UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

GERMÁN DARÍO PICÓN LESCANO

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO UTILIZANDO BIOELETRICIDADE DE BIOGÁS DE VINHAÇA

Guaratinguetá

2024

GERMÁN DARÍO PICÓN LESCANO

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO UTILIZANDO BIOELETRICIDADE DE BIOGÁS DE VINHAÇA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá

2024

Lescano, Germán Darío Picón
L654a Análise técnica e econômica para implantação de um sistema de produção de biohidrogênio utilizando bioeletricidade de biogás de vinhaça / Germán Darío Picón Lescano - Guaratinguetá, 2024.
89 f : il.
Bibliografia: f. 86-89

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

1. Hidrogênio como combustível. 2. Biogás.
3. Eletrólise. 4. Análise energética. I. Título.

CDU 620.91(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa sobre o uso do biogás da vinhaça para produzir biohidrogênio pode ter grande impacto nas indústrias de açúcar e etanol, promovendo a transição para fontes de energia mais sustentáveis e de menor impacto ambiental. A conversão do biogás em bioeletricidade para produzir biohidrogênio torna o uso dos recursos energéticos nas usinas mais eficiente, reduzindo dependência de energia externa e geração de resíduos. Essa tecnologia autossustentável pode diminuir custos operacionais e ampliar a produção de energia renovável, com potencial de reduzir emissões de gases de efeito estufa e de gerar novas receitas. Com aplicações também em outras usinas de biomassa, como milho e beterraba, essa pesquisa posiciona o Brasil como líder em bioenergia sustentável, beneficiando o meio ambiente e a economia.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research on using biogas from vinasse to produce biohydrogen could have a significant impact on the sugar and ethanol industries, promoting the transition to more sustainable, environmentally-friendly energy sources. Converting biogas into bioelectricity to produce biohydrogen makes energy use in plants more efficient, reducing dependency on external energy sources and waste generation. This self-sustaining technology can lower operational costs and expand renewable energy production, with potential to reduce greenhouse gas emissions and generate additional revenue. With applications in other biomass-based plants, such as corn and beet, this research positions Brazil as a leader in sustainable bioenergy, benefiting both the environment and the economy.

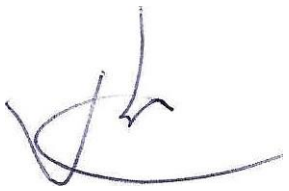
GERMÁN DARÍO PICÓN LESCANO

Análise Técnica e Econômica para Implantação de um Sistema de Produção de Biohidrogênio utilizando Bioeletricidade de Biogãs de Vinhaça da Indústria Sucroalcooleira

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 18/10/2024

Banca Examinadora:



Prof. Dr. JOSE LUZ SILVEIRA
Orientador - UNESP



Prof. Dr. RONNEY ARISMEL MANCEBO BOLOY
CEFET



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP

DADOS CURRICULARES

GERMÁN DARÍO PICÓN LESCANO

NASCIMENTO 02.06.1998 – QUITO/EQUADOR

FILIAÇÃO Jorge Iván Picón Muñoz

Rosario Concepción Lescano Villacís

2016/2021 Curso de Graduação Engenharia Eletrônica -

Universidad San Francisco de Quito

A toda minha família e amigos, em especial meu pai Jorge Ivan Picón Muñoz e minha mãe Rosario Concepción Lescano Villacís

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar sempre pelo caminho que devo seguir, para encontrar meu propósito e razão de existir.

Agradeço aos meus pais, Rosario Concepción Lescano Villacís e Jorge Iván Picón Muñoz, por me derem a vida, por sempre me orientarem com sabedoria, paciência e muito amor, por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos e lutar pelo que quero, sem eles não teria saído do meu país e não estaria agora terminando meu mestrado, esta conquista é nossa.

A todos os meus familiares e amigos do Equador, que sempre acreditaram em mim e me mandaram ânimo para seguir em frente.

E aos meus amigos do Brasil, minha família na República Masmorra, que fizeram com que minha estadia nesses dois anos fosse uma das melhores experiências da minha vida.

Aos meus colegas no IPBEN, que souberam me orientar, me dar conselhos e contribuíram enormemente para que este trabalho fosse concluído.

Ao meu orientador, José Luz Silveira, por me dar a oportunidade primeiro de realizar um estágio e posteriormente por me incentivar a continuar com o mestrado, por me permitir trabalhar e desenvolver pesquisas no instituo de pesquisa em Bioenergia IPBEN, e por sua amizade, empatia, incentivo e orientação para que meu trabalho fosse realizado com sucesso,

Por último, agradeço à Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, campus de Ciências e Engenharia de Guaratinguetá, por me receber de braços abertos e permitir que eu realize meu mestrado aqui no Brasil.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“Faça as coisas o mais simples que você puder, porém não se restrinja às mais simples.”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da implementação de um sistema, composto por um eletrolisador conectado a um conjunto gerador de bioeletricidade que opera com biogás de vinhaça, para a produção de biohidrogênio. Dados sobre a produção total de etanol em todas as regiões do Brasil foram coletadas, para estudar o estado com o maior potencial de geração de vinhaça, sendo que no final duas usinas no estado de São Paulo foram escolhidas. Um estudo da possibilidade de obter biogás da produção de vinhaça das usinas foi feito e posteriormente, foi analisada a viabilidade de implementar o sistema de geração de biohidrogênio em suas instalações. Em seguida, foram realizadas análises de aplicações da análise energética para estimar o potencial da produção de bioeletricidade e biohidrogênio junto com a eficiência geral do processo, o que permitiu a construção de um Diagrama de Sankey para todos os casos de estudo; também, foi determinado o custo de produção de bioeletricidade por meio de um conjunto motor/gerador e o custo de produção de biohidrogênio por meio da eletrólise utilizando a eletricidade obtida do conjunto motor/gerador usando biogás de vinhaça da indústria de açúcar/álcool do Brasil, como função do período de retorno, período equivalente de utilização e taxa de juros anual. Como conclusão, são demonstrados o nível de eficiência e os custos de produzir um vetor energético como o biohidrogênio, utilizando um resíduo comum, como é a vinhaça da indústria de produção de açúcar e etanol. Também é demostrado a viabilidade do sistema para ser implementado em qualquer usina de açúcar ou etanol, porque que é autossustentável, produzindo a própria energia que alimenta o eletrolisador que gerará o biohidrogênio.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio Renovável; Biogás de vinhaça; Eletrólise; Análise Energética; Análise Econômica

ABSTRACT

This work focuses on studying the implementation of a system, composed of an electrolyzer connected to a bioelectricity generator set operating with vinasse biogas, to produce biohydrogen. Data on total ethanol production in all regions of Brazil were collected to study the state with the greatest potential for vinasse generation, selecting two plants in the state of São Paulo. A study of the possibility of obtaining biogas from the vinasse production of the plants was conducted, and subsequently, the feasibility of implementing the biohydrogen generation system at their facilities was analyzed. The following analyses were then performed: application of energy analysis for biohydrogen production and energy efficiency of the process, which allowed the construction of a Sankey Diagram for both case studies; also, the cost of electricity production through the generator set and the cost of biohydrogen production through electrolysis using electricity obtained from the generator set using vinasse biogas from the sugar/alcohol industry in Brazil were determined as a function of the payback period, equivalent utilization period, and annual interest rate. In conclusion, the level of efficiency and attractive costs of producing an energy source like biohydrogen using a common waste, such as sugar and ethanol production vinasse, are demonstrated. The viability of the system to be implemented in any sugar or ethanol plant is also demonstrated because it is self-sustaining, producing the energy that powers the electrolyzer that generates the biohydrogen.

KEYWORDS: Biohydrogen; Bioelectricity; Vinasse Biogas; Electrolysis; Energetic Analysis; Economic Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Potencial de geração de hidrogênio verde no Brasil. 23
Figura 2: Processo de produção de vinhaça de cana de açúcar 26
Figura 3: Diagrama esquemático do reator contínuo de tanque agitado 31
Figura 4: Diagrama esquemático do reator de membrana anaeróbico 31
Figura 5: Diagrama esquemático do reator de biomassa anaeróbico horizontal imobilizado .. 32
Figura 6: Diagrama esquemático do reator de fluxo ascendente com lodo granular 33
Figura 7: Diagrama esquemático do reator de leito fixo de fluxo ascendente 33
Figura 8: Diagrama esquemático do reator de leito fixo 34
Figura 9: Diagrama esquemático do reator anaeróbio de leito fluidizado 35
Figura 10 Representação esquemática do processo de eletrólise. 38
Figura 11: Modelo HySTAT 600, Hydrogenics 40
Figura 12: Modelo CG260-16, Caterpillar. 41
Figura 13: Fluxograma do processo de bioeletricidade 50
Figura 14: Fluxograma do processo de eletrólise para produção de biohidrogênio. 52
Figura 15: Fluxograma do processo de produção de biohidrogênio utilizando a bioeletricidade produzida pelo conjunto motor/gerador. 54
Figura 16: Diagrama SANKEY do balanço energético do conjunto motor/gerador. (caso de estudo São José da Estiva) 57
Figura 17: Diagrama SANKEY do balanço energético do conjunto motor/gerador (caso de estudo São Manoel) 57
Figura 18: Diagrama SANKEY do balanço energético do processo de eletrólise para produção de biohidrogênio em kW (caso de estudo São José da Estiva) 60
Figura 19: Diagrama SANKEY do balanço energético do processo de eletrólise para produção de biohidrogênio em kW (caso de estudo São Manoel) 60
Figura 20: Diagrama SANKEY do balanço energético do processo completo em kW (caso de estudo São José da Estiva) 63
Figura 21: Diagrama SANKEY do balanço energético do processo completo em kW (caso de estudo São Manoel) 64
Figura 22: Técnica para estimar os custos de investimento em sistemas térmicos. 68
Figura 23: Curva Custo x Potência para determinar o custo de investimento do conjunto motor/gerador. 69

Figura 24: Custo de produção de Bioeletricidade com base no custo do biogás (caso de estudo São José da Estiva). 70
Figura 25: Custo de produção de Bioeletricidade com base no custo do biogás (caso de estudo São Manoel). 71
Figura 26: Curva Custo x Potência para determinar o custo de investimento do eletrolisador. 75
Figura 27: Custo da bioeletricidade produzida pela usina São José da Estiva. 78
Figura 28: Custo da bioeletricidade produzida pela usina São Manoel. 78
Figura 29: Receita anual esperada da produção de Bioeletricidade a partir do conjunto motor/gerador utilizando a energia fornecida pela usina São José da Estiva. 79
Figura 30: Receita anual esperada da produção de Bioeletricidade a partir do conjunto motor/gerador utilizando a energia fornecida pela usina São Manoel. 80
Figura 31: Custo de produção de Biohidrogênio pela usina São José da Estiva. 81
Figura 32: Custo de produção de Biohidrogênio pela usina São Manoel. 82
Figura 33: Receita anual esperada da produção de Biohidrogênio a partir da Bioeletricidade fornecida pela usina São José da Estiva. 83
Figura 34: Receita anual esperada da produção de Biohidrogênio a partir da Bioeletricidade fornecida pela usina São Manoel. 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais produtos da fase de acidogênese 28
Tabela 2: Tipos de Hidrogênio 37
Tabela 3: Catálogo da Estação de Hidrogênio HySTAT™ 40
Tabela 4: Especificações e características do modelo HySTAT 600. 41
Tabela 5: Especificações do motor CG260-16 42
Tabela 6: Especificações do motor CG260-16 com 75% de carga. 42
Tabela 7: Produção média anual de etanol total por região (safra 22/23). 45
Tabela 8: Vazão de biogás da região Centro-Oeste e Sudeste. 46
Tabela 9: Fluxo mássico de biogás de vinhaça para cada região selecionada. 47
Tabela 10: Potencial de geração de energia para a região Centro-Oeste e Sudeste. 48
Tabela 11: Taxa de vazão de biogás para ambas as plantas. 48
Tabela 12: Potência energética fornecida pelo combustível utilizando 100% da produção total de etanol das duas usinas. 49
Tabela 13: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador a partir do combustível fornecido pelas usinas. 55
Tabela 14: Balanço energético do processo de produção de bioeletricidade (caso de estudo São José da Estiva). 56
Tabela 15: Balanço energético do processo de produção de bioeletricidade (caso de estudo São Manoel). 56
Tabela 16: Fluxo mássico de biogás das duas usinas. 58
Tabela 17: Parâmetros do eletrolisador. 58
Tabela 18: Balanço energético do processo de produção de biohidrogênio (caso de estudo São José da Estiva) 59
Tabela 19: Balanço energético do processo de produção de biohidrogênio (caso de estudo São Manoel) 59
Tabela 20: Fluxo mássico de biohidrogênio e potência energética fornecida pela produção de biohidrogênio de ambas as usinas. 61
Tabela 21: Eficiência global do processo completo (Geração de Bioeletricidade e Produção de Biohidrogênio). 61
Tabela 22: Potência de biohidrogênio obtida a partir da potência energética fornecida pelo combustível. 62
Tabela 23: Erro Percentual entre a potência elétrica do biohidrogênio real e teórico. 63

