



Análise de viabilidade econômica de implantação de minigeração distribuída utilizando cavaco de madeira em indústria cimenteira

Gabriel Jackson da Silva*; Clainer Bravin Donadel*

Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Brasil.

Autor para correspondência e-mail: cdonadel@ifes.edu.br

Palavras-chave

Minigeração distribuída
Cavaco de madeira
Viabilidade econômica
Indústria cimenteira
Energia renovável

Keywords

Distributed generation
Wood chips
Economic feasibility
Cement industry
Renewable energy

Resumo: A sustentabilidade na indústria cimenteira é um desafio relevante, especialmente diante dos elevados custos com energia elétrica. A queima de cavaco de madeira tem se mostrado uma alternativa viável e sustentável para minigeração distribuída no setor. Este estudo realiza uma análise de viabilidade econômica da implementação de uma usina de minigeração distribuída utilizando cavaco de madeira como fonte de energia em uma indústria cimenteira. O estudo avaliou diferentes cenários de custos, considerando variações no preço do cavaco de madeira, do frete e dos custos de manutenção. A metodologia incluiu a modelagem econômica com fluxo de caixa descontado, cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR), além da análise de sensibilidade para avaliar os riscos associados à proposta. Os resultados indicam que a minigeração distribuída pode reduzir significativamente os custos com energia elétrica e promover maior autonomia energética para a indústria, desde que o custo combinado da compra do cavaco e do frete seja mantido abaixo de R\$ 164,00 por tonelada. A análise econômica aponta um VPL positivo de R\$ 144 milhões, uma TIR de 33,57% e um payback descontado de 5,31 anos, evidenciando a viabilidade da proposta. Conclui-se que a adoção da minigeração distribuída com cavaco de madeira representa uma solução sustentável e economicamente vantajosa para a indústria cimenteira, contribuindo para a redução de despesas operacionais e maior eficiência energética.

Economic feasibility analysis of the implementation of distributed mini-generation using wood chips in the cement industry

Abstract: Energy sustainability in the cement industry is a relevant challenge, especially considering the high electricity costs. Wood chip combustion has proven to be a viable and sustainable alternative for distributed generation in this sector. This study conducts an economic feasibility analysis of implementing a distributed generation plant using wood chips as an energy source in a cement industry. The study evaluates different cost scenarios, considering variations in wood chip prices, freight costs, and maintenance expenses. The methodology includes economic modeling with discounted cash flow analysis, Net Present Value (NPV) calculation, and Internal Rate of Return (IRR), along with sensitivity analysis to assess the risks associated with the proposal. The results indicate that distributed generation can significantly reduce electricity costs and promote greater energy autonomy for the industry, provided that the combined cost of wood chip procurement and freight remains below R\$ 164.00 per ton. The economic analysis reveals a positive NPV of R\$ 144 million, an IRR of 33.57%, and a discounted payback period of 5.31 years, demonstrating the feasibility of the proposal. It is concluded that the adoption of distributed generation with wood chips represents a sustainable and economically advantageous solution for the cement industry, contributing to lower operational expenses and improved energy efficiency.

Recebido em: 08/2024

Aprovação final em: 11/2024



Introdução

No processo de fabricação do cimento, as propriedades e características do produto estão intrinsecamente relacionadas às matérias-primas utilizadas. Uma das principais matérias-primas é o clínquer, material resultante da combinação de calcário e argila, submetidos a altas temperaturas. Além do clínquer, são adicionados outros materiais que variam conforme o tipo de cimento a ser produzido. Uma dessas adições é a escória, um subproduto obtido durante a fabricação do ferro gusa. A escória possui uma característica importante: sua capacidade hidráulica potencial. Quando entra em contato com a água, a escória endurece e adquire propriedades cimentantes. Para que essa mistura seja bem-sucedida, a escória precisa passar por um processo de moagem, a fim de atingir a granulometria adequada (CSN, 2016).

A escória, ao chegar às cimenteiras, tem alto teor de umidade devido ao processo de obtenção, exigindo a secagem antes da moagem e mistura para ser utilizada no cimento. Esse procedimento visa reduzir a umidade para adequar a escória ao processamento subsequente, usando sistemas de queimadores para gerar gás quente na secagem (MOREIRA, 2021).

O uso de biomassa, em particular o cavaco de madeira, vem ganhando destaque em sistemas de queimadores. Seu uso advém da instabilidade no valor de mercado para se adquirir o gás natural liquefeito - GNL. A indústria cimenteira, ao utilizar o cavaco de madeira como combustível na secagem da escória, demonstra uma abordagem inovadora que vai além da eficiência operacional. A escolha do cavaco de madeira como fonte de energia baseia-se em sua natureza renovável e na possibilidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis (SILVA *et al.*, 2020).

Paralelamente à utilização do cavaco de madeira na indústria cimenteira, é preciso contextualizar também a geração de energia elétrica no Brasil, em especial por fontes renováveis. No Brasil, há alguns métodos de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis a serem exploradas, com o intuito de haver um maior aproveitamento do potencial brasileiro. Estas fontes crescem aceleradamente em boa parte do mundo e estes fatores ligam-se ao foco de diminuir os impactos causados por outras fontes energéticas não renováveis como o carvão mineral, petróleo, gás natural e combustíveis nucleares; com isso, a preocupação mundial volta-se para uma produção menos poluente (NASCIMENTO *et al.*, 2016). Dessa forma, podem-se identificar alternativas de geração de energias renováveis em uso no país, como a biomassa, eólica, geotérmica, hidráulica, marítima e solar (NASCIMENTO *et al.*, 2016).

Os custos com energia elétrica na indústria cimenteira em análise representam uma parcela significativa dos custos totais de operação. Somado a isso, a indústria cimenteira possui amplo conhecimento sobre a cadeia de fornecimento de cavaco de madeira para utilização em seu processo produtivo de cimento e deseja utilizar toda essa perícia para promover a geração de energia elétrica a partir da biomassa disponível, seja por excedente do processo produtivo, seja da ampliação do volume adquirido mensalmente.

