (80-90% vs. fósseis)	- Emissões de material particulado e geração de cinzas (2-5%)
	- Redução de resíduos agrícolas (até 90%) e preservação de solos (vinhaça)	- Competição por uso da terra e risco de contaminação hídrica
	- Redução de consumo hídrico (até 30% vs. termelétricas)	- Necessidade de áreas de estocagem e poluição sonora
Econômico	- Economia de importação de fósseis (até R\$ 1,5 bil/ano) e R\$ 8,2 bil/ano em receitas	- Custos logísticos elevados (R\$ 35-50/ton)
	- Redução de custos energéticos (15-30%) e valorização de subprodutos/ativos ociosos	- Alto investimento inicial (R\$ 3-5 mil/MW) e sazonalidade da produção
	- Venda de energia (R\$ 120-180/MWh)	- Dependência de subsídios/incentivos e leilões da ANEEL
Social	- Geração de empregos (1/500 ton; especializados 2,5x maior remuneração)	- Trabalho sazonal e exposição ocupacional a poeiras/calor
	- Desenvolvimento tecnológico (mais de 45 tecnologias nacionais)	- Escassez de mão de obra técnica especializada
	- Inclusão energética rural e estímulo a indústrias complementares	- Potenciais conflitos fundiários e pressão sobre infraestrutura urbana

Fontes: O Autor.

2.5 A Cogeração no Setor Sucroalcooleiro: Processo, Modernização e Perspectivas

A cogeração é um processo altamente eficiente, capaz de gerar eletricidade e calor útil simultaneamente a partir de uma única fonte de combustível. No setor sucroalcooleiro, essa maravilha da engenharia acontece pela combustão do bagaço de cana em caldeiras de alta pressão, produzindo vapor superaquecido que movimenta turbinas a vapor e aciona geradores elétricos (Jornal Cana, 2023). O grande diferencial é que o vapor residual pode ser reaproveitado em diversas etapas da produção industrial, como a evaporação do caldo de cana, maximizando a eficiência do sistema. As caldeiras modernas operam sob condições elevadas de pressão e temperatura, permitindo um aproveitamento otimizado da energia e a redução de impactos ambientais (Ferreira & Almeida, 2021).

O avanço da Indústria 4.0 tem impulsionado ainda mais a modernização do setor. Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e big data permitem o monitoramento preciso de variáveis operacionais, ajustando o processo em tempo real para maximizar a eficiência energética (Pereira & Souza, 2021). A análise preditiva, baseada em dados de sensores inteligentes, é um divisor de águas, ajudando a antecipar falhas e evitar paradas inesperadas. Além disso, a digitalização facilita a integração com redes elétricas inteligentes (smart grids), otimizando a distribuição e a comercialização do excedente de energia (Silva et al., 2020).

As perspectivas futuras para a biomassa no Brasil são animadoras. O aprimoramento contínuo das caldeiras, turbinas e sistemas de automação promete um aproveitamento

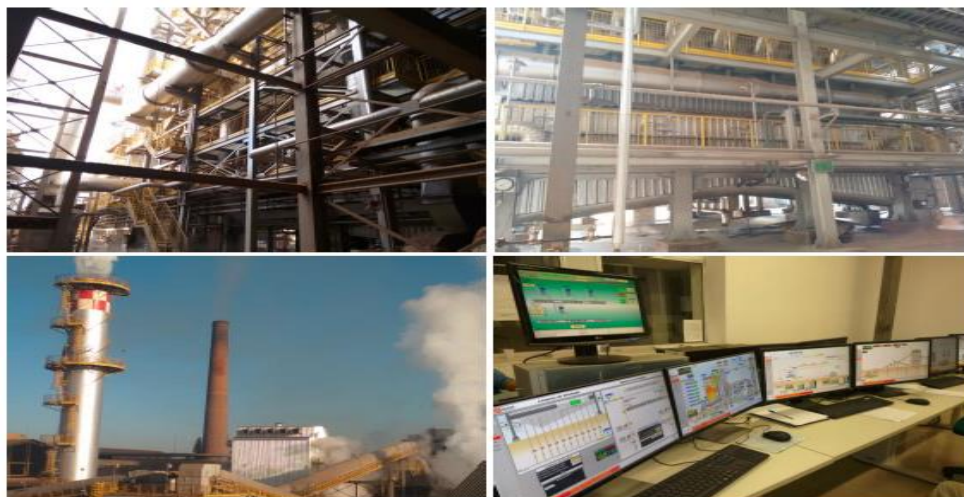
energético ainda maior do bagaço e da palha da cana. Políticas públicas como o RenovaBio e os leilões de energia renovável da ANEEL são cruciais, incentivando novos investimentos e ampliando a participação da biomassa na matriz energética. Isso fortalece nossa segurança energética e reduz as emissões de GEE (Silva & Oliveira, 2020). Essa modernização e integração com smart grids devem consolidar o Brasil como um líder global na produção de energia sustentável a partir da biomassa.