Tabela 24: Taxa de juros anual e período de retorno. 67
Tabela 25: Custo de motores de combustão interna. 68
Tabela 26: Parâmetros fixos para cálculo do custo de investimento do conjunto motor/gerador. 72
Tabela 27: Parâmetros utilizados para custo de operação do eletrolisador com dimensões corrigidas. 73
Tabela 28: Custo estimado dos eletrolisadores usando a Eq. (32). 74
Tabela 29: Parâmetros utilizados para o rendimento anual projetado do sistema de produção de biohidrogênio com dimensões corrigidas. 77
Tabela 30: Custo de investimento do conjunto motor/gerador. 77
Tabela 31: Custo de investimento para o eletrolisador HySTAT 600. 81
Tabela 32: Parâmetros fixos para cálculo do rendimento anual projetado. 83

LISTA DE SÍMBOLOS

A_t	Valor real no período t	[-]
C	Custo estimado de implementação da planta	[USD]
C_{comb}	Custo do combustível	[USD/kWh]
C_{el}	Tarifa da eletricidade para processos industriais	[USD/kWh]
C_{eletro}	Custo do eletrolisador com base na sua produção de hidrogênio	[US$]
$C_{el.MCI}$	Custo da bioeletricidade produzida pelo conjunto motor/gerador	[USD/kWh]
C_{H_2}	Preço de venda do biohidrogênio produzido	[USD/kWh]
$C_{H_2.eletro}$	Custo da produção de biohidrogênio por eletrólise	[USD/kWh]
C_{H_2O}	Custo da água fornecida	[USD/kg]
$C_{man_{eletro}}$	Custo de manutenção do eletrolisador	[USD/kWh]
$C_{man_{MCI}}$	Custo de manutenção do conjunto motor/gerador	[USD/kWh]
$C_{op_{eletro}}$	Custo de operação do eletrolisador	[USD/kWh]
C_R	Custo de referência do equipamento	[US$]
E_{comb}	Potência fornecida pelo combustível	[kW]
E_{H_2}	Potência fornecida pelo biohidrogênio	[kW]
E_{MCI}	Potência elétrica de catálogo do conjunto motor/gerador	[kW]
$E_{p.MCI}$	Potência produzida pelo conjunto motor/gerador	[kW]
$E_{req_{eletro}}$	Potência requerida no eletrolisador	[kW]
E_{tge}	Potência térmica dos gases de exaustão	[kW]
E_{ttj}	Potência térmica transferida para jaqueta	[kW]
E_{UPT}	Variável única de potência térmica	[kW]
ϵ_P	Erro percentual	[%]
f	Fator de anuidade	[1/ano]
H	Período equivalente de utilização do sistema	[h/ano]
h_{ar}	Entalpia do ar a 25°C	[kJ/kg]
i	Taxa de juros anual	[%]
I_{eletro}	Investimento no eletrolisador	[USD]
I_{MCI}	Investimento no conjunto motor/gerador	[USD]

k	Período de retorno do investimento	[anos]
m	Fator de correção para determinação do custo estimado.	[-]
m_{ar}	Fluxo de massa de ar	[kg/s]
M_{biogas}	Massa específica do biogás de vinhaça	[kg/m^3]
$m_{biogas.p}$	Fluxo volumétrico de biogás produzido	[m^3/h]
$m_{biogas.MCI}$	Fluxo mássico de biogás no conjunto motor/gerador	[kg/s]
m_{comb}	Fluxo mássico de combustível	[kg/s]
m_{H_2}	Fluxo mássico de biohidrogênio produzido	[kg/s]
m_{H_2O}	Fluxo mássico de água no eletrolisador	[kg/h]
η_{eletro}	Eficiência elétrica do eletrolisador	[%]
$\eta_{el.MCI}$	Eficiência elétrica do conjunto motor/gerador	[%]
$\eta_{eletro.MCI}$	Eficiência global do processo completo	[%]
PCI_{biogas}	Poder calorífico inferior do biogás	[kJ/kg]
PCI_{comb}	Poder calorífico inferior do combustível	[kJ/kg]
PCI_{H_2}	Poder calorífico inferior do biohidrogênio	[kJ/kg]
$Perdas$	Referentes à energia perdida no sistema	[kW]
P_{H_2}	Capacidade de produção de biohidrogênio	[Nm^3/h]
P_t	Previsão no período t	[-]
S	Especificação do equipamento	[kW]
S_R	Referência de uma especificação para o sistema necessário	[kW]
$R_{H_2.electro}$	Receita anual esperada da produção de biohidrogênio com base no retorno do investimento	[USD/ano]
$R_{el.MCI}$	Receita anual esperada da produção de bioeletricidade com base no retorno do investimento	[USD/ano]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAC	Captura e Armazenamento de Carbono
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DA	Digestão Anaeróbica
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EQ	Divisão Eletroquímica
FEQ	Divisão Foto Eletroquímica
H_2	Hidrogênio Gasoso
H_2S	Sulfeto de Hidrogênio
MCI	Motor de Combustão Interna
O_2	Oxigênio Gasoso
PCI	Poder Calorifico Inferior
RVM	Reforma a Vapor de Metano
TS	Total de Sólidos
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar

LISTA DE SUBSCRITOS

biogas	Biogás de Vinhaça
comb	Combustível
el	Eletricidade
eletro	Eletrolisador
H_2	Biohidrogênio
H_2O	Água
man	Manutenção
MCI	Motor de combustão interna
op	Operação
p	Produzido
R	Referência
req	Requerido
t	Período

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 22
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 22
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 23
1.3 OBJETIVOS 25
1.3.1 Objetivo Geral 25
1.3.2 Objetivos Específicos 25
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA 26
2.1 BIOGÁS DE VINHAÇA 26
2.1.1 Vinhaça 26
2.1.2 Biogás 27
2.1.3 Configurações de reatores para biodegradação de vinhaça em biogás 30
2.2 HIDROGÊNIO 35
2.2.1 Tipos de hidrogênio 36
2.3 ELETROLISE 37
3. SISTEMA PROPOSTO DE GERAÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO A PARTIR DE BIOGÁS DE VINHAÇA 39
3.1 ELETROLISADOR 39
3.2 CONJUNTO MOTOR/GERADOR. 41
3.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA 43
4. ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGAS DE VINHACA NA INDÚSTRIA SUCRO-ALCOOLEIRA DO BRASIL 44
4.1 INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA DO BRASIL 44
4.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ETANOL NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA DO BRASIL 44
4.3 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE VINHAÇA NAS REGIÕES CENTRO-OESTE E SUDESTE DO BRASIL 45
5. ESTUDO DA CAPACIDADE DO BIOGAS PARA GERAR ELETRICIDADE NAS USINAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA 47
5.1 POTÊNCIA ENERGÉTICA FORNECIDA PELO COMBUSTÍVEL (BIOGÁS DE VINHAÇA) 47
5.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO MAIS ELEVADO NA REGIÃO SUDESTE 48
5.3 POTENCIAL ENERGÉTICO DAS USINAS DE AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO 49

6. ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO USANDO BIOELETRICIDADE DO CONJUNTO MOTOR/GERADOR..... 50
6.1 BALANÇO ENERGÉTICO DO CONJUNTO MOTOR/GERADOR PARA O PROCESSO DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE 50
6.2 BALANÇO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO..... 52
6.3 ANÁLISE ENERGÉTICA DO SISTEMA COMPLETO (PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE E BIOHIDROGÊNIO) 54
6.4 RESULTADO DO ANÁLISE ENERGÉTICO 55
6.4.1 Resultados do balanço energético do conjunto motor/gerador para o processo de geração de bioeletricidade 55
6.4.2 Resultados do balanço energético do processo de eletrólise para a produção de biohidrogênio. 58
6.4.3 Resultados do balanço energético do sistema completo (geração de bioeletricidade com produção de biohidrogênio). 61
7. ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO USANDO BIOELETRICIDADE DO CONJUNTO MOTOR/GERADOR..... 66
7.1 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE 66
7.2 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO (PROCESSO DE ELETRÓLISE ALIMENTADO COM BIOELETRICIDADE)..... 72
7.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA 77
7.3.1 Resultado da Análise Econômica do processo de geração de bioeletricidade..... 77
7.3.2 Resultado da Análise Econômica do processo de geração de biohidrogênio 81
8. CONCLUSÕES..... 86
REFERENCIAS 88

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

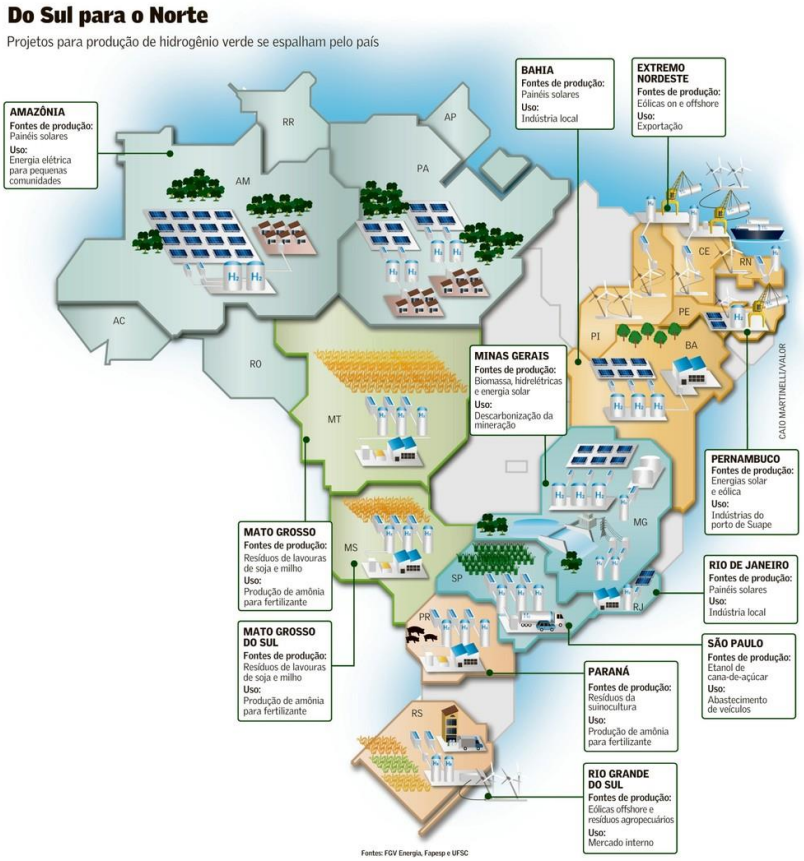
Nos últimos anos, tem-se observado um aumento na demanda por fontes de energia mais sustentáveis, devido à redução das reservas de petróleo e gás natural. A busca por soluções destinadas a mitigar ou eliminar as emissões de gases de efeito estufa tem levado nações dotadas de infraestrutura substancial de geração de recursos a explorar caminhos alternativos.

Nesse contexto, temos o Brasil. Este país tem um grande potencial em termos de produção de energia, conseguindo ter entre 70 e 80% de sua matriz energética proveniente de fontes renováveis (BELINCANTA *et al.*, 2016). Isso levou pesquisadores e cientistas a estudarem diferentes formas de obter energia.

Aqui é onde o hidrogênio entra, uma substância que é abundante em nosso planeta, mas que pouco ou nada soubemos como aproveitar ao máximo. Atualmente, mais de 96% do hidrogênio produzido globalmente é proveniente da refinação de hidrocarbonetos, processos altamente poluentes (JU *et al.*, 2018). No restante 4%, encontra-se o hidrogênio verde, ou também chamado hidrogênio eletrolítico, porque o processo usado para sua obtenção é a eletrólise da água.

O Brasil reúne condições para se tornar um dos líderes na produção de hidrogênio verde explorando diferentes rotas para obtenção do gás. O país está se destacando no cenário mundial de energias renováveis com seu potencial para produzir quase 2 bilhões de toneladas de hidrogênio verde (KONCHINSKI V., 2023). Esse recurso, tornou-se uma alternativa promissora e sustentável em meio ao cenário de transição energética no mundo que ainda é fortemente baseada em combustíveis fósseis, o que torna a busca por fontes renováveis de energia uma prioridade urgente. Nesse contexto, o Brasil mostra-se, não apenas pela extensa rede de hidrelétricas em operação, mas também pelo crescimento significativo das energias solar e eólica nos últimos anos. Na figura 1, distingue-se o mapa do Brasil com alguns dos projetos atuais de geração de hidrogênio verde ao longo do território.

Figura 1: Potencial de geração de hidrogênio verde no Brasil.



Fonte: recuperado de (KONCHINSKI V., 2023).

Neste trabalho sugere-se o uso de energias renováveis para obtenção do hidrogênio verde, para que diminua as emissões de poluentes e se torne uma fonte de energia viável e atrativa. O objetivo do trabalho será estudar a implantação de um sistema de geração de eletricidade proveniente da queima biogás de vinhaça como fonte de energia num motor de combustão interna (PRENZIER *et al.*, 2011). De modo que a eletricidade gerada seja usada num eletrolisador para gerar o hidrogênio verde. Com o sistema proposto são efetuados estudos energéticos e econômicos do processo para determinar a viabilidade de gerar o hidrogênio a partir do biogás de vinhaça.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho de Dissertação foi dividido em oito capítulos, os quais são descritos resumidamente a seguir.

- Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma introdução sobre o assunto estudado, a estrutura do trabalho e seus objetivos.

- Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Este capítulo é a síntese do trabalho de pesquisa durante os dois anos de mestrado, onde se entende o porquê de realizar a dissertação baseado em um sistema de geração de hidrogênio verde usando eletricidade de biogás de vinhaça.

- Capítulo 3 – SISTEMA PROPOSTO DE GERAÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO A PARTIR DE BIOGÁS DE VINHAÇA

Aqui se tem uma breve introdução ao sistema proposto que será explicado de melhor forma nos seguintes capítulos. Aqui são apresentados os sistemas escolhidos para a efetuar as análises técnicas e econômicas, que são o conjunto motor/gerador para produção da bioeletricidade e o eletrolisador para a produção do biohidrogênio.

- Capítulo 4 – ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS DE VINHAÇA NA INDÚSTRIA SUCRO-ALCOOLEIRA DO BRASIL

Este capítulo refere-se ao estudo da indústria sucro-alcooleira do Brasil. Onde o estudo do potencial de geração etanol de cada região do Brasil foi feito, usando dados reais das produções anuais de cada região. Depois foi estudado a capacidade de produção de biogás a partir da vinhaça produzida em cada região. Dois estados foram selecionados com fim de ter uma vista mais especifica da virtual implantação de um sistema gerador de biohidrogênio em alguma usina que se encontrasse nesse estado.

- Capítulo 5 – ESTUDO DA CAPACIDADE DO BIOGAS PARA GERAR ELECTRIDADE NAS USINAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo, é analisado de forma mais especifica as regiões escolhidas no capítulo anterior, onde posteriormente são escolhidas duas usinas no estado de São Paulo. Com dados reais de produção de etanol e vinhaça das usinas é possível obter a capacidade estimada de gerar a bioeletricidade que requer o eletrolisador.

- Capítulo 6 - ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO USANDO BIOELETRICIDADE DO CONJUNTO MOTOR/GERADOR

Este capítulo apresenta análise termodinâmica para determinar a eficiência energética do processo de produção de bioeletricidade e biohidrogênio, a fim de determinar se o sistema é viável tecnicamente.

- Capítulo 7 - ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO USANDO BIOELETRICIDADE DO CONJUNTO MOTOR/GERADOR

Neste capítulo é efetuada análise econômica do processo, a fim de determinar os custos de investimentos, operação, manutenção e produção de bioeletricidade e depois de biohidrogênio (em USD/kWh em função do tempo de amortização do capital investimento) de cada processo, para determinar se o sistema é viável economicamente.

- Capítulo 8 – CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as considerações finais e conclusões obtidas através dos resultados do processo estudado; onde também são feitas sugestões para trabalhos futuros.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise técnica e econômica da produção de biohidrogênio utilizando a bioeletricidade obtida a partir do biogás de vinhaça.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar o potencial de geração de bioeletricidade a partir do biogás de vinhaça produzido na indústria sucro-alcooleira;
- Compreender o processo de eletrólise da água operando com bioeletricidade;
- Analisar a eficiência energética da produção de biohidrogênio;
- Determinar o custo de produção de biohidrogênio.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

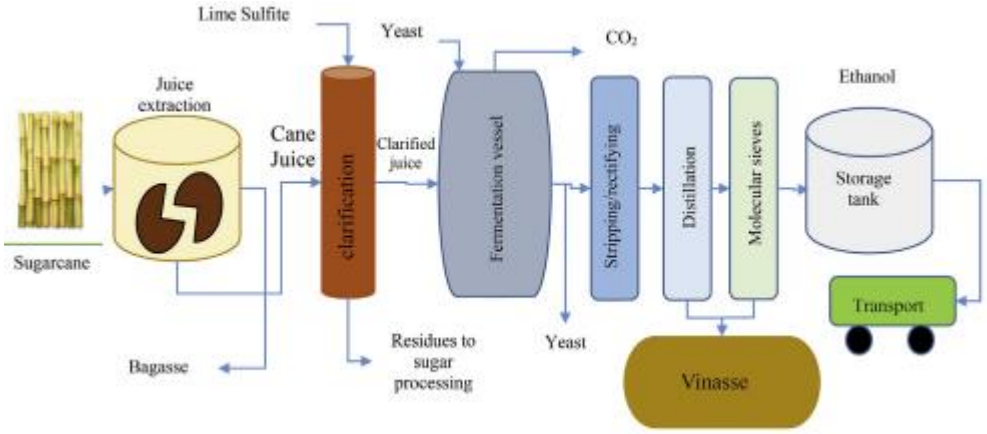
2.1 BIOGÁS DE VINHAÇA

2.1.1 Vinhaça

Cada processo industrial gera resíduos que podem ser altamente prejudiciais ao meio ambiente. Se não forem geridos de maneira adequada, esses resíduos podem causar impactos adversos significativos no solo e nas fontes de água, além de contribuir para o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Essa situação resulta em sérias consequências para a qualidade ambiental e a saúde dos ecossistemas. Na indústria de cana-de-açúcar e álcool, temos a vinhaça, considerada o principal contaminante na produção de etanol, pois é um efluente severo e recalcitrante. Suas propriedades variam amplamente dependendo da composição de seus elementos, bem como das condições operacionais usadas na planta de produção de etanol.

A especificidade da vinhaça à base de cana-de-açúcar depende da melasse utilizada, do tipo de fermentação e destilação empregados, assim como da variedade e maturidade da cana-de-açúcar. Trata-se de um líquido produzido na unidade de retificação e destilação na produção de bioetanol, cujo processo de produção é mostrado na figura 2.

Figura 2: Processo de produção de vinhaça de cana de açúcar



Fonte: recuperado de (PARSAEE *et al.*, 2019)

A vinhaça é obtida no processo de destilação especificamente, a temperaturas entre 65 ºC, em processos de vácuo, e 107 ºC, em processos de destilação atmosférica, com um pH entre 3 e 5, o que também depende muito das condições de cultivo e colheita da cana-de-açúcar. Agora, a maioria dos componentes da vinhaça é matéria orgânica, cerca de

75%, incluindo substâncias não fermentáveis como glicose e frutose (PARSAEE *et al.*, 2019), produtos fermentados que não podem ser separados durante a destilação, como glicerol e ácidos orgânicos, e levedura residual que não pode ser separada durante o processo industrial.

A vinhaça exibe uma alta concentração de sólidos e uma demanda química de oxigênio significativa (DQO). Essa DQO representa a quantidade de oxigênio necessária para decompor quimicamente a matéria orgânica; materiais orgânicos com alto teor de DQO podem ser transformados em biogás (BUDIYONO *et al.*, 2014). O conteúdo total de sólidos (TS) na vinhaça pode variar com base em diferentes referências, algumas indicando uma faixa de 63.000 a 79.000 mg/L, enquanto outras sugerem um valor de 100.000 mg/L (SYAICHURROZI, 2016). Na verdade, a vinhaça pode conter níveis ainda mais altos, chegando a 299.250 mg/L (BUDIYONO *et al.*, 2014). Devido a essas quantidades substanciais de sólidos, a vinhaça não deve ser descarregada em corpos de água, como rios ou mares, pois seu alto teor de DQO pode reduzir a concentração de oxigênio, representando uma ameaça para organismos e ecossistemas aquáticos (SYAICHURROZI, 2016).

2.1.2 Biogás

Existem diversos métodos para tratar esses resíduos orgânicos, mas a digestão anaeróbica (DA) tem se mostrado muito útil em grande escala. Este é um método em que os componentes orgânicos complexos são biologicamente convertidos por meio da fermentação, na qual o ambiente carece de oxigênio, em vários compostos, incluindo metano, dióxido de carbono, amônia, água, entre outros produtos químicos. A DA de vinhaça pode ser usada para estabilizar a matéria orgânica e produzir biogás. Sulfatos e a maioria da matéria orgânica são removidos, enquanto alguns componentes voláteis e nutrientes (potássio, nitrogênio e fósforo) são separados. Usando esse método, o conteúdo de enxofre na vinhaça pode ser reduzido para menos de 1%. Isso é importante considerar porque o teor de enxofre na vinhaça é de 4 a 10 vezes maior que a concentração ótima necessária para a produção de biogás (CASSMAN et al., 2018). Isso pode levar à formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S), que, em altas concentrações, afeta a formação de biogás. Depois que o conteúdo de enxofre é reduzido, os demais componentes e o alto teor de matéria orgânica tornam a produção de biogás a partir da vinhaça altamente viável. Também devido à sua falta de lignina, obter biogás de vinhaça é mais simples e rápido do que em outros materiais.

O processo de DA envolve quatro etapas ou fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Essas quatro etapas da DA são essenciais, pois descrevem os processos gerais que explicam a reação química onde o material orgânico é digerido bioquimicamente em dióxido de carbono e metano pelos microrganismos anaeróbios.

- Processo de Hidrólise

É a primeira etapa da DA, onde compostos orgânicos insolúveis, como proteínas, gorduras e carboidratos, são convertidos em compostos solúveis, como aminoácidos e ácidos graxos. A ação das enzimas hidrolíticas facilita essas reações, permitindo o transporte dos constituintes pelas células microbianas. A Equação 1 mostra a reação da hidrólise, onde o material orgânico é convertido em glicose (OBILEKE *et al.*, 2021).

$$C_6H_{10}O_4 + 2H_2O \rightarrow C_6H_{12}0_6 + 2H_2 \quad (1)$$

O processo de hidrólise depende dos seguintes fatores: tamanho e forma do material, área de superfície, acúmulo de biomassa, produção de enzimas e adsorção.

- Processo de Acidogênese

Esta é a segunda etapa de DA, conhecida também como etapa de fermentação. Durante esse processo, os microrganismos convertem a matéria orgânica, produzindo cerca de 30% em álcoois ou ácidos graxos de cadeia curta (FLORIAN GERLACH *et al.*, 2014). Os compostos solúveis da hidrólise são ainda mais reduzidos, gerando dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), ácidos orgânicos, álcoois e alguns compostos de enxofre orgânico. Os principais produtos da fase de acidogênese são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Principais produtos da fase de acidogênese

Nome do Produto	**Fórmula**
Ácido propiônico	CH_3CH_2COOH
Ácido butírico	$CH_3CH_2CH_2COOH$
Ácido acético	CH_3COOH
Ácido fórmico	$HCOOH$
Ácido láctico	$C_2H_6O_3$
Etanol	C_2H_5OH
Metanol	CH_3OH

Fonte: elaboração do próprio autor

No processo de acidogênese, o ácido acético é considerado o principal ácido orgânico devido ao seu papel na formação de metano. Em relação ao pH durante a acidogênese, um pH superior a 5 aumenta a produção de ácidos graxos voláteis, enquanto um pH baixo (menos de 5) resulta na produção de mais etanol. Em pH muito baixo, abaixo de 4, as reações podem parar (FLORIAN GERLACH *et al.*, 2014). Exemplos das reações de acidogênese são mostrados como:

$$C_6H_{12}O_6 \leftrightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2 \quad (2)$$

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \leftrightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O \quad (3)$$

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_3COOH \quad (4)$$

A equação (2) mostra as reações da glicose com o etanol. Nas reações acima, a glicose também é convertida em propionato na equação (3), enquanto na equação (4), a glicose é convertida em ácidos acéticos. Portanto, a glicose é conhecida como o principal produto.

- Processo de Acetogênese

Na terceira etapa da digestão anaeróbia, o hidrogênio desempenha um papel vital. A reação ocorre quando a pressão parcial do hidrogênio é suficientemente baixa devido à formação de ácido através do processo termodinâmico. A redução da pressão parcial resulta da ação de bactérias que consomem hidrogênio. As bactérias acetogênicas produzem acetato, hidrogênio e dióxido de carbono a partir da reação de ácidos graxos voláteis e álcool. Bactérias homoacetogênicas produzem acetato a partir de dióxido de carbono e hidrogênio. O acetato também produz e forma bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio. Os substratos iniciais influenciam o número de produtos da fase de acidificação, que inclui ácidos propiônicos, substratos poliméricos, ácidos graxos de cadeia e ácidos butíricos(OBILEKE *et al.*, 2021). A mistura de ácidos láticos, álcoois e glicerol contribui para a conversão dos substratos pelos micro-organismos acetogênicos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Exemplos das reações de acetogênese são mostrados nas equações (5) a (7).

$$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \leftrightarrow CH_3COO^- + H^- + HCO_3{}^- + 3H_2 \quad (5)$$

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \leftrightarrow 2CH_3COOH + 2C_2O + 4H_2 \quad (6)$$

$$CH_3CH_2OH + 2H_2O \leftrightarrow CH_3COO^- + 2H_2 + H^- \quad (7)$$

Na equação (5), o propionato é convertido em ácido acético e glicose, enquanto o etanol é convertido em ácido acético, nas equações (6) e (7), respectivamente.

- Processo de metanogênese

É conhecida por ser o processo final do processo de DA. Durante este processo, a reação entre o hidrogênio e o ácido acético forma metano e dióxido de carbono. É a etapa mais lenta no processo e é prejudicada por alguns parâmetros operacionais, como temperatura, pH, taxa de carga orgânica e substrato(TORSHA, 2023). Na maioria dos digestores de biogás, menos de 30% do metano se origina da diminuição de dióxido de carbono por metanógenos tróficos de hidrogênio, enquanto os 1–2% restantes do metano são produzidos por metanógenos metiltróficos. Os metanógenos têm um espectro de substrato estreito e são sensíveis à presença de oxigênio(OBILEKE *et al.*, 2021). O processo que produz metano é conhecido como metanização e as reações mostradas nas equações (8) a (10) descrevem o processo.