Desta forma, esse artigo tem por objetivo elaborar um estudo de viabilidade econômica de geração de energia elétrica por meio do sistema de queima de cavaco de madeira, utilizado no processo de produção em uma indústria cimenteira, seguindo os parâmetros estabelecidos para minigeração distribuída, conforme a Lei n.º 14.300/2022 (BRASIL, 2022). A viabilidade da proposta poderá contribuir em diferentes vertentes: (a) econômica, considerando o potencial de economia no valor das faturas de energia elétrica da empresa em questão, ampliando sua competitividade no mercado; (b) ambiental, à medida que a geração de energia elétrica por meio de biomassa pode substituir parcela correspondente de energia gerada a partir de fontes não renováveis; além disso, permite um melhor gerenciamento dos resíduos florestais, podendo reduzir o impacto ambiental causado por esses materiais; (c) elétrica, à medida que promove a descentralização da geração de energia, podendo impactar positivamente no desempenho do sistema elétrico; também possui menor dependência das condições climáticas, quando comparada às fontes solar ou eólica.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é apresentada uma revisão de literatura, mostrando os principais trabalhos relacionados ao tema dos últimos anos. Na Seção 3 a metodologia é apresentada em detalhes. Na Seção 4, os resultados são apresentados e discutidos,



incluindo uma análise de sensibilidade, permitindo avaliar melhor os riscos associados à proposta. Por fim, na Seção 5, são apresentadas as conclusões e considerações finais.

Revisão de literatura

A geração de energia elétrica no Brasil por meio de biomassa superou a marca de 7,2% do total da energia elétrica gerada em 2023 (EPE, 2023). Nesse mesmo ano, a geração de energia elétrica a partir de biomassa representou 8,4% da capacidade instalada brasileira, sendo a terceira maior dentre as fontes renováveis utilizadas.

Dado o potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa, diversos trabalhos na literatura vêm tratando do tema. Huang *et al.* (2019) propuseram uma análise de viabilidade técnico-econômica de implantação de usinas de energia elétrica via gaseificação de palha de trigo e milho na China; como resultado, um modelo econômico foi estabelecido utilizando uma análise de fluxo de caixa descontado para estimar o desempenho econômico das usinas.

Araújo e Oliveira (2020) analisaram a viabilidade de geração de energia elétrica a partir da vinhaça; a análise demonstrou que o uso de vinhaça para geração de energia elétrica está restrito a produtores de médio e grande porte, quando o VPL se tornou positivo.

Garcia *et al.* (2021) propuseram um sistema de geração distribuída combinando a gaseificação de resíduos sólidos com vapor superaquecido e painéis fotovoltaicos; seu desempenho econômico a longo prazo demonstrou alta lucratividade.

Machado (2021) avaliou a viabilidade de geração de energia elétrica a partir do lodo gerado em uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria alimentícia, evidenciando a viabilidade econômica de reaproveitamento de resíduos sólidos industriais.

Em Silva *et al.* (2021) foi analisado o potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa da cana-de-açúcar, mostrando o potencial impacto na matriz de energia elétrica brasileira.

Em Martins *et al.* (2022) foi apresentado um estudo sobre a viabilidade de aproveitamento de dejetos de animais de 3 diferentes tipos de criação (bovinos, suínos e aves) como forma de aumentar a rentabilidade dos produtores rurais envolvidos; nos tipos de criação analisados foi constatada a viabilidade de geração de energia elétrica, com destaque para a criação de aves.

Petry Junior *et al.* (2022) avaliaram um sistema híbrido de geração de energia elétrica, envolvendo geração fotovoltaica e a utilização de biomassa, para aplicação em locais nos quais não há fornecimento de energia por meio de rede pública de distribuição de energia elétrica, evidenciando o potencial do sistema proposto.

Em Poças *et al.* (2022) foi analisada a viabilidade de instalação de biodigestores para produção conjunta de biofertilizantes e biogás (este para a produção de energia elétrica) a partir de dejetos de suínos, concluindo pela sua viabilidade.

Brito *et al.* (2023) analisaram o potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos agrícolas como casca de arroz, casca de babaçu e casca de coco-da-baía, analisando especialmente a complementaridade dentre as diversas fontes de biomassa existentes na área de estudo, e destacando a potencial viabilidade de geração a partir dessas fontes.

Em Hersen *et al.* (2023) foi analisada a viabilidade econômica de adoção de geração distribuída para um agrupamento de indústrias de produtos de madeira, utilizando como fonte a biomassa florestal, por meio do modelo de consórcio; utilizando uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 9%, os autores concluíram pela viabilidade econômica da proposta.

A partir dos trabalhos avaliados, nota-se a preocupação atual com os potenciais aproveitamentos energéticos de biomassa para geração de energia elétrica. A biomassa, sendo uma fonte renovável, permite a utilização de resíduos agrícolas, florestais e industriais, contribuindo para sua redução e mitigação de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, essa alternativa energética diminui a dependência de combustíveis fósseis, promovendo a segurança energética em regiões com escassez de fontes convencionais.



Metodologia

Área de estudo

A área de estudo deste trabalho consiste em um terreno para a construção de uma usina de geração de energia elétrica. A necessidade de um terreno se deu por não haver espaço suficiente na unidade consumidora para construção de um sistema de geração, levando à adoção da modalidade de autoconsumo remoto. O terreno está localizado no município da Serra, Estado do Espírito Santo e possui uma área total de 3.318,20 m². O custo de aquisição do terreno será desprezado no momento da análise por ser um valor muito pequeno comparado aos demais valores de investimentos envolvidos.

A Tabela 1 apresenta os valores de consumo de energia em MWh da planta consumidora durante um período de 12 meses. Nota-se que, de fevereiro a junho, ocorrem os maiores valores de consumo, ultrapassando a marca de 3.000 MWh mensais.

Tabela 1 - Dados de consumo da unidade consumidora no período de 12 meses.

Mês	Consumo (MWh)
Janeiro	2.913,17
Fevereiro	3.104,44
Março	3.390,51
Abril	3.129,30
Mai	3.124,27
Junho	3.360,40
Julho	2.786,65
Agosto	2.968,21
Setembro	3.019,40
Outubro	2.980,86
Novembro	2.855,22
Dezembro	2.694,97

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

É necessário estimar o consumo em cada posto tarifário, já que a unidade consumidora apenas faz uma leitura de consumo geral, sem distinção de horários. A tarifação de energia de qualquer consumidor do grupo A tem valores diferentes de tarifas em cada posto tarifário. O cálculo é feito por proporção e é dado por (1) e (2).

$$C_p = \left(\frac{H_p}{24}\right) * C \quad (1)$$

C_p - Consumo de energia horário ponta em MWh;
 H_p - Quantidade de horas diárias do horário ponta (3h);
 C - Consumo de energia elétrica total, em MWh.

$$C_{fp} = \left(\frac{H_{fp}}{24}\right) * C \quad (2)$$

C_{fp} - Consumo de energia horário fora de ponta, em MWh;
 H_{fp} - Quantidade de horas diárias do horário fora de ponta (21h);
 C - Consumo de energia elétrica total, em MWh.