2.6 Equipamentos e Controle Essenciais para a Cogeração

Um sistema de cogeração eficiente, como o da Usina São João, depende de equipamentos de alta tecnologia e de um controle preciso para garantir a geração de energia e a interconexão segura com a rede elétrica.

As caldeiras de alta pressão são, sem dúvida, os pilares da cogeração, transformando a energia química do bagaço de cana em vapor superaquecido. Na Usina São João, por exemplo, as caldeiras da Caldema operam a 45 Kgf/cm², projetadas para alta eficiência e durabilidade. O controle da alimentação do bagaço por esteiras dosadoras e analisadores de umidade assegura uma queima contínua e eficaz.

Figura 3 - Caldeira 200 t/h – 45 kgf/cm² USJ – Araras – SP

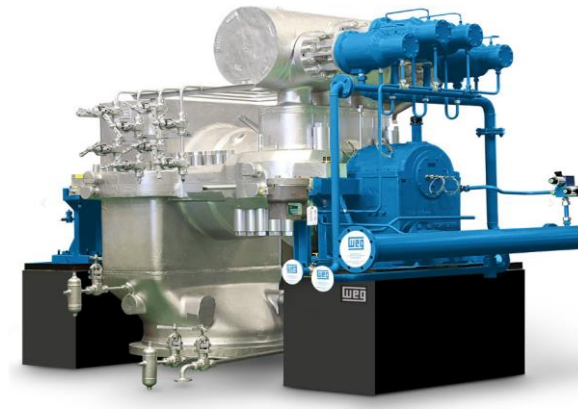


Fonte: O Autor

A turbina a vapor, como o modelo TM 35000A da TGM, recebe esse vapor e o transforma em energia mecânica, fazendo suas palhetas girarem e acionando o eixo conectado ao

gerador. Sistemas de controle de vazão e válvulas de segurança regulam sua velocidade e pressão para uma operação dentro dos limites de projeto (TGM, 2023).

Figura 4 - Turbina a vapor TGM, linha TM-A



Fonte: Site WEG/TGM

Em seguida, o gerador elétrico, como o modelo de 31.250 kVA da WEG, converte a energia mecânica da turbina em eletricidade. Ele opera em regime síncrono, mantendo a frequência em 60 Hz – um detalhe crucial para a estabilidade da rede. A capacidade máxima do Gerador 5, por exemplo, é de 28,75 MW, com fator de serviço de 0,92.

Figura 5 - Turbogeneradores Linha ST40 – Horizontais



Fonte: Site WEG/TGM

Figura 6 - Conjunto Turbogenerador WEG/TGM USJ – Araras -SP



Fonte: O Autor

Para que todo esse sistema funcione em harmonia e segurança, o controle e supervisão são vitais. O supervisório Siemens SIMATIC atua como o "cérebro", coletando dados de sensores para que os operadores monitorem e ajustem parâmetros essenciais, como temperaturas e pressões, e até acionem equipamentos remotamente (SIEMENS, 2023).

Figura 7 - SIMATIC S7-300



Fonte: Site SIEMENS

A interligação com a concessionária ELEKTRO exige um controle rigoroso. Os relés de proteção da Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), instalados nos painéis da casa de força e subestação, monitoram o sistema em tempo real, detectando e isolando falhas rapidamente para proteger a instalação (SEL, 2023).