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (8)$$

$$2C_2H_5OH + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2CH_3COOH \quad (9)$$

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (10)$$

As equações (8) a (10) mostram o processo de reações que produz metano e dióxido de carbono como produtos. Considerando as reações químicas, os produtos são formados no início do processo de digestão.

2.1.3 Configurações de reatores para biodegradação de vinhaça em biogás

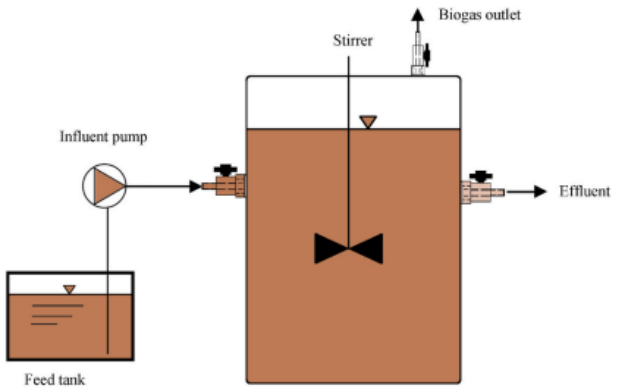
Diferentes configurações de biorreatores têm sido utilizadas para a DA da vinhaça:

- Reator contínuo de tanque agitado (CSTR)

O CSTR é um dos reatores mais comuns utilizados para a produção de biogás, especialmente no tratamento de substratos sólidos. Uma das desvantagens desses reatores é a possibilidade de washout de microrganismos em tempos de residência hidráulica baixos, que podem estar associados a altas taxas de carga orgânica (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022). Quando esses reatores recebem grandes quantidades de matéria orgânica, a acidificação ocorre rapidamente, resultando na produção de ácidos graxos voláteis que

inibem o processo de DA. Devido a isso, esse reator é frequentemente utilizado como unidade fermentativa em um processo de DA em duas etapas e é comum na produção de biohidrogênio (REN *et al.*, 2010). O diagrama do CSTR é mostrado na Figura 3.

Figura 3: Diagrama esquemático do reator contínuo de tanque agitado

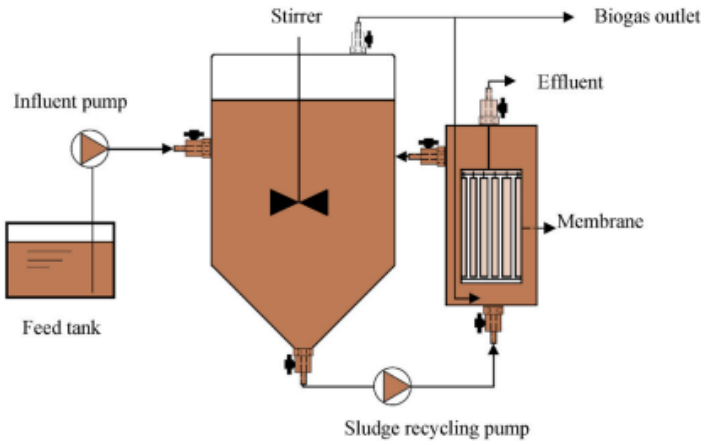


Fonte: Recuperado de (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022)

- Reator de membrana anaeróbico (AnMBR)

No AnMBR, o tratamento é realizado utilizando um filtro de membrana para garantir uma adequada acumulação de biomassa. A estrutura geral desse reator é semelhante à do CSTR, exceto que o AnMBR incorpora um filtro de membrana como um "material de empacotamento" (SHOENER *et al.*, 2016). Essa configuração permite melhorar a retenção de microrganismos, aumentando a eficiência do processo de DA. O diagrama do AnMBR é mostrado na Figura 4.

Figura 4: Diagrama esquemático do reator de membrana anaeróbico

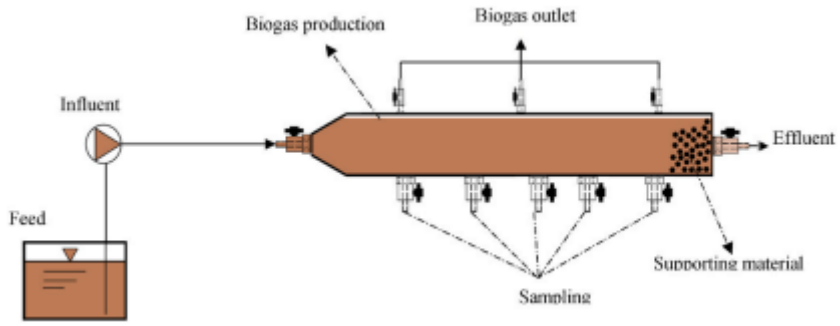


Fonte: Recuperado de (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022)

- Reator de biomassa anaeróbico horizontal imobilizado (HAIB)

O HAIB é um tipo de reator de fluxo horizontal de leito fixo. Sua primeira aplicação foi no tratamento de efluentes em uma indústria de papel (ZAIAT *et al.*, 1997). Para evitar o washout da biomassa nesse reator, são utilizados materiais de suporte, como partículas de poliestireno, espuma de poliuretano e partículas de areia, posicionados antes da saída do reator ou ao longo de sua extensão. A presença desses materiais favorece o crescimento e a retenção de microrganismos, melhorando a eficiência do processo de digestão anaeróbica (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022). O diagrama do HAIB é mostrado na Figura 5.

Figura 5: Diagrama esquemático do reator de biomassa anaeróbico horizontal imobilizado



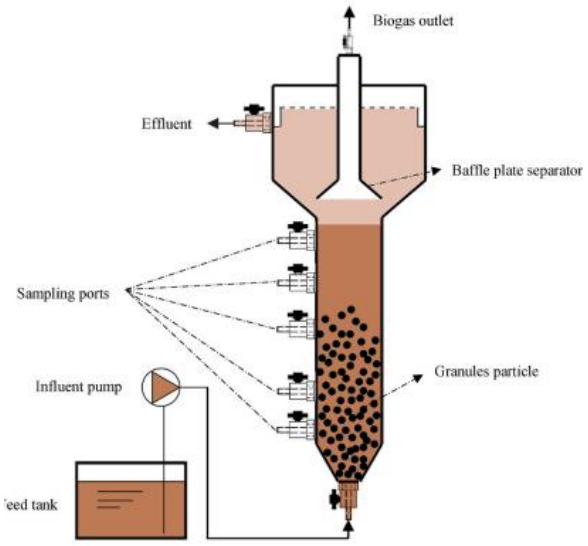
Fonte: Recuperado de (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022)

- Reator de fluxo ascendente com lodo granular (UASB)

O UASB é um dos principais exemplos de reatores de alta taxa utilizados para o tratamento de efluentes industriais. A formação de granulações altamente sedimentáveis, alcançada por meio da aplicação de velocidades de fluxo ascendente adequadas, representa uma alternativa para a retenção de células sem a necessidade de meios de suporte, resultando em unidades mais compactas (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022). Um separador trifásico localizado na parte superior do reator permite a separação e coleta do biogás, além de promover a sedimentação das granulações, obtendo um efluente com baixo teor de sólidos. Este reator demonstra alto desempenho na digestão de efluentes com alto teor de carboidratos, mas é inadequado para efluentes com alto conteúdo de proteínas. O reator produz metano com eficiência máxima, visando alcançar uma qualidade de saída superior com menor produção de lodo. Ele é capaz de converter mais de 50% da carga orgânica (COD) em biogás, que pode ser utilizado como uma fonte de

energia renovável (ESPAÑA-GAMBOA *et al.*, 2012). O diagrama do UASB é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Diagrama esquemático do reator de fluxo ascendente com lodo granular

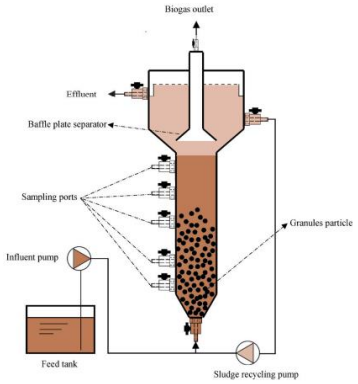


Fonte: Recuperado de (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022)

- Reator de leito fixo de fluxo ascendente (EGSB)

O EGSB é uma versão modificada dos reatores UASB, em ambos os quais se utiliza lodo granular. No entanto, os reatores EGSB operam com uma alta velocidade superficial (7–10 m/h), alcançando uma alta taxa de agitação e uma maior relação altura-diâmetro. Nesse caso, é estabelecido um contato adequado entre o esgoto e o lodo ao longo da altura do reator (LÓPEZ; BORZACCONI, 2011). Esse tipo de reator, similar ao UASB, não requer material de suporte e é construído apenas na forma vertical. O diagrama do EGSB é mostrado na Figura 7.

Figura 7: Diagrama esquemático do reator de leito fixo de fluxo ascendente

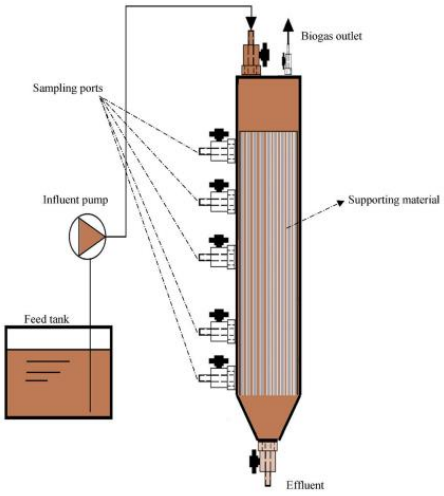


Fonte: Recuperado de (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022)

- Reator de leito fixo (FBR)

Os FBR consistem em dois tipos: reatores ascendentes e descendentes. No tipo descendente, a alimentação é introduzida pela parte superior do reator e sai pela parte inferior após passar pelos materiais de suporte (colocados em cilindros de aço inoxidável ou outro material), sobre os quais se forma uma camada de biofilme. Tipicamente, polietileno, cascalho, grânulos de carvão ativado, cloreto de polivinila e materiais plásticos são utilizados como materiais de suporte para desenvolver a camada de biofilme na superfície do material, separando assim as partículas sólidas e realizando o tratamento biológico (KIANI et al., 2022). No tipo ascendente, o esgoto é bombeado para dentro do reator pela parte inferior e sai pela parte superior após passar pela camada de biofilme. O biogás e o efluente líquido são separados na parte superior do reator. A estrutura matricial do biofilme deve ser mecanicamente estável. Esse tipo de reator é usado tanto para valores altos quanto baixos de TS (YADVIKA *et al.*, 2004). O diagrama do FBR é mostrado na Figura 8.

Figura 8: Diagrama esquemático do reator de leito fixo

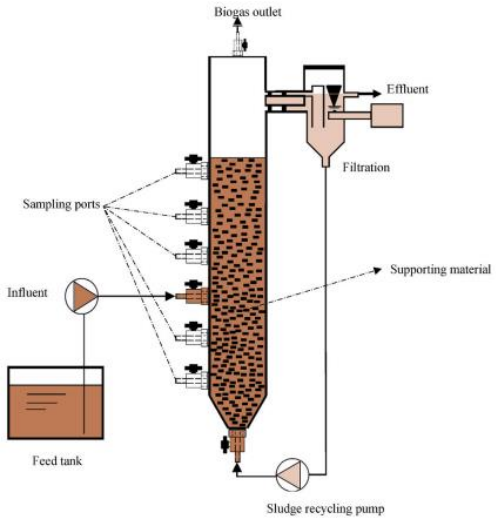


Fonte: Recuperado de (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022)

- Reator anaeróbio de leito fluidizado (AFBR)

Um AFBR é um sistema com material de suporte não fixo ao qual a biomassa adere. O sistema tem sido utilizado recentemente para reduzir a matéria orgânica e sulfatos dos resíduos. Também tem sido usado para tratar águas residuais com alto teor de matéria orgânica. É um dos biorreatores anaeróbios mais úteis (BALAGUER *et al.*, 1992). O diagrama do AFBR é mostrado na Figura 9.

Figura 9: Diagrama esquemático do reator anaeróbio de leito fluidizado



Fonte: Recuperado de (KIANI DEH KIANI *et al.*, 2022)

2.2 HIDROGÊNIO

O hidrogênio (H_2) está sendo cada vez mais reconhecido como um elemento crucial na formação do futuro do cenário energético e na promoção do desenvolvimento sustentável do planeta. O H_2 também é uma das bases da transição energética, pois pode ser usado tanto como portador de energia quanto como matéria-prima. Acredita-se que, até 2050, o H_2 fornecerá 18% da energia para o usuário final, eliminará seis gigatoneladas de emissões de carbono, permitirá quase US$ 2,5 trilhões em vendas e criará quase 30 milhões de empregos em todo o mundo (HASSAN *et al.*, 2024).