Tarifas de consumo e geração

A fatura de energia elétrica é composta pelos valores referentes à TUSD (Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição) e à TE (Tarifa de Energia). Para calcular as parcelas de cada uma são necessários os dados de consumo em cada posto tarifário e o valor a ser pago em cada uma dessas parcelas. Com base nessas informações, é necessário seguir as equações (3)-(9) que são fornecidas pela ANEEL por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021 (ANEEL, 2021).

As Equações (3) e (4) representam os custos mensais com tarifas a título de TUSD (parcela consumo) nos postos tarifários ponta e fora de ponta, respectivamente. As Equações (5) e (6) representam os custos mensais com tarifas a título de TE nos postos tarifários ponta e fora de ponta, respectivamente, incluindo-se eventuais adicionais a título de bandeiras tarifárias. As Equações (7) e (8) representam os custos mensais com tarifas a título de TUSD (parcela demanda) nos postos tarifários ponta e fora de ponta, respectivamente, aplicáveis exclusivamente à modalidade tarifária horária azul. A Equação (9) representa os custos mensais com tarifas a título de TUSD (parcela demanda), aplicável exclusivamente à modalidade tarifária horária verde. Dessa forma, as Equações (3)-(8) devem ser aplicadas exclusivamente a uma unidade consumidora pertencente à modalidade tarifária horária azul. Por outro lado, as Equações (3)-(6) e (9) devem ser aplicadas exclusivamente a uma unidade consumidora pertencente à modalidade tarifária horária verde.

$$\text{Parcela TUSD Consumo Ponta} = \text{TUSDp} * \text{Cp} \quad (3)$$

$$\text{Parcela TUSD Consumo Fora de Ponta} = \text{TUSDfp} * \text{Cfp} \quad (4)$$

$$\text{Parcela TE Ponta} = (\text{TEp} + \text{bandeira tarifária}) * \text{Cp} \quad (5)$$

$$\text{Parcela TE Fora de Ponta} = (\text{TEfp} + \text{bandeira tarifária}) * \text{Cfp} \quad (6)$$

$$\text{Parcela TUSD Demanda Ponta Azul} = \text{Demandap} * \text{Dcp} \quad (7)$$

$$\text{Parcela TUSD Demanda Fora de Ponta Azul} = \text{Demandafp} * \text{Dcfp} \quad (8)$$

$$\text{Parcela TUSD Demanda} = \text{Demanda} * \text{Dc} \quad (9)$$

Onde:

Parcela TUSD Consumo Ponta: valor a ser pago em R\$ para a parcela TUSD Consumo no posto tarifário ponta;

Parcela TUSD Consumo Fora de Ponta: valor a ser pago em R\$ para a parcela TUSD Consumo no posto tarifário fora de ponta;

Parcela TE Ponta: valor a ser pago em R\$ para a parcela TE no posto tarifário ponta;

Parcela TE Fora de Ponta: valor a ser pago em R\$ para a parcela TE no posto tarifário fora de ponta;

Parcela TUSD Demanda: valor a ser pago em R\$ para a parcela TUSD Demanda;

Parcela TUSD Demanda Ponta Azul: valor a ser pago em R\$ para a parcela TUSD Demanda no posto tarifário ponta;

Parcela TUSD Demanda Fora de Ponta Azul: valor a ser pago em R\$ para a parcela TUSD Demanda no posto tarifário fora de ponta;

TUSDp: tarifa de aplicação em R\$/MWh para TUSD Consumo no posto tarifário ponta;

TUSDfp: tarifa de aplicação em R\$/MWh para TUSD Consumo no posto tarifário fora de ponta;

TE: tarifa de aplicação em R\$/MWh para TE no posto tarifário ponta;

TEfp: tarifa de aplicação em R\$/MWh para TE no posto tarifário fora de ponta;

Demanda: tarifa de aplicação em R\$/MW para TUSD Demanda;

Demandap: tarifa de aplicação em R\$/MW para TUSD Demanda no posto tarifário ponta;

Demandafp: tarifa de aplicação em R\$/MW para TUSD Demanda no posto tarifário fora de ponta;

Dc: valor da demanda contratada junto à distribuidora de energia em MW;

Dcp: valor da demanda contratada junto à distribuidora de energia em MW no posto tarifário ponta;



Dc_{fp}: valor da demanda contratada junto à distribuidora de energia em MW no posto tarifário fora de ponta;

C_p: consumo de energia horário ponta em MWh (Equação (1));

C_{fp}: consumo de energia horário fora de ponta, em MWh (Equação (2));

bandeira tarifária: Bandeira tarifária aplicada à TE em R\$/MWh.

Para o desenvolvimento de cálculos mais fidedignos que envolvem o consumo de energia elétrica, foram consideradas as bandeiras tarifárias ao longo dos meses. Consultando o site da ANEEL e analisando os últimos cinco anos, foi observada uma média de período para cada bandeira tarifária conforme o Quadro 1. Na consulta foi possível observar as bandeiras que predominavam em cada mês.

Quadro 1 - Períodos médios de aplicação de cada bandeira tarifária.

Período	Bandeira
Janeiro	Amarela
Fevereiro	
Março	
Abril	
Maio	Vermelha patamar 1
Junho	
Julho	
Agosto	Vermelha patamar 2
Setembro	
Outubro	Verde
Novembro	
Dezembro	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O valor a ser pago na fatura é a soma de todas as componentes calculadas. Esses são os valores totais a serem pagos sem qualquer incidência de impostos. Para calcular o valor da fatura total com a incidência de impostos deve ser aplicada a Equação (10), correspondente a forma de tributação adotada no Brasil.

$$Fatura (R\$) = \frac{Valor\ Total\ (R\$)}{(1 - PIS - COFINS)} \times \frac{1}{(1 - ICMS)} \quad (10)$$

Onde:

Fatura (R\$): valor a ser pago para a distribuidora, em R\$;

Valor Total (R\$): soma dos valores totais TE + TUSD, em R\$;

PIS: Programa de Integração Social;

COFINS: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social;

ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.