Figura 8 - Relé SEL-735



Fonte: Site SEL

Figura 9 - SEL-751A Feeder Protection Relay



Fonte: Site SEL

O sincronismo e paralelismo são processos essenciais para integrar a energia gerada à rede elétrica nacional. Controladores como o MSLC e DSLC da WOODWARD garantem que o gerador opere em perfeita sincronia com a rede (ajustando tensão, frequência e ângulo de fase) antes da conexão, e gerenciam a carga automaticamente (WOODWARD, 2023).

Figura 8 - DSLC



DSLC é um controlador digital individual para geradores

Fonte: Site WOODWARD

Figura 9 - MSLC



O MSLC é utilizado principalmente como controlador mestre, gerenciando múltiplos geradores em paralelo

Fonte: Site WOODWARD

O sistema de excitação UNITROL da ABB complementa esse controle, ajustando a corrente no rotor do gerador para manter a tensão estável e garantir a qualidade da energia (ABB, 2023).

Figura 10 - Regulador Automático de Tensão UNITROL 1020



Fonte: Site ABB

Por fim, o sincronoscópio WEG permite ao operador verificar visualmente o momento exato de conectar o gerador à rede (WEG, 2023).

Figura 11 – Sincronoscópio



Fonte: Site WEG

A energia gerada é então enviada à subestação da usina, onde é elevada para alta tensão por transformadores para facilitar o transporte. Painéis de medição e proteção com relés SEL garantem a qualidade e a segurança da energia exportada, monitorando potência reativa e ativa e assegurando que o sincronismo e o paralelismo estejam perfeitos (ANEEL, 2022). Esse controle preciso, monitorado por sistemas de automação, garante que a produção da usina seja eficiente, estável e em conformidade com as exigências da ANEEL (Cavalcante et al., 2019).

Figura 12 - Subestação Elétrica de Transmissão 13,8 kV



Fonte: O Autor

2.12 Sincronismo, Paralelismo e Exportação de Energia

O sincronismo e o paralelismo são processos essenciais para garantir a integração da energia gerada nas usinas ao sistema elétrico nacional. O sincronismo envolve o ajuste de tensão, frequência e fase dos geradores internos da usina para que sejam compatíveis com a rede elétrica, evitando oscilações que possam afetar a estabilidade do sistema (Pereira & Souza, 2021). O paralelismo permite a operação simultânea de vários geradores, otimizando a distribuição da carga e evitando sobrecargas. A exportação de excedente energético, possibilitada pela cogeração, contribui para a diversificação da matriz energética nacional e a redução da dependência de fontes fósseis (Ferreira & Almeida, 2021).

2.13 Sincronismo com a Rede da Concessionária

O sincronismo com a rede da concessionária é crucial para garantir a estabilidade do fornecimento de energia elétrica, tanto para o consumo interno da usina quanto para a exportação para a rede. O controle preciso do sistema de geração, monitorado e ajustado por sistemas de automação, assegura que a produção de energia da usina seja eficiente e estável, respeitando os parâmetros técnicos exigidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e garantindo a continuidade do fornecimento (Cavalcante et al., 2019).

3. METODOLOGIA

O presente estudo se configura como uma pesquisa qualitativa e descritiva. A abordagem qualitativa permite a análise aprofundada de fenômenos complexos, como os processos de cogeração e as implicações regulatórias no setor sucroalcooleiro. A natureza descritiva, por sua vez, possibilita a caracterização detalhada das operações da Usina São João e das normas que regem a importação e exportação de energia.

A pesquisa foi embasada em uma revisão bibliográfica abrangente, consultando livros técnicos, artigos científicos e relatórios de órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Adicionalmente, para aprofundar a análise e trazer dados práticos, foi realizado um estudo de caso na Usina São João de Araras, São Paulo. A coleta de dados para o estudo de caso incluiu informações fornecidas pela própria usina, referentes ao seu perfil operacional, investimentos realizados, capacidades de geração e contratos de energia.