Atualmente, 96% do H_2 produzido é hidrogênio cinza, azul e marrom, que vem de produtos de combustíveis fósseis, como a reforma a vapor de gás natural e a gasificação de carvão. Isso libera 830 megatoneladas de CO_2 por ano, o que não é ambiental ou climaticamente amigável (JU *et al.*, 2018). Portanto, os processos requerem a implementação de captura e armazenamento de carbono (CAC) para mitigar suas emissões de carbono. A aplicação de CAC para a gasificação de carvão é uma tentativa complexa, e a tecnologia ainda está nos estágios iniciais de implantação comercial. Existem tecnologias alternativas de produção de H_2, como a gasificação de biomassa e a eletrólise da água, que estão ganhando destaque. No entanto, a eficiência da produção de H_2 enfrenta desafios, especialmente na presença de contaminantes, como alcatrão

proveniente da gasificação de biomassa, que deve ser eliminado. Em contraste, a eletrólise da água oferece uma rota para a produção de H_2 de alta pureza sem emissões de carbono, aproveitando fontes de energia renovável para a geração de hidrogênio verde (PAULINO; SILVEIRA, 2019).

2.2.1 Tipos de hidrogênio

O hidrogênio é classificado em diferentes tons de cores: azul, cinza, marrom, preto e verde, respectivamente, com base em sua tecnologia de produção de hidrogênio, fonte de energia e impacto no ambiente.

- Hidrogênio azul

É produzido a partir da reforma a vapor do gás natural. Durante este processo, o gás natural é dividido em H_2 e CO_2. o CO_2 produzido é capturado entre um 85% e 95%, e é armazenado no subsolo utilizando técnicas industriais de CAC e o resto do CO_2 gerado não pode ser capturado. Além disso, os impactos do armazenamento a longo prazo são incertos e as fugas ainda podem afetar negativamente o ambiente e o clima (AJANOVIC *et al.*, 2022)

- Hidrogênio cinza

É produzido a partir de combustíveis fósseis não renováveis, como o gás natural ou o carvão, através do processo de reforma a vapor/reforma autotérmica, este processo é semelhante ao processo do hidrogénio azul, mas o CO_2 produzido não é capturado, é libertado diretamente. para a atmosfera (SHIVA KUMAR; HIMABINDU, 2019).

- Hidrogénio marrom

É o mais abundante em utilização atualmente, sendo produzido a partir de matérias-primas ricas em hidrocarbonetos (carvão lenhite ou metano) através do processo de gaseificação. Mas, como resultado, cada tom de hidrogénio marrom liberta 10–12 toneladas de CO_2 na atmosfera(AJANOVIC *et al.*, 2022).

- Hidrogênio negro

É produzido a partir da gaseificação do carvão, durante esse processo de gaseificação do carvão são produzidos syngas no gaseificador e o hidrogênio pode ser separado dos demais gases por meio de absorvedores ou membranas especiais e os demais gases podem ser liberados na atmosfera (AJANOVIC *et al.*, 2022).

- Hidrogênio verde

É produzido a partir de água renovável e eletricidade por processo de eletrólise, neste processo a água é dividida em H_2 e O_2 sob a influência da eletricidade com zero emissões de carbono (SHIVA KUMAR; HIMABINDU, 2019). Também se tem que o "hidrogénio verde" é geralmente concebido como H_2 produzido por eletrólise. Embora a definição geral de hidrogênio verde seja estar relacionado com a ausência de emissões de CO_2, ou seja, produzidas através tecnologias que utilizam fontes renováveis ou tecnologias neutras em carbono. Então, o H_2 produzido a partir de biomassa é neutro em termos de CO_2 e pode ser definido como "verde".

Na tabela 2, estão as diferentes cores de hidrogênio com a sua tecnologia, principal fonte de energia, produtos obtidos, custo por quilograma e emissões de CO_2 respectivamente.

Tabela 2: Tipos de Hidrogênio

Cor de H_2	**Tecnologia**	**Fonte**	**Produtos**	**Custo ($ kg/H_2)**	**Emissões de CO_2**
Marrom	Gasificação	Lenhite	$H_2 + CO_2$	1.2 – 2.1	Alta
Preto	Gasificação	Carvão preto	$H_2 + CO_2$	1,2 – 2,1	Alta
Cinza	Reforma a vapor	Gás Natural	$H_2 + CO_2$ (liberado)	1 – 2,1	Média
Azul	Reforma a vapor + CAC	Gás Natural	$H_2 + CO_2$ (recuperado 85% - 95%)	1,5 – 2,9	Baixa
Verde	Eletrolise	Água	$H_2 + O_2$	3,6 – 5,8	Mínima

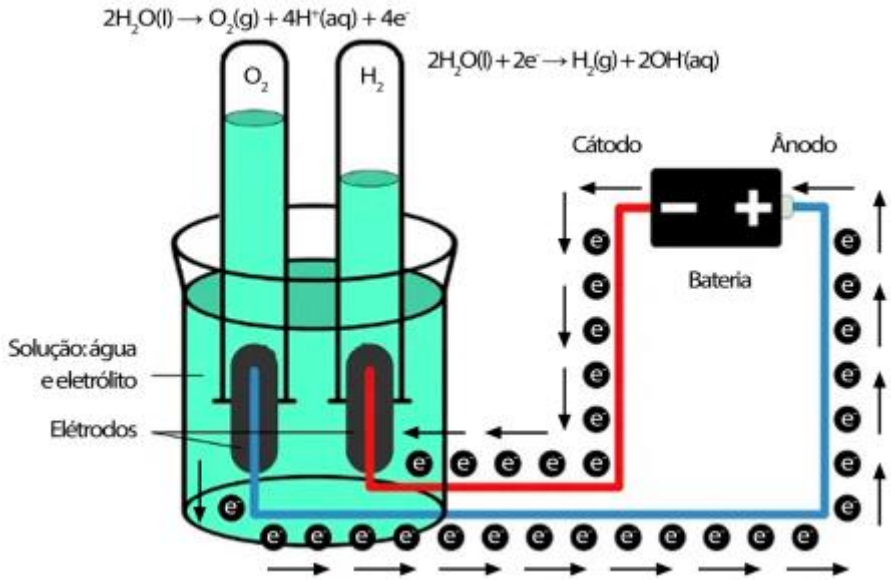
Fonte: adaptado de (SHIVA KUMAR; HIMABINDU, 2019).

2.3 ELETROLISE

A eletrólise da água é uma tecnologia bem conhecida para a produção de H_2 verde há mais de dois séculos e pode ser classificada em duas categorias: a eletroquímica (EQ) e a divisão foto eletroquímica (FEQ). A eletroquímica está relacionada à técnica com o auxílio de eletricidade, enquanto a FEQ utiliza energia solar e elétrica para dividir a água em H_2 e O_2, sendo uma tecnologia isenta de emissões (SHIVA KUMAR; HIMABINDU, 2019).

Agora, para produzir biohidrogênio por meio da eletrólise da água, é necessário um fluxo de corrente elétrica através de um condutor eletrolítico, como materiais alcalinos, poliméricos ou de óxido sólido. Esse processo leva à divisão das moléculas de água em hidrogênio gasoso (H_2) e oxigênio gasoso (O_2). O ânodo facilita a reação de oxidação, resultando na liberação de O_2 da água. O cátodo facilita a reação de redução que captura o H_2 da água. Consequentemente, esse processo gera biohidrogênio com um significativo potencial energético. Vale ressaltar que o biohidrogênio produzido por esse método apresenta alta pureza, pois não gera compostos de carbono, enxofre ou nitrogênio (MACIEL *et al.*, 2023). Na figura 10 amostra-se o diagrama de funcionamento de um eletrolisador.

Figura 10 Representação esquemática do processo de eletrólise.



Fonte: Recuperado de (GOMES, 2022)

É notório que o volume de hidrogênio produzido é o dobro do volume de oxigênio. Se sabe também que a decomposição da água não é termodinamicamente favorável, pois o potencial padrão de uma célula eletrolítica é de -1,229 V a 25 °C. No entanto, o processo é controlado cineticamente, e várias resistências, como energia de ativação, difusão e formação de bolhas, aumentam o potencial necessário, chamado de sobrepotencial. A eletrólise em meio alcalino, com potassa ou soda cáustica e elétrodos separados por um diafragma, é preferida por ser mais eficiente, e o uso de catalisadores pode melhorar ainda mais essa eficiência (GOMES, 2022).

3. SISTEMA PROPOSTO DE GERAÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO A PARTIR DE BIOGÁS DE VINHAÇA

O sistema proposto para este trabalho consiste em um eletrolisador conectado a um conjunto formado por um motor de combustão interna e um gerador de energia elétrica. O conjunto motor/gerador irá gerar energia elétrica a partir da queima do biogás de vinhaça, onde essa energia elétrica produzida irá operar o eletrolisador.

3.1 ELETROLISADOR

Para a seleção do eletrolisador, foram considerados dois parâmetros. O primeiro, a capacidade de produção de biohidrogênio que se precisa para o sistema, que segundo (PAULINO; SILVEIRA, 2019) a capacidade mínima de produção de hidrogénio deverá situar-se entre 500 e 700 Nm^3/h para ser viável em processos industriais. O segundo parâmetro é a potência elétrica requerida pelo eletrolisador, a empresa Caterpillar comercializa motores a biogás de 72 a 3370 kW, então é preciso procurar um eletrolisador com caraterísticas parecidas, de modo que a capacidade elétrica do sistema não produza algum erro entre a parte que gera a bioeletricidade e a parte que gera o biohidrogênio.

A tabela 3 mostra o catálogo da empresa Hydrogenics, com as características dos modelos de eletrolisadores disponíveis comercialmente, com uma potência requerida entre 1000 e 3000 kW e com capacidades de produção de biohidrogênio variando de 4 a 1300 Nm^3/h, sendo a última coluna com os modelos para escala industrial, a melhor escolha para o sistema desejado.

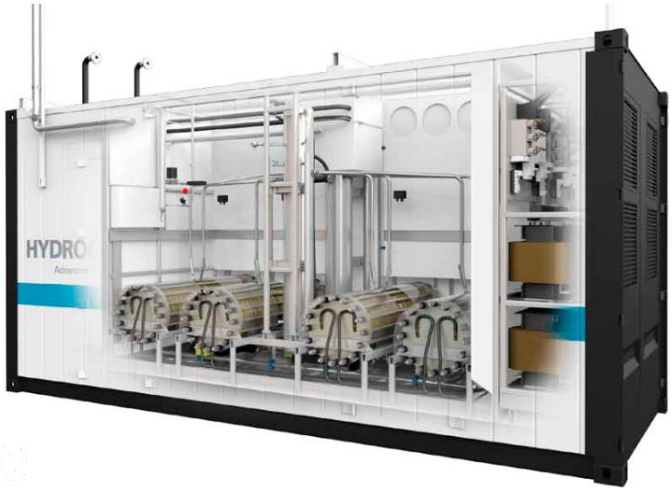
Tabela 3: Catálogo da Estação de Hidrogênio HySTAT™

	HySTAT® 10	**HySTAT® 15**	**HySTAT® 30**	**HySTAT® 60**	**Longa Escala**
Capacidade [Nm^3/h]	4–10	6–15	12–30	24–60	120–1300
Pressão de Operação [bar]	10 ou 25	10	10	10	10
Consumo de Energia Esperado [kWh/Nm^3]	5.0	5.0	5.0	4.9	4.9
Consumo de Água [$1/Nm^3H_2$]	1.5–2.0				
Temperatura Ambiente	+5–40 °C				
Pureza	99.9 % (99.999 % opcional) H_2O Saturado, O_2 < 1,000 ppm				
Tensão e Frequencia	3 × 400/480/575 VAC, 50/60 Hz				
Opções	Sistema de purificação de biohidrogênio, sistema de tratamento de água, sistema de refrigeração				
Dimensões	1.67 × 2.53 × 1.81 m			3.22 × 2.53 × 1.81 m	

Fonte: Catálogo Hydrogenics modelo HySTAT™ (HYDROGENICS, 2017)

Com base na tabela 3, opta-se pelo modelo de eletrolisador HySTAT 600 cuja foto é mostrada na figura 11 e as suas especificações são apresentadas na tabela 4

Figura 11: Modelo HySTAT 600, Hydrogenics



Fonte: recuperado da página 7 do catálogo Hydrogenics (HYDROGENICS, 2017)

Tabela 4: Especificações e características do modelo HySTAT 600.

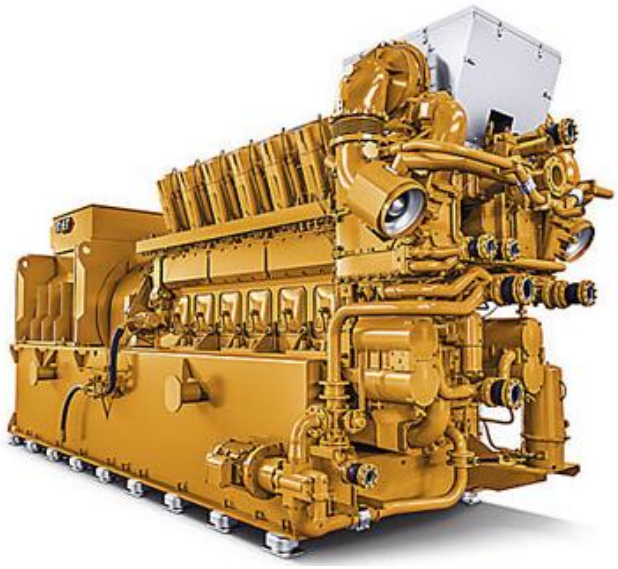
Características	Valor
Capacidade	600 Nm^3/h
Potência Elétrica	2.940 kW
Consumo de água	1,05 m^3/h

Fonte: Catálogo Hydrogenics modelo HySTAT™ (HYDROGENICS, 2017)

3.2 CONJUNTO MOTOR/GERADOR.

Tendo o eletrolisador selecionado, agora é preciso escolher um conjunto motor/gerador para o estudo da produção de bioeletricidade que o eletrolisador vai necessitar. O modelo escolhido é o CG260-16 da Caterpillar (WENDLING, 2020) mostrado na figura 12.