O PIS e o COFINS incidem sobre o faturamento das empresas, sendo destinados ao financiamento de benefícios sociais e à seguridade social, respectivamente. Já o ICMS, um imposto estadual, incide sobre a circulação de mercadorias e serviços de transporte e comunicação, arrecadando receita para os Estados.

Para a análise econômica, é necessário que esses valores estejam ajustados com um reajuste médio anual. Para calcular esse reajuste, foi necessário realizar um levantamento diretamente



no site da ANEEL dos valores de TUSD Consumo, TUSD Demanda e Tarifa de Energia de 2013 a 2022 para, sem seguida, calcular o percentual de reajuste anual médio. Os dados levantados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de TUSD e TE entre 2013 e 2022.

Ano	TUSD Demanda (R\$/MW)	TUSD Energia (R\$/MWh)	TE (R\$/MWh)
2013	14,02	14,04	268,38
2014	17,10	17,19	346,30
2015	17,10	67,52	360,62
2016	12,98	55,90	339,47
2017	21,19	35,29	389,42
2018	20,80	53,40	463,41
2019	22,18	55,83	402,83
2020	27,83	61,82	406,95
2021	29,77	52,62	434,80
2022	30,85	90,25	422,60

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Foi realizada uma análise em uma termoeletrica com uma potência instalada de 5MW, dado que essa é máxima potência permitida para minigeração, conforme Lei n.º 14.300/2022 (BRASIL, 2022) e a Resolução Normativa n.º 1.059/2023 da ANEEL (ANEEL, 2023).

Inicialmente, definiu-se que a usina funcionará em regime permanente e será reservado um dia por mês para paradas programadas de manutenção preventiva. Dessa forma, a energia gerada é calculada conforme Equação (11).

$$E_g = (P * N * D) \quad (11)$$

Onde:

E_g : energia gerada, em MWh;

P : potência nominal da usina, em MW;

N : quantidade de horas em funcionamento em um período de 24h;

D : quantidade de dias em funcionamento em um período de 30 dias.

A usina em questão é uma usina que utiliza fonte despachável como fonte de energia e por isso se enquadra no grupo GDII estabelecido pela ANEEL; porém, para o desenvolvimento desse estudo, essa análise será feita considerando o caso mais crítico, que seria o caso onde a usina se classifica como GDIII. Uma usina do grupo GDIII com 5MW de potência e autoconsumo remoto paga apenas a tarifa de geração. Assim a forma de calcular esse valor de demanda é mostrado na Eq. (12), correspondente a forma de tributação adotada no Brasil.

$$D_p = \frac{(P * VD * 1000)}{(1 - PIS - COFINS)} * \frac{1}{(1 - ICMS)} \quad (12)$$

Onde:

D_p : valor a ser pago a título de demanda de geração por mês, em R\$;

P : potência nominal da tipologia, em MW;

VD : valor da tarifa de demanda de geração, em R\$/kW.



Custos da termoe elétrica

Neste estudo foi levantado um orçamento junto à empresa fornecedora de usinas termoe elétricas. O orçamento recebido totalizou R\$ 25.836.237,00, cobrindo os custos de implantação, como aquisição de equipamentos e infraestrutura, mas excluindo custos operacionais como combustível, manutenção e pessoal. O valor está sujeito a variação devido à inflação e mudanças no mercado, sendo necessário acompanhar e atualizar os custos periodicamente. Esses dados foram utilizados para avaliar a viabilidade econômica do projeto, considerando receitas esperadas do sistema de compensação de energia elétrica. Foram analisados custos de investimento e manutenção, incluindo aquisição e frete de cavaco de madeira, combustível, manutenção e salários. O custo de manutenção será ajustado anualmente com base na inflação acumulada de 2023, conforme dados do Banco Central.

De acordo com Aguado *et al.* (2021), a análise de viabilidade de usinas de geração distribuída geralmente considera um horizonte de 25 anos devido a fatores econômicos, técnicos e regulatórios.

Cenários para avaliação

Considerando a natureza dinâmica do mercado de energia, bem como as possíveis mudanças nos custos de manutenção, é essencial antecipar e compreender os diferentes cenários que podem afetar o projeto. Essa análise proativa permite identificar potenciais desafios. Assim, foram definidos 3 cenários para a análise de sensibilidade:

Cenário 1 - variação nos preços da matéria-prima: flutuações nos preços de matérias-primas, como cavaco de madeira, podem aumentar os custos operacionais e dificultar a lucratividade do projeto. Neste cenário foi avaliado o preço do cavaco de madeira a R\$ 150,00/tonelada e o preço do frete a R\$ 120,00/tonelada. O cenário base possui um valor de R\$1,00/tonelada de cavaco, com frete a R\$90,00/tonelada. Esses valores foram adotados mediante uma pesquisa feita no mercado de venda e frete de cavaco de madeira.

Cenário 2 - flutuações nos custos de manutenção e reparo: variações nos custos de manutenção podem impactar a viabilidade do projeto. Aumentos inesperados nos custos, devido a desgaste acelerado ou problemas de confiabilidade, reduzem a lucratividade. Neste cenário, os custos envolvendo manutenção foram alterados de R\$275,91/MWh para R\$330,00/MWh. Esse valor representa um aumento de aproximadamente 20%. Considerando as oscilações no valor do dólar americano e a instabilidade geopolítica em regiões que detêm boa parte da fabricação de semicondutores, esse valor é possível de ser alcançado.

Cenário 3 - flutuações nos preços das tarifas de aplicação sobre a energia elétrica compensada: mudanças nos preços das tarifas determinadas pela ANEEL podem afetar a rentabilidade do projeto de geração de energia com cavaco de madeira. Neste cenário, o percentual de desconto na TUSD foi de 59,01% e TE 52,64%. Considerando que a ANEEL determinou um aumento gradativo no percentual de desconto, esse valor está no aumento gradativo proposto.

Resultados e Discussão

Este capítulo está dividido em três partes. A primeira parte começa com uma análise da fatura de energia elétrica sem a presença da geração distribuída. A segunda parte analisa a fatura de energia elétrica com a usina de minigeração distribuída. Por fim, a terceira parte foca na análise econômica, incluindo métricas e projeções de retorno sobre o investimento.

Cálculo da fatura de energia elétrica sem geração distribuída

O primeiro passo dessa análise é calcular o consumo de energia da indústria em estudo em cada posto tarifário. Essa necessidade advém do fato de as medições de energia mensais feitas não considerarem as distinções de cada posto tarifário. Com base nas Equações (1) e (2) e na Tabela 1 pode-se calcular os valores em MWh em cada posto tarifário. Os valores calculados estão descritos na Tabela 3.