3.1 Dados do Estudo de Caso – Usina São João de Araras (SP)

A Usina São João de Araras - SP, antes da ampliação em 2015, operava com quatro geradores de menor porte e sete caldeiras de 21 bar, destinando a cogeração exclusivamente para o consumo interno, sem exportação de energia. A partir de 2015, a usina realizou um Projeto de Usina Termoelétrica (UTE) de grande envergadura, que incluiu a implantação da Caldeira 2 e do Gerador 5. O investimento total desse projeto alcançou R\$ 82 milhões, englobando não apenas a caldeira e o gerador, mas também a Estação de Tratamento de Água e Efluentes (ETALG) parcial e outros investimentos em aspersão/multijato e fábrica. O cálculo do payback desse investimento foi mensurado em torno de 3,3 anos, e se pagou em 5,9 anos na realidade.

Atualmente, a capacidade de exportação da Usina São João está limitada a 12 MW. O Gerador 5, um componente central da ampliação, possui capacidade de 31.250 kVA, com um fator de serviço de 0,92, resultando em uma capacidade máxima de 28,75 MW. A usina, portanto, tem uma capacidade instalada que ultrapassa seu limite de exportação contratual, indicando uma margem operacional. Os valores do contrato de exportação de energia, incluindo a remuneração por MWh, a vigência contratual e o volume exportado anualmente desde a instalação do Gerador 5, são calculados de acordo com os dados oficiais do site da CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das penalidades por ultrapassagem dos limites de energia na Usina São João de Araras (SP) revela um cenário complexo, influenciado pela regulamentação da ANEEL e pela dinâmica operacional da usina.

4.1 Penalidade por Ultrapassagem da Demanda de Importação (Consumo)

A ultrapassagem da demanda de importação representa o risco financeiro mais imediato e direto para a Usina São João, especialmente em situações de desarme do gerador durante a safra ou picos de consumo na entressafra. A base legal para essas penalidades é o Art. 301 da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021. A usina possui uma demanda máxima contratada para importação de 5 MW (5.000 kW) para a importação de energia da rede. A ANEEL estabelece uma tolerância de 5% sobre a demanda contratada antes da aplicação de multas. Para a Usina São João, com 5.000 kW contratados, essa tolerância corresponde a 250 kW, elevando o limite tolerado para 5.250 kW. A tarifa de ultrapassagem, aplicada sobre o excedente da demanda que ultrapassa essa tolerância, pode atingir até três vezes o valor da tarifa de demanda regular da modalidade tarifária da usina. Usinas de grande porte como a São João tipicamente operam na Tarifa Horária Azul da Elektro (Neoenergia Elektro), que diferencia os valores de demanda por período de ponta e fora de ponta.

Exemplos de Tarifas de Demanda da Elektro (valores aproximados para 2024/2025 –

Observação: estes valores são ilustrativos para simulação, pois não foram diretamente referenciados em fontes bibliográficas nos anexos fornecidos):

- Tarifa de Demanda Fora de Ponta (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição - TUSD Demanda Fora de Ponta): R\$ 17,05/kW
- Tarifa de Demanda na Ponta (TUSD Demanda Ponta): R\$ 28,84/kW

Cálculo Simulador de Multa para a Usina São João: Considerando um cenário hipotético em que a Usina São João, devido a um desarme inesperado do gerador, eleve sua demanda para 6 MW (6.000 kW), excedendo em 1 MW o limite contratado.