Figura 12: Modelo CG260-16, Caterpillar.



Fonte: recuperado do catálogo Caterpillar(CATERPILLAR, 2018)

O conjunto motor/gerador CG260-16 da Caterpillar é um modelo versátil, capaz de funcionar com diferentes cargas de combustível assim como utilizar diversas fontes de combustível, como gás natural, biogás, gás de carvão, gás associado e gás de síntese (CATERPILLAR, 2018). As principais especificações e características do modelo CG260-16 são fornecidas na Tabela 5:

Tabela 5: Especificações do motor CG260-16

Características	**Valor**		
Carga [%]	100	75	50
Potência elétrica [kW]	4050	3037	2025
Consumo de combustível [W]	9.156.143,96	7.043.271,52	4.989.429,46
Eficiência elétrica [%]	44,3	43,2	40,6
Eficiência térmica [%]	41,8	43,5	46,5
Eficiência total [%]	86,1	86,7	87,1
Emissão NO_x [g/bhph]		0,93	
Frequência [Hz]		50 - 60	
RPM		1000 – 900	

Fonte: Catálogo Caterpillar (CATERPILLAR, 2018)

Neste caso, o motor só funcionará com 75% de carga de forma que a potência de saída seja de 3.037 kW, visto que, como é mostrado na tabela 10, o eletrolisador precisa de um mínimo de 2.940 kW para arrancar. Portanto, utilizar o motor com 100% de carga representaria desperdiçar um bom percentual da potência produzida. Escolhida a carga com a qual o conjunto motor/gerador irá trabalhar, suas características individuais estão representadas na tabela 6

Tabela 6: Especificações do motor CG260-16 com 75% de carga.

Características	**Valor**
Potência elétrica [kW]	3037
Consumo de combustível [W]	7.043.271,52
Eficiência elétrica [%]	43,2

Fonte: Catálogo Caterpillar (CATERPILLAR, 2018)

Observa-se que a eficiência elétrica do modelo possui um valor de 43,2%. Essa eficiência de geração de eletricidade encontrada no catálogo do fabricante é significativamente maior quando comparada à realidade. Alguma literatura menciona que, para sistemas desse tipo de geração de eletricidade usando biogás, a eficiência elétrica decai significativamente. (BRIZI *et al.*, 2014) indica uma eficiência de geração

de eletricidade em torno de 25%, e (YINGJIAN *et al.*, 2014) indica um valor de 28,45%, ambos considerando um motor de combustão interna para biogás. Portanto, para este trabalho, foi utilizada uma média de 26,73% para a eficiência de geração de eletricidade.

3.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA

Como caso de estudo, inicialmente, será analisado o potencial de geração de biogás de cada região do Brasil, utilizando dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023) para a safra correspondente ao ano de 2022 até abril de 2023. Após a escolha de uma região, será realizada a seleção de duas usinas de etanol na região escolhida, para realizar a análise de viabilidade de investimento dessas usinas no sistema proposto. Em seguida da seleção das usinas, será calculado o potencial de geração de bioeletricidade utilizando o conjunto Motor/Gerador e a produção de biohidrogênio com eletrólise, para posteriormente conduzir a análise energética e econômica. As análises vão examinar vários pontos como aspetos operacionais do processo de eletrólise para água, focando especificamente em sua operação com bioeletricidade. Avaliar a eficiência energética da produção de biohidrogênio, considerando a eficiência geral de conversão e as perdas ao longo do processo, e determinar os custos associados à produção de biohidrogênio e bioeletricidade, levando em consideração fatores como equipamentos, matérias-primas, consumo de energia e despesas operacionais.

4. ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGAS DE VINHACA NA INDÚSTRIA SUCRO-ALCOOLEIRA DO BRASIL

4.1 INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA DO BRASIL

O Brasil, líder mundial na produção de cana-de-açúcar, é o caso de estudo neste documento. Possui uma área total de 850 milhões de hectares, com cerca de 1% utilizada exclusivamente para a produção de cana-de-açúcar, capaz de produzir até 72 toneladas por hectare (BELINCANTA *et al.*, 2016). A indústria de cana-de-açúcar no Brasil vai além da produção de açúcar, sendo que as vendas de açúcar constituem apenas 53% do lucro total. Derivados como o etanol, adotado como fonte de combustível desde a década de 1930, contribuem significativamente, representando 42% dos lucros. Além disso, a venda de eletricidade corresponde aos restantes 2% (BELINCANTA *et al.*, 2016). Atualmente, a indústria de cana-de-açúcar e álcool no Brasil adota um enfoque circular, otimizando vários aspectos de suas operações. Por exemplo, as usinas de açúcar e álcool já alimentam sua rede interna com eletricidade proveniente da queima de bagaço de cana-de-açúcar. Elas utilizam a vinhaça, um subproduto do etanol rico em magnésio, fósforo e potássio, como fertilizante. E algumas estão criando etanol de segunda geração a partir de resíduos de produção de primeira geração. A abordagem multifacetada dentro da indústria de cana-de-açúcar e álcool do Brasil a coloca como uma concorrente formidável na busca contínua por metodologias inovadoras de aquisição de energia.

4.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ETANOL NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA DO BRASIL

O Brasil, sendo um país vasto com diversos tipos de solo, ecossistemas e condições climáticas, apresenta variações regionais na indústria de açúcar e álcool e em sua produção. Cada região possui condições únicas que podem tanto favorecer quanto dificultar a indústria, resultando em diferentes níveis de produção.

No contexto nacional, o setor sucroalcooleiro registrou uma produção de aproximadamente 610 milhões de toneladas de cana-de-açúcar até abril de 2023, na safra

2022/2023. Analisando regiões específicas, a região Sudeste se destaca como a maior produtora do país, utilizando cerca de 5.127 mil hectares e alcançando uma produtividade de aproximadamente 75.629 kg/ha. A região Centro-Oeste, com aproximadamente 1.767 mil hectares, relatou uma produção de 131.592,2 mil toneladas até abril de 2023. Na região Nordeste, a produtividade estimada é de 64.313 kg/ha. A região Sul teve uma área estimada de 475.000 hectares com uma produtividade de 65.115 kg/ha. Por fim, a região Norte estima que aproximadamente 3.823 milhões de toneladas de cana-de-açúcar serão obtidas nesta região até o final da temporada atual (CONAB, 2023). A produção anual média de etanol para cada região, considerando apenas a colheita do período 2022/2023 até o mês de abril de 2023, é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7: Produção média anual de etanol total por região (safra 22/23).

Região	**Produção de Etanol**
Norte	263,151.0 m^3/ano
Nordeste	2,048,658.9 m^3/ano
Centro-Oeste	13,018,769.5 m^3/ano
Sudeste	14,893,962.1 m^3/ano
Sul	1,113,168.0 m^3/ano
Total	**31,337,709.5 m^3/ano**

Fonte: CONAB(2023)

Considerando esse contexto, as regiões Centro-Oeste e Sudeste foram selecionadas devido à diferença significativa em produção de etanol em comparação com as outras regiões. Essas duas regiões destacam-se por seu substancial contribuição para a produção total de etanol no Brasil.

4.3 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE VINHAÇA NAS REGIÕES CENTRO-OESTE E SUDESTE DO BRASIL

O biogás de vinhaça é gerado por meio da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos presentes na vinhaça. A quantidade de vinhaça produzida pode variar entre os produtores de etanol, estima-se que para cada litro de etanol produzido são gerados entre

10 e 13 litros de vinhaça (SOUZA *et al.*, 2020) , mas para este estudo, um valor de 12 m³ de vinhaça por litro de etanol foi escolhido com base nos cálculos fornecidos pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) (CASSMAN *et al.*, 2018).

Em condições padrão de 0°C e 1 atm., foi constatado que 1 grama de DQO pode produzir 0,35 litros de gás metano. Portanto, a 35°C e 1 atm., 1 grama de DQO pode gerar 0,395 litros de gás metano. Consequentemente, de 10 a 26,4 m³ de biogás, contendo 60% de metano, podem ser gerados a partir de 1 m³ de vinhaça (PARSAEE *et al.*, 2019). Considerar o limite inferior permite observar a energia mínima que pode ser obtida a partir da quantidade dada de biogás. A taxa de fluxo de biogás das duas regiões é mostrada na Tabela 8:

Tabela 8: Vazão de biogás da região Centro-Oeste e Sudeste.

Região	**Produção de Vinhaça por Região**	**Produção diária de biogás por região**	**Taxa de vazão de biogás por região**
Centro-Oeste	428.014,34 m^3/dia	4.280.143,39 m^3/dia	178.229,31 m^3/h
Sudeste	489.664,51 m^3/dia	4.896.645,07 m^3/dia	204.026,88 m^3/h

Fonte: Produção do próprio autor

A taxa de vazão refere-se ao quanto biogás poderia ser gerado com a vinhaça produzida em cada região. Embora, algumas regiões já estão usando a vinhaça mais além que para fertilizar, ainda é um potencial perdido sendo que o Brasil, não possui a infraestrutura precisa para aproveitar o 100%.

Tendo já uma visão geral do potencial das regiões Centro-Oeste e Sudeste, O próximo passo foi avaliar a capacidade de geração de energia elétrica através do biogás nessas duas regiões, para escolher corretamente as usinas que serão o foco principal para iniciar as análises técnicas e econômicas.

5. ESTUDO DA CAPACIDADE DO BIOGAS PARA GERAR ELETRICIDADE NAS USINAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

5.1 POTÊNCIA ENERGÉTICA FORNECIDA PELO COMBUSTÍVEL (BIOGÁS DE VINHAÇA)

Para calcular a potência energética do combustível em quilowatts (kW), é necessário utilizar o valor do poder calorífico inferior do biogás típico de vinhaça, que é de 23 MJ/m³, e sua massa específica de 1,8428 kg/m³ (XAVIER, 2016). A potência energética fornecida pode ser obtida usando a Equação (11):

$$E_{comb} = m_{comb} * PCI_{comb} \quad (11)$$

Sendo:

E_{comb}: Potência fornecida pelo combustível [kW]

m_{comb}: Fluxo mássico de combustível [kg/s]

PCI_{comb}: Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

Para calcular m_{comb}, é multiplicada a taxa de fluxo de biogás obtida na parte anterior pela massa específica do combustível e, em seguida, são transformadas suas unidades para [kg/s], conforme observado na Equação (12). Os resultados são apresentados na Tabela 9:

$$m_{comb} = m_{biogas.p} * M_{biogas} * \frac{1}{3600} \quad (12)$$

Sendo:

M_{biogas}: Massa específica do biogás de vinhaça [kg/m3]

$m_{biogas.p}$: Fluxo volumétrico de biogás produzido [m3/h]

m_{comb}: Fluxo mássico de combustível [kg/s]

Tabela 9: Fluxo mássico de biogás de vinhaça para cada região selecionada.

Região	Fluxo mássico de combustível
Centro-Oeste	91,23 kg/s
Sudeste	104,44 kg/s

Fonte: Produção do próprio autor

Também é necessário ajustar as unidades do poder calorífico inferior para [kJ/kg]. Substituindo esses valores na Equação (11), obtemos o potencial energético de cada região, conforme mostrado na Tabela 10:

Tabela 10: Potencial de geração de energia para a região Centro-Oeste e Sudeste.

Região	**Potencial de Geração de Energia**
Centro-Oeste	1.138.687,2094 kW
Sudeste	1.303.505,1486 kW

Fonte: Produção do próprio autor

5.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO MAIS ELEVADO NA REGIÃO SUDESTE

A região Sudeste, composta pelos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo, apresenta o maior potencial de geração. Dado que o estado de São Paulo é aquele com o maior potencial para gerar biogás a partir de vinhaça, agora é necessário analisar uma usina de açúcar nessa região e avaliar seu potencial energético.

Foram selecionadas duas usinas do estado de São Paulo. A primeira é a "Usina São Manoel", localizada no interior do estado, no município de mesmo nome, que, na safra 2021/2022, registrou uma produção de 132.202,00 m³ de etanol (BARBOSA, 2022). A segunda usina é a "Usina São José da Estiva", localizada no município de Novo Horizonte, também no interior de São Paulo, que na safra 2022/2023 registrou uma produção de 155.700,00 m³ de etanol (USINA ESTIVA, 2023).

Com base na produção, é possível realizar os mesmos cálculos realizados anteriormente utilizando a Equação (12) para encontrar a taxa de fluxo de biogás que pode ser fornecida pelas usinas. Esse resultado é apresentado na Tabela 11:

Tabela 11: Taxa de vazão de biogás para ambas as plantas.