Tabela 3 – Consumo mensal em cada posto tarifário.

Período	Consumo ponta (MWh) – Eq. (1)	Consumo fora de ponta (MWh) – Eq. (2)
Janeiro	364,15	2.549,02
Fevereiro	388,06	2.716,39
Março	423,81	2.966,70
Abril	391,16	2.738,14
Mai	390,53	2.733,74
Junho	420,05	2.940,35
Julho	348,33	2.438,32
Agosto	371,03	2.597,18
Setembro	377,43	2.641,98
Outubro	372,61	2.608,25
Novembro	356,90	2.498,32
Dezembro	336,87	2.358,10

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir dessas informações é possível calcular as grandezas cobradas na fatura de energia elétrica. São calculados os valores de TUSD Consumo, TE e TUSD Demanda. Para fins de comparação, foram calculados os custos envolvendo essas grandezas para as modalidades tarifárias horárias azul e verde. O valor da demanda contratada pela empresa no posto tarifário ponta é 2MW e no posto tarifário fora de ponta é 7,6MW. A Tabela 4 apresenta os valores mensais da soma de TUSD Consumo, TE e TUSD Demanda em cada modalidade tarifária, sem impostos. Assim, é possível definir a modalidade azul como a melhor para a indústria em estudo.

Tabela 4 – Valores mensais em cada modalidade.

Período	Modalidade Tarifária Horária Azul (R\$)	Modalidade Tarifária Horária Verde (R\$)
Janeiro	1.920.300,43	2.263.924,01
Fevereiro	2.023.087,01	2.395.865,16
Março	2.176.818,17	2.593.200,89
Abril	2.036.446,53	2.413.013,99
Mai	2.114.287,14	2.490.087,90
Junho	2.247.268,47	2.659.061,64
Julho	1.924.149,68	2.248.488,29
Agosto	2.245.627,26	2.564.687,27
Setembro	2.278.793,26	2.604.928,31
Outubro	1.568.463,86	1.889.272,25
Novembro	1.515.948,86	1.819.392,38
Dezembro	1.448.967,56	1.730.262,73
Total	23.500.158,22	27.672.184,82

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.



A parte final dessa análise se dá ao aplicar os impostos sobre os valores da modalidade tarifária horária azul obtidos na Tabela 4. Consultando o site da EDP-ES em maio de 2024, tem-se os seguintes valores:

- PIS: 1,21%;
- COFINS: 5,57%;
- ICMS: 17%.

Com base nesses valores e na Equação (10) é feito o cálculo do valor final da fatura mensal de energia da unidade consumidora. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 — Valores mensais da fatura de energia elétrica.

Período	Fatura (R\$) – Eq. (10)
Janeiro	2.481.886,90
Fevereiro	2.614.733,14
Março	2.813.422,54
Abril	2.631.999,61
Mai	2.732.604,48
Junho	2.904.475,83
Julho	2.486.861,86
Agosto	2.902.354,66
Setembro	2.945.219,96
Outubro	2.027.156,72
Novembro	1.959.283,85
Dezembro	1.872.714,06
Total	30.372.713,62

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Cálculo da fatura de energia elétrica com geração distribuída

A modalidade autoconsumo remoto é composta pela parte geradora e a parte consumidora, ou seja, o montante final pago pela empresa é a soma da fatura de energia da unidade geradora e da unidade consumidora.

Cálculo da Fatura de Energia Elétrica da Unidade Geradora

Com base na Tabela 1, na equação (11) e em uma potência instalada de 5MW, obtém-se um valor de geração de energia elétrica mensal de 3.480 MWh. Logo, a potência de 5MW é suficiente para atender a indústria em análise e, com essa potência instalada, modalidade de autoconsumo remoto e subgrupo A4, a Lei n.º 14.300/2022 diz que a unidade geradora pagará apenas a demanda de geração e se tratando de impostos apenas o ICMS (BRASIL, 2022). A Tabela 6 apresenta os valores calculados para a fatura de energia elétrica da unidade geradora.



Tabela 6 – Valor mensal da fatura de energia elétrica da unidade geradora.

Período	Fatura com Impostos (R\$) – Eq. (12)
Janeiro	78.795,18
Fevereiro	78.795,18
Março	78.795,18
Abril	78.795,18
Maio	78.795,18
Junho	78.795,18
Julho	78.795,18
Agosto	78.795,18
Setembro	78.795,18
Outubro	78.795,18
Novembro	78.795,18
Dezembro	78.795,18
Total	945.542,17

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Cálculo da Fatura de Energia Elétrica da Unidade Consumidora

A usina em análise se enquadra no grupo GDII por se tratar de uma usina com fonte de energia despachável. Porém, para o estudo em questão é analisado o cenário mais crítico, ou seja, o cenário que envolve o grupo GDIII. Logo, os cálculos e valores base são em referência ao grupo GDIII. E para esse grupo, conforme a Lei n.º 14.300/2022, a partir de 2023 já estão sendo pagos os percentuais de desconto máximo. A Resolução Homologatória n.º 3.241/2023 (ANEEL, 2023), apresenta um percentual de desconto de 99,01% para TUSD Consumo e 92,64% para TE. A Tabela 7 apresenta os valores mensais da fatura de energia da unidade consumidora utilizando as componentes calculadas, já considerando os impostos.

Tabela 7 – Valores mensais da fatura de energia elétrica.

Período	Fatura (R\$) – Eq. (10)
Janeiro	518.869,01
Fevereiro	524.586,28
Março	533.137,23
Abril	525.329,37
Maio	629.277,48
Junho	644.203,35
Julho	607.936,38
Agosto	750.382,60
Setembro	755.877,05
Outubro	448.270,75
Novembro	447.576,15
Dezembro	446.690,21
Total	6.832.135,85

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.



Para obter o valor total pago pela indústria, basta somar os valores da Tabela 6 e da Tabela 7, resultando na Tabela 8.

Tabela 8 — Valor total mensal pago pela indústria em estudo já aplicado os impostos.