- Demanda Medida: 6.000 kW
- Excedente Sujeito à Multa (acima da tolerância de 5.250 kW): $6.000 \text{ kW} - 5.250 \text{ kW} = 750 \text{ kW}$

Cálculo da Multa:

- Se o Estouro ocorrer no Período Fora de Ponta:
 - Tarifa de Ultrapassagem Fora de Ponta: $\text{R\$ } 17,05/\text{kW} \times 3 = \text{R\$ } 51,15/\text{kW}$
 - Multa Aplicada: $750 \text{ kW} \times \text{R\$ } 51,15/\text{kW} = \text{R\$ } 38.362,50$
- Se o Estouro ocorrer no Período de Ponta:
 - Tarifa de Ultrapassagem na Ponta: $\text{R\$ } 28,84/\text{kW} \times 3 = \text{R\$ } 86,52/\text{kW}$
 - Multa Aplicada: $750 \text{ kW} \times \text{R\$ } 86,52/\text{kW} = \text{R\$ } 64.890,00$

O impacto desses valores é significativo, evidenciando a criticidade de gerenciar e mitigar os riscos de desarme do gerador, especialmente durante o período de ponta, onde as penalidades se tornam substancialmente mais onerosas. A usina necessita de sistemas de monitoramento e controle robustos, bem como planos de contingência, para atenuar esses riscos.

4.2 Implicações da Ultrapassagem da Demanda de Exportação (Injeção na Rede)

A dinâmica de injeção de energia da Usina São João, com volumes entre 8 MW/h e 11,5 MW/h, próximos ao limite contratual de 12 MW, exige uma análise diferenciada das "penalidades". Para Autoprodutores de Energia (APE) como a Usina São João, as regras são estabelecidas por um Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) firmado com a Elektro. Este contrato define as condições de acesso, o uso da rede e as responsabilidades de ambas as partes. Diferente da demanda de consumo, não existe uma "tarifa de ultrapassagem" triplicada para a injeção. A ultrapassagem da demanda de injeção contratada (12 MW) é tratada, sobretudo, como um descumprimento contratual. Embora a REN ANEEL nº 1.000/2021 preveja a contratação separada de Montante de Uso do Sistema de Distribuição (MUSD) para geração, a tolerância para a ultrapassagem da demanda de injeção é consideravelmente menor, geralmente 1%. Para a Usina São João, isso significa uma tolerância de 120 kW (1% de 12.000 kW), com o limite tolerado atingindo 12.120 kW.

Natureza da Penalidade para APE/PIE: A penalidade por exceder a demanda de injeção estabelecida no CUSD (Contrato de Uso do Sistema de Distribuição) é, geralmente, uma multa específica prevista no próprio contrato e alinhada às normas setoriais. Essa multa visa compensar a distribuidora por eventuais custos adicionais decorrentes de uma injeção

não planejada ou excedente, que poderia afetar a estabilidade da rede, a qualidade da energia ou exigir investimentos em infraestrutura. A base de cálculo pode ser um valor fixo por kW ultrapassado ou uma porcentagem da demanda excedente aplicada sobre a TUSDG (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição de Geração), conforme a permissão da ANEEL nos termos contratuais.

Simulação de Estouro de Demanda de Exportação: Assumindo um cenário em que a Usina São João atinja 12,5 MW (12.500 kW) de exportação em um pico de geração, superando o limite contratual de 12 MW:

- Demanda Medida de Exportação: 12.500 kW
- Excedente Sujeito à Multa (acima da tolerância de 12.120 kW): 12.500 kW - 12.120 kW = 380 kW

Valor Ilustrativo da Multa (baseado em um exemplo hipotético – Observação: o valor real e a metodologia exatos dessa multa estão previstos no CUSD da Usina São João com a Elektro e não foram diretamente referenciados em fontes bibliográficas nos anexos fornecidos):

- Se a multa contratual for, por exemplo, R\$ 20,00/kW para cada kW ultrapassado acima da tolerância:
 - Multa Aplicada: $380 \text{ kW} \times \text{R\$ } 20,00/\text{kW} = \text{R\$ } 7.600,00$

É imperativo ressaltar que o valor exato e a metodologia de cálculo dessa multa estarão detalhados no CUSD (Contrato de Uso do Sistema de Distribuição) da Usina São João com a Elektro.

Consequências Adicionais da Ultrapassagem de Exportação: Ultrapassagens consistentes da demanda de exportação podem levar a Elektro a exigir a renegociação do CUSD. Tal renegociação pode implicar a necessidade de obras de reforço na rede elétrica para acomodar o maior volume de injeção, cujos custos podem ser totais ou parcialmente alocados à Usina, conforme as diretrizes da ANEEL. Qualidade da Energia: A injeção de energia que não esteja em conformidade com os padrões de qualidade (causando flutuações de tensão, distorções harmônicas etc.) pode resultar em multas por não conformidade com os indicadores de qualidade da energia estabelecidos pela ANEEL, independentemente dos limites de potência.