Usina de Etanol	**Produção média de etanol (ano)**	**Taxa de fluxo de biogás por planta**
São José da Estiva	155.700,00 m^3	2.465,75 m^3/h
São Manoel	132.202,00 m^3	1.810,99 m^3/h

Fonte: Produção do próprio autor

5.3 POTENCIAL ENERGÉTICO DAS USINAS DE AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

Como o objetivo deste trabalho é pretender instalar um sistema de produção de biohidrogênio para ver sua viabilidade, seria necessária a carga total da vazão de biogás obtida para ver quanta energia pode ser obtida para abastecer não só o conjunto motor/gerador, mas também ser capaz de fornecer a energia necessária do eletrolisador. Além disso, é importante ter uma fonte forte de combustível para poder combater problemas de eficiência, como será explicado mais adiante, que trabalhar com Biogás envolve algumas questões que o tornam menos eficiente, como baixa eficiência energética no motor/ grupo gerador, ou presença de substâncias incombustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, que podem prejudicar o processo de combustão (MACIEL *et al.*, 2023; PRENZIER *et al.*, 2011). Utilizando a Equação (11) obtém-se a potência energética que pode ser fornecida pelas usinas; esses resultados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12: Potência energética fornecida pelo combustível utilizando 100% da produção total de etanol das duas usinas.

Ethanol Plant	**Potência energética fornecida pelo combustível**
São José da Estiva	13,626.71 kW
São Manoel	11,570.19 kW

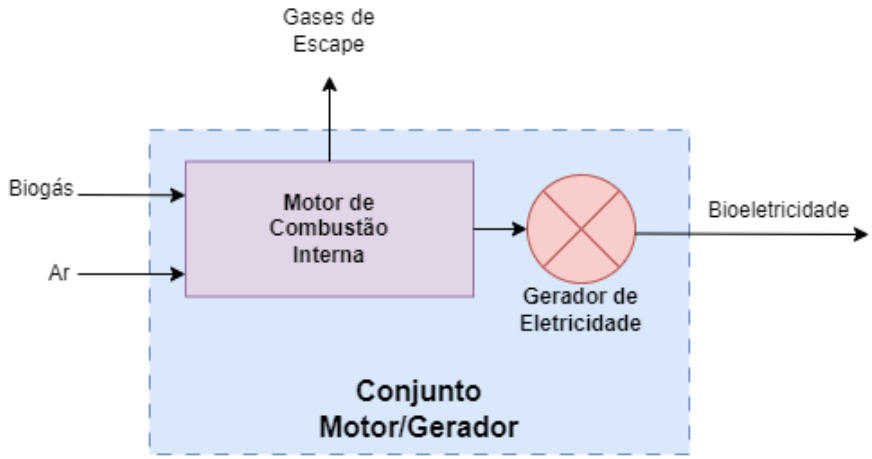
Fonte: Produção do próprio autor.

6. ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO USANDO BIOELETRICIDADE DO CONJUNTO MOTOR/GERADOR

6.1 BALANÇO ENERGÉTICO DO CONJUNTO MOTOR/GERADOR PARA O PROCESSO DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE

Para o processo de bioeletricidade, considera-se um motor de combustão interna juntamente com um gerador de eletricidade operando com biogás, o modelo CG260-16. As entradas e produtos do processo são apresentados na Figura 13:

Figura 13: Fluxograma do processo de bioeletricidade



Fonte: Elaborado pelo autor

A Potência produzida, E_{pMCI}, pode ser calculada através da Equação (13) (XAVIER, 2016):

$$E_{p.MCI} = \eta_{el.MCI} * E_{comb} \quad (13)$$

Sendo:

E_{comb}: Potência energética fornecida pelo combustível [kW]

$E_{p.MCI}$: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador [kW]

$\eta_{el.MCI}$: Eficiência elétrica do conjunto motor/gerador [%]

O primeiro passo envolve a aplicação do princípio fundamental, a primeira lei da termodinâmica, que estabelece a lei da conservação de energia, para realizar um balanço energético, usando a Equação (14) (DE CAMPOS *et al.*, 2019):

$$E_{comb} + m_{ar}h_{ar} = E_{p.MCI} + E_{ttj} + E_{tge} + Perdas \quad (14)$$

Sendo:

E_{comb}: Potência energética fornecida pelo combustível [kW]

$E_{p.MCI}$: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador [kW]

E_{tge}: Potência térmica dos gases de exaustão [kW]

E_{ttj}: Potência térmica transferida para jaqueta [kW]

h_{ar}: Entalpia do ar a 25°C [kJ/kg]

m_{ar}: Fluxo de massa de ar [kg/s]

$Perdas$: Referentes à energia perdida no sistema [kW]

Dado que não há cogeração para o caso proposto, a Equação (14) pode ser reescrita como Equação (15), considerando uma única variável de potência térmica, E_{UTP}, para resfriamento do motor e gases de escape (WENDLING, 2020):

$$E_{comb} + m_{ar}h_{ar} = E_{p.MCI} + E_{UPT} + Perdas \quad (15)$$

Sendo:

E_{comb}: Potência fornecida pelo combustível [kW]

$E_{p.MCI}$: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador [kW]

E_{UPT}: Variável única de potência térmica [kW]

h_{ar}: Entalpia do ar a 25°C [kJ/kg]

m_{ar}: Fluxo de massa de ar [kg/s]

$Perdas$: Referentes à energia perdida no sistema [kW]

Quanto às perdas, (WENDLING, 2020) sugere que podem ser estimadas em 8% da energia total fornecida pelo combustível.

Por meio da Equação (16), é possível determinar a quantidade de biogás necessária para produzir a potência elétrica obtida a partir do conjunto motor/gerador:

$$m_{biogas.MCI} = \frac{E_{p.MCI}}{\eta_{el.MCI} * PCI_{biogas}} \quad (16)$$

Sendo:

$E_{p.MCI}$: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador [kW]

$m_{biogas.MCI}$: Fluxo mássico de biogás no conjunto motor/gerador [kg/s]

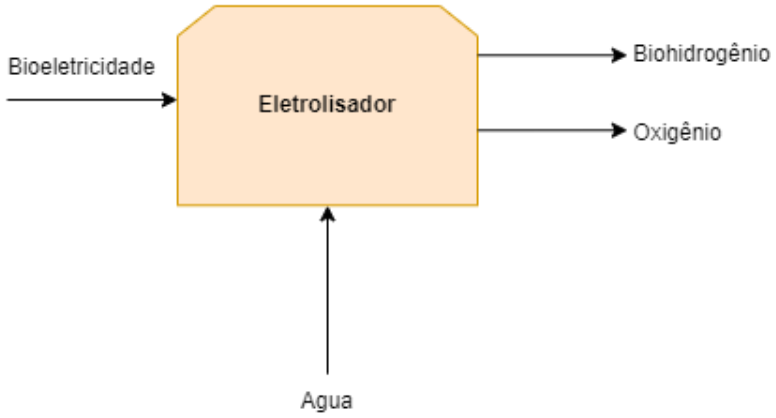
$\eta_{el.MCI}$: Eficiência elétrica do conjunto motor/gerador [%]

PCI_{biogas}: Valor calorífico inferior do biogás [kJ/kg]

6.2 BALANÇO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO

Para o processo de biohidrogênio, a bioeletricidade produzida pelo conjunto motor/gerador alimenta o eletrólito, onde o processo de eletrólise terá início. As entradas e produtos do processo são apresentados na Figura 14:

Figura 14: Fluxograma do processo de eletrólise para produção de biohidrogênio.



Fonte: Elaborado pelo autor

6.2.1 Eficiência Energética do Eletrolisador e Análise do Processo de Eletrólise

A eficiência energética do eletrolisador, η_{eletro}, é determinada com os dados da Tabela 6 e a Equação (17):

$$\eta_{eletro} = \frac{m_{H_2} * PCI_{H_2}}{E_{req_{eletro}}} \quad (17)$$

Sendo:

$E_{req_{eletro}}$: Potência requerida no eletrolisador [kW]

m_{H_2}: Fluxo mássico de biohidrogênio produzido [kg/s]

η_{eletro}: Eficiência elétrica do eletrolisador [%]

PCI_{H_2}: Poder calorífico inferior do biohidrogênio [kJ/kg]

Para calcular a potência fornecida pelo hidrogênio produzido, E_{H_2}, pode-se utilizar a Equação (18):

$$E_{H_2} = m_{H_2} * PCI_{H_2} \tag{18}$$

Sendo:

E_{H_2}: Potência fornecida pelo biohidrogênio [kW]

m_{H_2}: Fluxo mássico de biohidrogênio produzido [kg/s]

PCI_{H_2}: Poder calorífico inferior do biohidrogênio [kJ/kg]

Onde o valor calorífico inferior do biohidrogênio é 120.000 kJ/kg e para encontrar o fluxo de massa de hidrogênio, m_{H_2}, com base na energia administrada por ambas as usinas, é obtido a partir da Equação (16), resultando na Equação (19):

$$m_{H_2} = \frac{\eta_{eletro} * E_{req_{eletro}}}{PCI_{H_2}} \tag{19}$$

Sendo:

$E_{req_{eletro}}$: Potência requerida no eletrolisador [kW]

m_{H_2}: Fluxo mássico de biohidrogênio produzido [kg/s]

η_{eletro}: Eficiência elétrica do eletrolisador [%]

PCI_{H_2}: Poder calorífico inferior do biohidrogênio [kJ/kg]

A análise para esta parte é semelhante àquela descrita na parte anterior, onde é usada a Equação (15). Modificando as variáveis, obtemos a Equação (20):

$$E_{p.MCI} + m_{ar}h_{ar} = E_{H_2} + E_{UPT} + Perdas \tag{20}$$

Sendo:

E_{H_2}: Potência fornecida pelo biohidrogênio [kW]

$E_{p.MCI}$: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador [kW]

E_{UPT}: Variável única de potência térmica [kW]

m_{ar}: Fluxo de massa de ar [kg/s]

h_{ar}: Entalpia do ar a 25°C [kJ/kg]

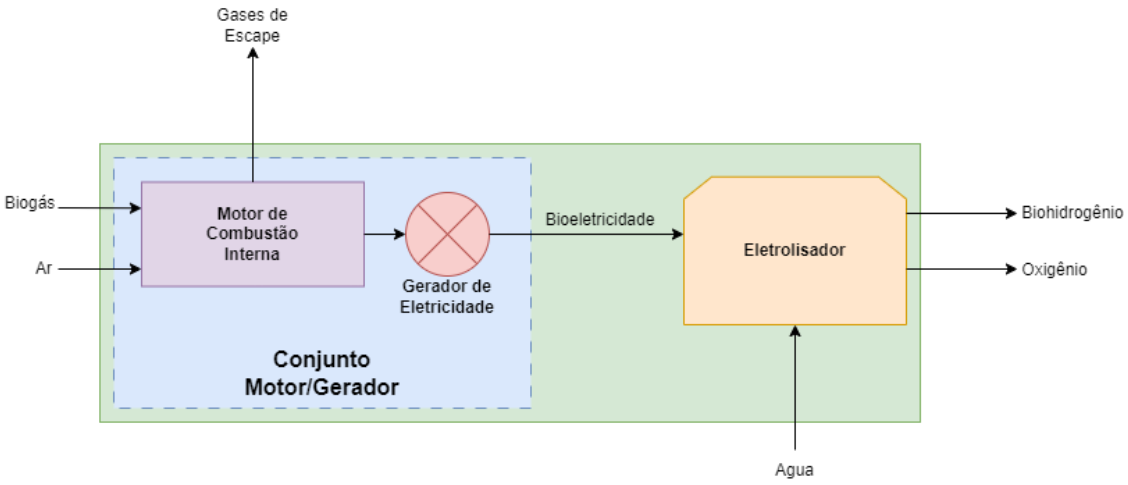
$Perdas$: Referentes à energia perdida no sistema [kW]

Usando a Equação (20), é possível encontrar os valores ausentes do balanço energético do processo de eletrólise, considerando as mesmas perdas de 8% da potência inicial fornecida pelo conjunto motor/gerador.

6.3 ANÁLISE ENERGÉTICA DO SISTEMA COMPLETO (PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE E BIOHIDROGÊNIO)

Conforme explicado anteriormente, o processo de eletrólise requer um eletrolisador alimentado com a bioeletricidade obtida do conjunto motor/gerador para produzir hidrogênio a partir de uma solução com água. Esse processo é representado pela Figura 15:

Figura 15: Fluxograma do processo de produção de biohidrogênio utilizando a bioeletricidade produzida pelo conjunto motor/gerador.



Fonte: Elaborado pelo autor

A eficiência global do processo completo, com o eletrolisador conectado ao conjunto motor/gerador que queima biogás, é calculada usando a Equação (21) (PAULINO; SILVEIRA, 2019):

$$\eta_{eletro.MCI} = \eta_{eletro} * \eta_{el.MCI} \quad (21)$$

Sendo:

η_{eletro}: Eficiência elétrica do eletrolisador [%]

$\eta_{eletro.MCI}$: Eficiência global do processo completo [%]

$\eta_{el.MCI}$: Eficiência elétrica do conjunto motor/gerador [%]

6.4 RESULTADO DO ANÁLISE ENERGÉTICO

6.4.1 Resultados do balanço energético do conjunto motor/gerador para o processo de geração de bioeletricidade

A potência que pode ser produzida pela implementação do sistema nas plantas selecionadas para o estudo, utilizando a Equação (13), é apresentada na Tabela 13:

Tabela 13: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador a partir do combustível fornecido pelas usinas.