Período	Fatura da unidade geradora (R\$)	Fatura da unidade consumidora (R\$)	Fatura total (R\$)
Janeiro	78.795,18	518.869,01	597.664,19
Fevereiro	78.795,18	524.586,28	603.381,46
Março	78.795,18	533.137,23	611.932,41
Abril	78.795,18	525.329,37	604.124,55
Maio	78.795,18	629.277,48	708.072,66
Junho	78.795,18	644.203,35	722.998,53
Julho	78.795,18	607.936,38	686.731,56
Agosto	78.795,18	750.382,60	829.177,78
Setembro	78.795,18	755.877,05	834.672,23
Outubro	78.795,18	448.270,75	527.065,93
Novembro	78.795,18	447.576,15	526.371,33
Dezembro	78.795,18	446.690,21	525.485,39
Total	945.542,17	6.832.135,85	7.777.678,02

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Análise econômica

A análise econômica deste trabalho se baseia em um fluxo de caixa que engloba receitas e custos. As receitas são provenientes do quanto a indústria deixa de pagar instalando o sistema de geração, ou seja, o saldo líquido entre a fatura de energia elétrica sem sistema de geração distribuída e com geração distribuída. Já os custos são relacionados ao valor para montagem da usina e os custos anuais (custos que envolvem manutenção, funcionários, cavaco de madeira, etc.).

Custos para montagem e operação de uma usina de 5MW

Conforme o orçamento levantado, são necessários R\$ 25.836.237,00 para montagem e instalação dessa usina. Esse valor já engloba todo o sistema, inclusive a subestação elétrica entrada. De acordo com Nascimento *et al.* (2016), são necessárias 2 toneladas de cavaco para cada 1 MW de potência. Para 5MW, tem-se 10 ton de cavaco. Logo, anualmente, a quantidade de cavaco necessária é calculada na equação (13).

$$\text{Quantidade de cavaco anual} = 5 \times 2 \times 24 \times 29 \times 12 = 83.520 \text{ton} \quad (13)$$

Considerando a usina em funcionamento durante 29 dias e 24 horas por dia, tem-se um total de 6.960 toneladas de cavaco por mês e 83.520 toneladas por ano. O valor pago anualmente envolvendo o cavaco de madeira é calculado pela equação (14).

$$\text{Valor pago pelo cavaco (R\$)} = 83.520 \times (90 + 1) = 7.600.320 \quad (14)$$

De acordo com Tolmasquim (2016), os custos fixos e variáveis envolvendo uma termoelétrica são aproximadamente iguais a US\$ 53,47/MWh. A equação (15) e a equação (16) apresentam os custos anuais de manutenção da usina, considerando US\$ 1,00 igual a R\$ 5,16 (maio/2024).



$$\text{Custo total manutenção (US\$)} = 5MW * 24h * 29 * 12 * \frac{\text{US\$ } 53,47}{\text{MWh}} = 2.232.907,20 \quad (15)$$

$$\text{Custo total manutenção (R\$)} = 2.232,907,2 \times 5,16 = 11.521.801,15 \quad (16)$$

Assim, os custos anuais totais da termoeletrica são iguais a R\$ 7.600.320,00 + R\$ 11.521.801,15 = R\$ 19.122.121,15. Esse é o valor base do custo de manutenção anual da usina e sobre ele será aplicado um reajuste de 4,68%. Esse valor tem como base a inflação acumulada no ano de 2023.

Receita gerada com a geração distribuída

Com base nos cálculos realizados nas seções anteriores, os valores mensais pagos de fatura de energia sem geração distribuída e com geração distribuída podem ser obtidos. Para analisar o saldo da economia gerada com a GD é necessário transpor os valores mensais das faturas de energia sem e com GD ao longo dos anos. Para realizar esse cálculo é necessário calcular um reajuste médio anual das tarifas de aplicação TUSD e TE. Consultando a Tabela 2, tem-se um reajuste anual de aproximadamente 8% a.a.

A Tabela 9 apresenta na segunda e terceira coluna os valores das faturas de energia elétrica da unidade consumidora sem geração distribuída e com geração distribuída. A quarta coluna traz a diferença entre esses dois valores.

Tabela 9 – Valor compensado anual das faturas.

Período	Fatura sem GD (R\$)	Fatura com GD (R\$)	Valor compensado (R\$)
2024	32.802.531	8.399.892	24.402.638
2025	35.426.733	9.071.884	26.354.850
2026	38.260.872	9.797.634	28.463.237
2027	41.321.742	10.581.445	30.740.296
2028	44.627.481	11.427.961	33.199.520
2029	48.197.679	12.342.198	35.855.482
2030	52.053.494	13.329.573	38.723.920
2031	56.217.773	14.395.939	41.821.834
2032	60.715.195	15.547.614	45.167.581
2033	65.572.411	16.791.423	48.780.987
2034	70.818.204	18.134.737	52.683.466
2035	76.483.660	19.585.516	56.898.143
2036	82.602.353	21.152.358	61.449.995
2037	89.210.541	22.844.546	66.365.994
2038	96.347.384	24.672.110	71.675.274
2039	104.055.175	26.645.879	77.409.296
2040	112.379.589	28.777.549	83.602.040
2041	121.369.956	31.079.753	90.290.203
2042	131.079.552	33.566.133	97.513.419
2043	141.565.917	36.251.424	105.314.493
2044	152.891.190	39.151.538	113.739.652
2045	165.122.485	42.283.661	122.838.824
2046	178.332.284	45.666.354	132.665.930
2047	192.598.867	49.319.662	143.279.204
2048	208.006.776	53.265.235	154.741.541

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

**Fluxo de caixa e métricas econômicas**

Com base na Tabela 9 e nos custos apresentados no item 4.3.1, é necessário calcular o fluxo de caixa, o fluxo de caixa descontado e o fluxo de caixa descontado acumulado envolvendo essas receitas e custos. Para o fluxo de caixa, o cálculo é dado pela equação (17).

$$\text{Fluxo de Caixa Anual(R\$)} = \text{Receita Anual} - \text{Custo Anual} \quad (17)$$

A taxa mínima de atratividade (TMA) utilizada foi a Taxa SELIC de maio de 2024, que foi de 10,50% a.a. A TMA, também conhecida como taxa de desconto, é um parâmetro utilizado na análise de viabilidade de projetos, especialmente em análises de fluxo de caixa descontado. Essa taxa representa o mínimo de retorno esperado pelo investidor para considerar um projeto como atrativo. Geralmente, a taxa mínima de atratividade é baseada em uma referência de mercado, como a taxa de juros de investimentos alternativos ou o custo de capital da empresa. Ao aplicar a taxa mínima de atratividade, é possível avaliar se os retornos futuros esperados do projeto são superiores ao custo de oportunidade do capital investido, auxiliando na tomada de decisão sobre a viabilidade econômica do projeto (BLANK, 2008).