5. RECOMENDAÇÕES E ESTRATÉGIAS PREVENTIVAS PARA A USINA SÃO JOÃO

Para mitigar os riscos financeiros e operacionais associados às penalidades, a Usina São João deve adotar uma abordagem estratégica e proativa:

- **Monitoramento Energético Rigoroso:** É fundamental implementar e utilizar sistemas de gestão de energia (EMS/SCADA) que permitam o acompanhamento em tempo real da demanda consumida e da potência injetada. Configurar alertas para notificar a equipe sobre a aproximação dos limites contratuais é crucial para ações preventivas.
- **Gestão Ativa de Cargas e Geração:**
 - **Importação (Entressafra e Desarmes):** Desenvolver e aplicar estratégias de gerenciamento de carga para a entressafra, visando evitar picos de consumo. Em situações de desarme do gerador durante a safra, é vital ter protocolos claros para a rápida redução de cargas não essenciais e/ou a prontidão de geradores de backup, se aplicável, para estabilizar o consumo.
 - **Exportação (Safra):** Manter um controle rigoroso para garantir que a injeção de energia permaneça dentro dos 12 MW contratados. Se a capacidade de geração for consistentemente superior, a Usina deve avaliar a renegociação do CUSD com a Elektro, o que pode envolver estudos de conexão e potenciais investimentos na infraestrutura da rede.
- **Análise Contratual Profunda:** A Usina deve realizar revisões periódicas e detalhadas de seu Contrato de Fornecimento de Energia (para importação) e de seu Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) para a exportação. A compreensão exaustiva das cláusulas de penalidade, tolerância e das metodologias de cálculo de multas é um passo crucial para a segurança operacional e financeira.
- **Diálogo Estratégico com a Concessionária:** Manter um canal de comunicação aberto e proativo com a Elektro. Informar sobre grandes variações operacionais planejadas e buscar soluções conjuntas para a otimização do uso da rede pode evitar surpresas e fortalecer a parceria estratégica.

- **Acompanhamento Regulatório Constante:** O cenário regulatório do setor elétrico está em constante evolução. É imperativo que a Usina São João, ou sua consultoria especializada em energia, acompanhe de perto as atualizações da ANEEL, em particular as relativas à REN ANEEL 1.000/2021 e ao Marco Legal da Geração Distribuída (Lei 14.300/2022).

6. CONCLUSÃO

A Usina São João de Araras, em sua complexa operação de cogeração, demonstra ser um ator significativo no setor elétrico, ao mesmo tempo em que está exposta a penalidades substanciais por ultrapassagem dos limites contratuais de energia. O estudo de caso permitiu quantificar o impacto financeiro potencial dessas violações. A multa por estouro de demanda na importação, por exemplo, pode representar um custo financeiro elevado, variando de dezenas de milhares de reais (fora de ponta) a valores acima de R\$ 60.000 (na ponta) por cada 750 kW de excedente acima da tolerância, dependendo das tarifas vigentes da Elektro. Para a exportação, as "penalidades" se traduzem em descumprimentos do Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) como Autoprodutor, podendo resultar em multas contratuais específicas e, em casos de necessidade de adequação da rede, na exigência de investimentos em infraestrutura.

A Usina São João, ao longo de sua trajetória, demonstrou um compromisso com a modernização e a sustentabilidade, investindo R\$ 82 milhões na Caldeira 2 e no Gerador 5, com um payback real de 5,9 anos. Essa ampliação não só garantiu a autossuficiência energética, mas também abriu as portas para a comercialização de excedentes, chegando a 12 MW de capacidade de exportação. Em suma, a gestão proativa e informada da demanda e da geração, aliada a um monitoramento contínuo e ao profundo conhecimento dos termos contratuais e do arcabouço regulatório, são pilares essenciais para evitar esses custos adicionais e assegurar a operação eficiente e sustentável da Usina São João no cenário energético brasileiro. A integração das tecnologias da Indústria 4.0 é um diferencial importante para a otimização desses processos e a manutenção da competitividade da usina.