Com base nos dados levantados no item 4.3.1, na Tabela 9 e na equação (17) é possível montar o fluxo de caixa e realizar a análise econômica, apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Fluxo de caixa.

Ano	Receitas (mi R\$) - Tabela 9	Custos (mi R\$)	Fluxo de caixa (mi R\$) – Eq. (17)	Fluxo de caixa descontado (mi R\$)	Fluxo de caixa descontado acumulado (mi R\$)
0		25,8	-25,8	-25,8	-25,8
1	24,4	20,1	4,3	3,9	-21,8
2	26,3	20,9	5,4	4,4	-17,4
3	28,4	21,9	6,5	4,8	-12,6
4	30,7	22,9	7,7	5,2	-7,3
5	33,2	24,0	9,1	5,5	-1,8
6	35,8	25,1	10,6	5,8	4,0
7	38,7	26,3	12,3	6,1	10,2
8	41,8	27,5	14,2	6,4	16,6
9	45,1	28,8	16,3	6,6	23,2
10	48,7	30,2	18,5	6,8	30,1
11	52,6	31,6	21,0	7,0	37,1
12	56,8	33,1	23,7	7,2	44,3
13	61,4	34,6	26,7	7,3	51,6
14	66,3	36,2	30,1	7,4	59,0
15	71,6	37,9	33,7	7,5	66,5
16	77,4	39,7	37,6	7,6	74,2
17	83,6	41,6	41,9	7,6	81,9
18	90,2	43,5	46,7	7,7	89,6
19	97,5	45,5	51,9	7,7	97,4
20	105,3	47,7	57,5	7,8	105,2
21	113,7	49,9	63,7	7,8	113,1
22	122,8	52,3	70,5	7,8	120,9
23	132,6	54,7	77,9	7,8	128,7
24	143,2	57,3	85,9	7,8	136,5
25	154,7	59,9	94,7	7,8	144,4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.



Com base na Tabela 10, foram calculados os índices econômicos utilizados na avaliação de viabilidade, apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 — Índices econômicos utilizados na avaliação de viabilidade.

Métrica	Valor
VPL	R\$ 144.406.221,78
TIR	33,57%
Payback descontado	5,31 anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O VPL consiste na soma atualizada dos fluxos de caixa futuros de um projeto, descontados pela taxa mínima de atratividade. Esse cálculo permite determinar se um projeto é economicamente viável, considerando o valor presente dos benefícios líquidos gerados ao longo do tempo. Se o VPL for positivo, significa que o projeto possui um retorno econômico superior à taxa mínima de atratividade, indicando que o investimento é atrativo. Por outro lado, um VPL negativo indica que o projeto não é viável economicamente (BLANK, 2008).

A TIR representa a taxa de desconto que torna o VPL de um investimento igual a zero, ou seja, é o retorno esperado de um projeto ao longo do tempo. Quanto maior a TIR, mais atrativo é o investimento por indicar uma taxa de retorno mais elevada (BLANK, 2008).

O *payback* descontado representa o período necessário para recuperar o investimento inicial considerando o valor presente dos fluxos de caixa futuros descontados pela taxa mínima de atratividade. Não deve ser utilizado como principal medida de desempenho econômico, e sim como métrica auxiliar (BLANK, 2008).

A partir dos dados contidos na Tabela 11, constata-se um valor de VPL positivo e elevado, gerando valor econômico em tempo presente superior a R\$ 144 mi. A TIR obtida é superior ao valor da TMA adotada, indicando a viabilidade da proposta. Além disso, o *payback* descontado de cerca de 5 anos é considerado reduzido para este tipo de projeto.

Considerando os diferentes portes dos projetos analisados na seção 2, a melhor métrica para comparação é a TIR, que independe da ordem de grandeza dos valores aportados. Nesse sentido, a TIR obtida na proposta deste artigo (33,57%) é superior à maior TIR encontrada nos trabalhos citados na seção 2 (31%), reforçando ainda mais a viabilidade econômica da proposta.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é fundamental para identificar como variações em parâmetros considerados críticos afetam o resultado, permitindo uma tomada de decisão mais consciente. Ao realizar a análise de sensibilidade, é possível avaliar a robustez das previsões econômicas, garantindo que o projeto se mantenha viável mesmo diante de mudanças nas condições iniciais ou em cenários adversos. Conforme visto na seção 3.4, são apresentados três cenários para análise de sensibilidade. Os resultados dos três cenários são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 — Análise dos índices econômicos em cada cenário.

Métrica	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
VPL	-R\$ 54.968.057,04	R\$ 114.280.211,34	R\$ 86.795.335,26
TIR	4,18%	27,48%	23,88%
Payback descontado	-	7,7 anos	10,0 anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Segundo a Tabela 12 é possível concluir que o maior risco à inviabilidade do projeto se dá em



relação ao preço da compra do cavaco e do transporte. Caso o Cenário 1 se concretize, o VPL passa a ser substancialmente negativo e a TIR passa a ser inferior à taxa mínima de atratividade. Como conclusão derivada, é possível definir que o custo máximo combinado da compra do cavaco e do frete não pode ultrapassar R\$ 164,00 para que o projeto se mantenha viável no período de 25 anos. Esse é o valor máximo para que o VPL fique acima de zero e que o *payback* descontado esteja no período analisado de 25 anos. Nos demais cenários (2 e 3), o projeto se mantém viável (e), mesmo observando-se uma redução no VPL e na TIR, e um aumento no *payback* descontado, quando comparados com o cenário base.

Conclusão

A análise econômica da usina revela a viabilidade econômica do projeto. O valor do VPL (R\$ 144,4 mi) indica uma criação substancial de valor, no qual os fluxos de caixa futuros, descontados a uma taxa apropriada, superam consideravelmente o investimento inicial. Esse resultado reflete não apenas a capacidade do projeto de gerar retornos, mas também a sua atratividade em termos financeiros.

A TIR (33,57%) confirma a eficácia do investimento, sendo significativamente superior à taxa de desconto aplicada. Este indicador sugere que o projeto não apenas recupera o investimento inicial, mas também oferece uma margem de lucro elevada, tornando-se altamente atrativo para os investidores. A TIR elevada é um sinal positivo de que o projeto tem o poder de suportar variações adversas nas condições de mercado, mantendo-se rentável.

O *payback* descontado (5,31 anos) reflete a eficiência do projeto em recuperar o capital investido em um período relativamente curto. Este indicador é crucial para investidores, especialmente aqueles com aversão ao risco, ao demonstrar a capacidade do projeto de gerar fluxos de caixa positivos em um horizonte temporal reduzido. A rápida recuperação do investimento inicial é um forte atrativo, assegurando a liquidez e reduzindo a exposição ao risco ao longo do tempo.

Na análise de sensibilidade foram considerados 3 cenários distintos para avaliar a viabilidade econômica do projeto. A análise revela que o custo do cavaco e do frete é um fator crítico para a viabilidade do projeto, devendo ser mantido abaixo de R\$ 164 para garantir que o VPL seja positivo (Cenário 1). A análise revela ainda que nos demais cenários analisados (Cenários 2 e 3) o projeto se mantém viável, mesmo que haja redução de sua rentabilidade.

A análise de sensibilidade buscou avaliar a influência de 3 fatores, considerados críticos, no resultado da viabilidade do projeto, mitigando eventuais efeitos da não concretização das projeções futuras. Entretanto, cabe salientar que, a critério do investidor, outros parâmetros podem ser avaliados e incorporados à simulação feita, de forma a incorporar eventuais riscos não considerados na análise inicial.

Conclui-se que a implantação de uma usina de minigeração distribuída utilizando cavaco de madeira na indústria cimenteira é uma alternativa viável e sustentável. A análise econômica demonstra que, apesar dos investimentos iniciais significativos, a tecnologia pode proporcionar uma redução substancial nas despesas com energia elétrica a longo prazo, além de promover uma maior autonomia energética. Desta forma, a adoção desta tecnologia não só contribui para a eficiência energética da indústria cimenteira, mas também para a redução de suas despesas operacionais, consolidando-se como uma opção vantajosa e alinhada às tendências de sustentabilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio institucional do Instituto Federal do Espírito Santo.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa n.º 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>.



AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa n.º 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Homologatória n.º 3.241, de 1 de agosto de 2023**. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2023. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/tarifa/.

AGUADO, R.; VERA, D.; LÓPEZ-GARCÍA, D. A.; TORREGLOSA, J. P.; JURADO, F. Techno-economic assessment of a gasification plant for distributed cogeneration in the agrifood sector. **Applied Sciences**, v. 11, n. 2, p. 660, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11020660>.

ARAÚJO, G. J. F. de; OLIVEIRA, S. V. W. B. de. Analysis of financial and economic feasibility of the use of vinasse for electricity generation in Brazil. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 18, n. 4, p. 936–955, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1679-395120190069x>.

BLANK, L. T. **Engenharia econômica**. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008. xix, 756 p. ISBN 9788577260263.

BRASIL. **Lei n.º 14.300, de 6 de Janeiro de 2022**. Disponível em: <<http://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>>.

BRITO, T. F. N. de; SANTOS JUNIOR, B. F. dos; ALMEIDA, A. R. Potencial de complementaridade e geração de energia através da biomassa de resíduos agrícolas no Piauí. **Latin American Journal of Energy Research**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 53–62, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n2.p53-62>.

CSN. **Apostila treinamento**. Disponível em: <https://www.csn.com.br/wp-content/uploads/sites/452/2021/05/APOSTILA-CIMENTO-CSN.pdf>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. 274 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>

GARCIA, A. Q.; NISHIUMI, N.; SAITO, A.; MATSUMURA, E.; SENDA, J. Economic, environmental and energetic analysis of a distributed generation system composed by waste gasification and photovoltaic panels. **Energies**, v. 14, n. 13, p. 3889, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14133889>.

HERSEN, A.; *et al.* Viabilidade econômica da geração distribuída e compartilhada de energia elétrica: um estudo de caso com biomassa florestal. In: ANDRADE, Jaily Kerller Batista (Org.). **Estudos em Ciências Florestais e Agrárias**. Campina Grande: Licuri, 2023, p. 155-179. Disponível em: <https://doi.org/10.58203/Licuri.20110>.

HUANG, Yi; ZHAO, Ying-jie; HAO, Yan-hong; WEI, Guo-qiang; FENG, Jie; LI, Wen-ying; YI, Qun; MOHAMED, Usama; POURKASHANIAN, Mohamed; NIMMO, William. A feasibility analysis of distributed power plants from agricultural residues resources gasification in rural China. **Biomass and Bioenergy**, v. 121, p. 1-12, 2019. ISSN 0961-9534. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.12.007>.

IVANA DA SILVA, M. das D.; PEREIRA LIMA E SILVA, J. M. Geração de energia elétrica a partir da biomassa uma aplicação do bagaço da cana-de-açúcar. **Revista Multidisciplinar do Sertão**, v. 3, n. 3, p. 313-322, 27 set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.37115/rms.v3i3.357>.

MACHADO, A. J. M. **Análise de viabilidade econômica para reaproveitamento de lodo como biomassa na geração de energia em caldeira**. 2021. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

MARTINS, L. C.; TINOCO, C. M. M.; MARTINS, G.; CEZARINO, L. O.; SCANAVEZ, P. H. F.; MARTINS, J. C.; DE MATOS, L. C. Análise de viabilidade econômica da geração de energia elétrica por biomassa provinda de propriedades rurais. **Revista de Gestão e Secretariado**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 1258–1279, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v13i3.1400>.

MOREIRA, J. R. S. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2. Ed — Rio de Janeiro: LTC, 2021.

NASCIMENTO, C. A. *et al.* **Aplicações do Cavaco de Madeira na Indústria: Uma Revisão Abrangente**. Rio de Janeiro: Editora Z, 2016.

PETRY JUNIOR, O.; LUIZ, L. dos S.; CARDOSO, R.; FIGUEIREDO, R. M. de. Estudo de viabilidade de implementação



para um sistema de geração de energia híbrida em propriedades rurais. In: **IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/sbse.v2i1.2951.1>.

POÇAS, C. C. C.; LEAL, A. D. L.; BARBOSA JÚNIOR, J. A. F.; SOUZA FILHO, A. J. T. de. Análise de variáveis para otimização de sistemas a biodigestores e produção de energia elétrica. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 22345–22352, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-433>.

SILVA, A. B. *et al.* **Utilização de Cavaco de Madeira na Indústria: Um Estudo de Caso**. São Paulo: Editora Y, 2020.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.