7. REFERÊNCIAS

ABB. UNITROL® 1000. Disponível em: <https://library.e.abb.com/>. Acesso em: mar. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Relatório Anual 2022. Brasília: ANEEL, 2022.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. Energia da Biomassa: perspectivas e desafios. Rio de Janeiro, 2022.

CALDEMA. Caldeiras de alta pressão: eficiência e durabilidade. Catálogo Técnico, 2024.

CAVALCANTE, J.; SOUZA, M.; PEREIRA, R. A cogeração no setor sucroalcooleiro: benefícios e desafios. Revista Brasileira de Energia, v. 25, n. 3, p. 45-60, 2019.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Relatório de Atividades 2022. São Paulo, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Brasília: MME, 2023.

FERREIRA, A.; ALMEIDA, P. Eficiência energética e cogeração no Brasil. São Paulo: Editora Energia, 2021.

GOMES, L. et al. Impactos sociais da cogeração no setor sucroalcooleiro. Revista de Sustentabilidade Energética, v. 10, n. 2, p. 112-130, 2021.

JORNAL CANA. Cogeração a partir do bagaço de cana representa 60,1% da capacidade instalada no Brasil. Jornal Cana, 2023. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/>. Acesso em: mar. 2023.

LORA, E. E. S. Biomassa para energia. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; RAMOS, N. P. Bioenergia e a Sustentabilidade no Brasil. São Paulo: Editora UNESP, 2015.

PEREIRA, F.; SOUZA, C. A modernização tecnológica no setor sucroalcooleiro. Revista de Inovação Tecnológica, v. 15, n. 1, p. 77-92, 2021. REIS, J.;

SILVA, M.; COSTA, R. Evolução da geração de energia e a biomassa como alternativa sustentável. Revista de Energia Renovável, v. 8, n. 2, p. 33-50, 2022.

RIBEIRO, A. et al. Benefícios ambientais da biomassa no Brasil. Revista Brasileira de Sustentabilidade, v. 12, n. 4, p. 20-35, 2021.

RELAÇÃO ANUAL DE INFORMAÇÕES SOCIAIS – RAIS/MTE. Brasília, 2022.

SANTOS, D.; OLIVEIRA, R. Inteligência artificial aplicada à cogeração no setor sucroalcooleiro. Revista de Tecnologia Industrial, v. 7, n. 3, p. 55-70, 2022.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES – SEL. Relés de Proteção e Controle. Catálogo Técnico, 2023.

SIEMENS. Supervisório SIMATIC: controle e automação industrial. Manual Técnico, 2023.

SILVA, J. Cogeração de energia no setor sucroalcooleiro: estudo de caso em usinas paulistas. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

SILVA, P.; OLIVEIRA, F. Transição energética e biomassa: perspectivas para o Brasil. São Paulo: Editora Energia, 2020. SILVA, R. et al. A influência da Indústria 4.0 na cogeração de energia. Revista de Inovação e Tecnologia, v. 9, n. 1, p. 88-105, 2020.

TGM. Turbinas a vapor: linha TM-A. Catálogo Técnico, 2023.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. Balanço da Safra 2022/2023. São Paulo: UNICA, 2023.

USINA SÃO JOÃO DE ARARAS - SP. Dados sobre a Usina São João antes do investimento de uma nova caldeira e um novo gerador para ampliação do processo fabril e início da exportação à partir de 2015. Documento interno, [2025].

WEG. Turbogeneradores linha ST40. Catálogo Técnico, 2023.

WOODWARD. Controladores MSLC e DSLC: sincronismo e controle de carga. Manual Técnico, 2023.

<https://github.com/DiegoFogari/COGERACAO-NO-SETOR-SUCROALCOOLEIRO-A-PARTIR-DO-BAGACO-DE-CANA-DE-ACUCAR>