Usinas de Etanol	**Potência produzida**
São José da Estiva	3.642,42 kW
São Manoel	3.092,72 kW

Fonte: Produção do próprio autor

Portanto, o balanço energético para o conjunto motor/gerador, utilizando a Equação (5), seria o seguinte, conforme apresentado na Tabela 14 e na Tabela 15:

Tabela 14: Balanço energético do processo de produção de bioeletricidade (caso de estudo São José da Estiva).

São Jose da Estiva	
E_{comb}	13.626,72 kW
E_{pMCI}	3.642,42 kW
E_{UPT}	8.894,16 kW
$Perdas$	1.090,14 kW

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 15: Balanço energético do processo de produção de bioeletricidade (caso de estudo São Manoel).

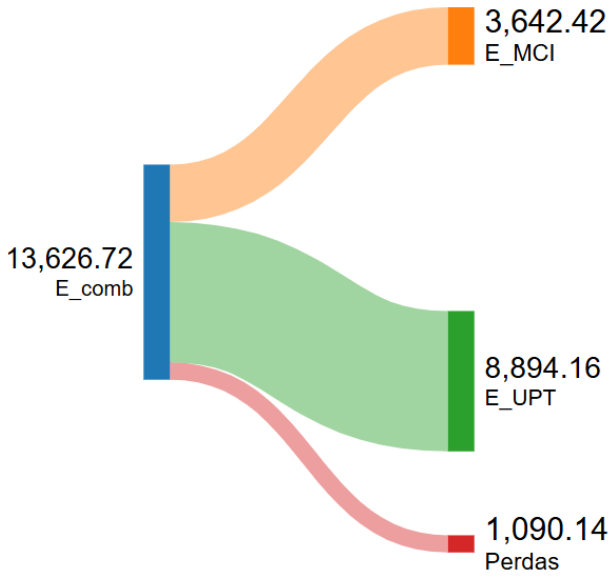
São Manoel	
E_{comb}	11.570,19 kW
E_{pMCI}	3.092,71 kW
E_{UPT}	7.551,86 kW
$Perdas$	925,61 kW

Fonte: Produção do próprio autor

Para amostrar os resultados visualmente, será usado um diagrama de SANKEY que é um tipo específico de fluxograma no qual a largura das setas é proporcional à quantidade do fluxo que existe entre dois processos. São usados para visualizar energia, custo ou transferência de materiais entre processos, por setas diferenciadas.

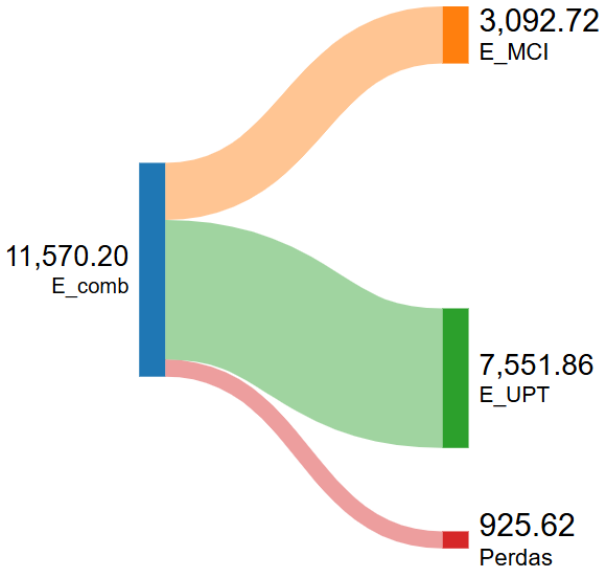
A Figura 16 e a Figura 17 apresenta os resultados ilustrados em um diagrama SANKEY, que neste caso, representa visualmente a distribuição da potência elétrica fornecida pelo combustível, E_{comb}, de biogás de vinhaça nas duas usinas, primeiro em São José da Estiva e depois em São Manoel. Na figura, é possível observar a energia elétrica utilizada pelo conjunto motor/gerador, bem como a energia térmica e as perdas do sistema.

Figura 16: Diagrama SANKEY do balanço energético do conjunto motor/gerador em kW (caso de estudo São José da Estiva)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17: Diagrama SANKEY do balanço energético do conjunto motor/gerador em kW (caso de estudo São Manoel)



Fonte: Elaborado pelo autor

Para calcular a quantidade de biogás necessária para produzir a potência elétrica obtida a partir do conjunto motor/gerador é preciso o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás com 55% de CH_4 e 45% de CO_2 que é de 15429 kJ/kg, e a massa molar é de 52,08 kmol/kg (PAULINO, 2017). Esses valores são necessários na Equação (6). Portanto, o resultado do fluxo de biogás é apresentado na Tabela 16:

Tabela 16: Fluxo mássico de biogás das duas usinas.

Usinas de Etanol	**Fluxo de volumétrico de biogás**	**Fluxo de massa de biogás**
São José da Estiva	1.386,42 Nm^3/h	0,88 kg/s
São Manoel	1.177,19 Nm^3/h	0,75 kg/s

Fonte: Produção do próprio autor

Para transformar os valores de kg/s para Nm3/h, basta saber que o "N" significa que está a 0°C e 100 kPa, e com a lei geral dos gases, "$PV=nRT$", é possível transformar valores de massa em valores de volume.

6.4.2 Resultados do balanço energético do processo de eletrólise para a produção de biohidrogênio.

A eficiência energética do eletrolisador, juntamente com os parâmetros utilizados e suas dimensões corrigidas usados na equação (17), são apresentados na Tabela 17:

Tabela 17: Parâmetros do eletrolisador.

Potência necessária no eletrolisador.	2.940 kW
Poder calorífico inferior do biohidrogênio.	120.000 kJ/kg
Fluxo de massa de biohidrogênio produzido.	0,01479 kg/s
Eficiência energética do eletrolisador.	**60,42 %**

Fonte: Produção do próprio autor

Tendo o valor de η_{eletro}, é possível fazer o mesmo estudo feito para o conjunto motor/gerador para o eletrolisador nas duas usinas. Usando a Equação (18) é obtido o valor de E_{H_2}, portanto, os resultados do balanço de energia para o processo de eletrólise usando a Equação (20) seria o seguinte nas tabelas 18 e tabela 19:

Tabela 18: Balanço energético do processo de produção de biohidrogênio (caso de estudo São José da Estiva)

São Jose da Estiva	
E_{pMCI}	3.642,42 kW
E_{H_2}	2.200,99 kW
E_{UPT}	1.150,04 kW
$Perdas$	291,39 kW

Fonte: Produção do próprio autor

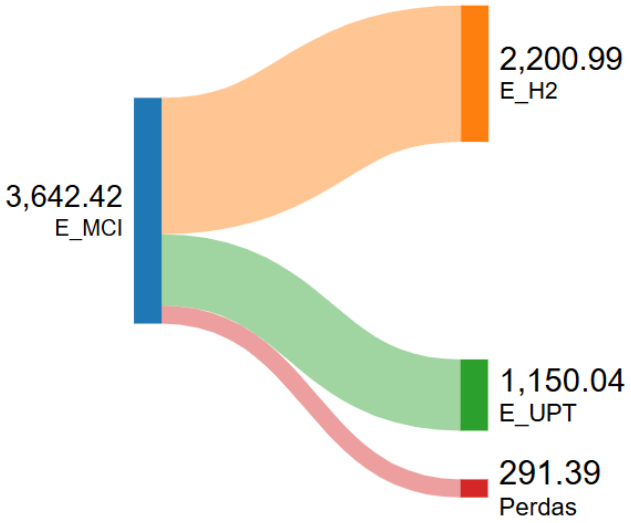
Tabela 19: Balanço energético do processo de produção de biohidrogênio (caso de estudo São Manoel)

São Manoel	
E_{pMCI}	3.092,71 kW
E_{H_2}	1.868,82 kW
E_{UPT}	976,47 kW
$Perdas$	247,42 kW

Fonte: Produção do próprio autor

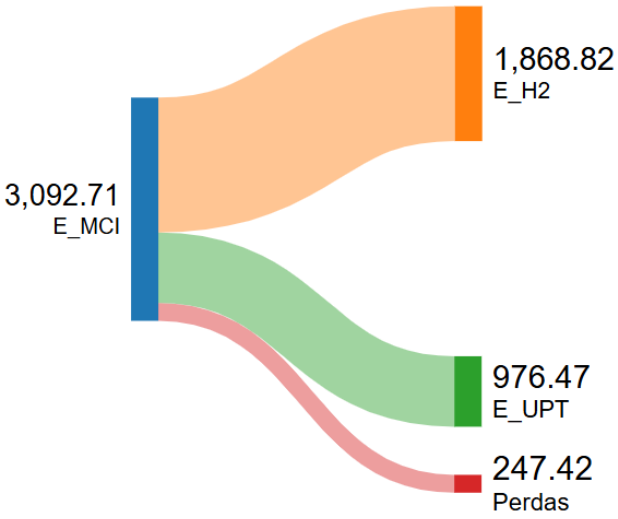
A Figura 18 e a Figura 19 apresenta os resultados ilustrados em um diagrama SANKEY, que representa visualmente a distribuição da energia elétrica fornecida pelo biohidrogênio, de cada uma das duas usinas, da mesma forma que nas Figura 16 e 17. Nelas, é possível observar a energia elétrica utilizada pelo eletrolisador, bem como a energia térmica e as perdas do sistema.

Figura 18: Diagrama SANKEY do balanço energético do processo de eletrólise para produção de biohidrogênio em kW (caso de estudo São José da Estiva)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19: Diagrama SANKEY do balanço energético do processo de eletrólise para produção de biohidrogênio em kW (caso de estudo São Manoel)



Fonte: Elaborado pelo autor

O fluxo de biohidrogênio produzido calculado com a Equação (19) e a potência fornecida por ambas as usinas calculado com a Equação (18) são apresentados na Tabela 20:

Tabela 20: Fluxo mássico de biohidrogênio e potência fornecida pela produção de biohidrogênio de ambas as usinas.

Usinas de Etanol	**Potência suprida pelo biohidrogênio**	**Fluxo de massa de Biohidrogênio**
São José da Estiva	2.200,99 kW	0,0183 kg/s
São Manoel	1.868,82 kW	0,0156 kg/s

Fonte: Produção do próprio autor

6.4.3 Resultados do balanço energético do sistema completo (geração de bioeletricidade com produção de biohidrogênio).

Com base nas características do modelo CG260-16, sabia-se que a eficiência elétrica do conjunto motor/gerador é de 43,2%. Foi explicado anteriormente por que esse valor não era preciso para este artigo, então o valor de 26,73% foi escolhido. Para a próxima parte, é necessário o valor calorífico do hidrogênio, que é de 120 MJ/kg, e ajustar as dimensões da capacidade de produção de hidrogênio, que permanece em 0,014795 kg/s. Utilizando a Equação (17), obtém-se a eficiência do eletrolisador, que é de 60,385%. Esses valores são substituídos na Equação (21), obtendo assim a eficiência energética do processo de eletrólise utilizando a eletricidade produzida no motor/gerador, e os resultados são apresentados na Tabela 21:

Tabela 21: Eficiência global do processo completo (Geração de Bioeletricidade e Produção de Biohidrogênio).

Eficiência elétrica modelo CG260-16	26,73 %
Eficiência elétrica HySTAT 600	60,39 %
Eficiência elétrica do sistema	**16,14 %**

Fonte: Produção do próprio autor

Com a eficiência global do processo completo, $\eta_{eletro.MCI}$, é possível estudar como a potência elétrica fornecida pelo combustível, E_{comb}, é realmente aproveitada durante cada etapa do sistema para obter a potência elétrica de biohidrogênio, E_{H_2}, usando a Equação (22):

$$E_{comb} * \eta_{eletro.MCI} = E_{H_2} \quad (22)$$

Sendo:

E_{comb}: Potência fornecida pelo combustível [kW]

E_{H_2}: Potência fornecida pelo biohidrogênio [kW]

$\eta_{eletro.MCI}$: Eficiência global do processo completo [%]

A Tabela 22 apresenta a potência fornecida pelo hidrogênio gerado, E_{H_2}, obtido da potência fornecida pelo combustível, E_{comb}.

Tabela 22: Potência de biohidrogênio obtida a partir da potência energética fornecida pelo combustível.

	São José da Estiva	**São Manoel**
E_{comb}	13.626,71 kW	11.570,19 kW
E_{H_2}	2.199,51 kW	1.867,56 kW

Fonte: Produção do próprio autor

É possível comparar o valor de potência de hidrogênio, E_{H_2}, obtido usando a Equação (22), sendo esse o valor teórico, com o valor obtido no balanço energético do processo de produção de biohidrogênio da parte anterior, sendo esse o valor real, vemos que é um valor muito parecido, usando a Equação (23) é possível calcular o erro percentual entre os dois valores (MACHADO, 2023). A Tabela 23 proporciona os resultados.

$$\epsilon_P = \frac{(A_t - P_t)}{A_t} * 100 \quad (23)$$

Sendo:

A_t: Valor real no período t [-]

ϵ_P: Erro percentual [%]

P_t: Previsão no período t [-]

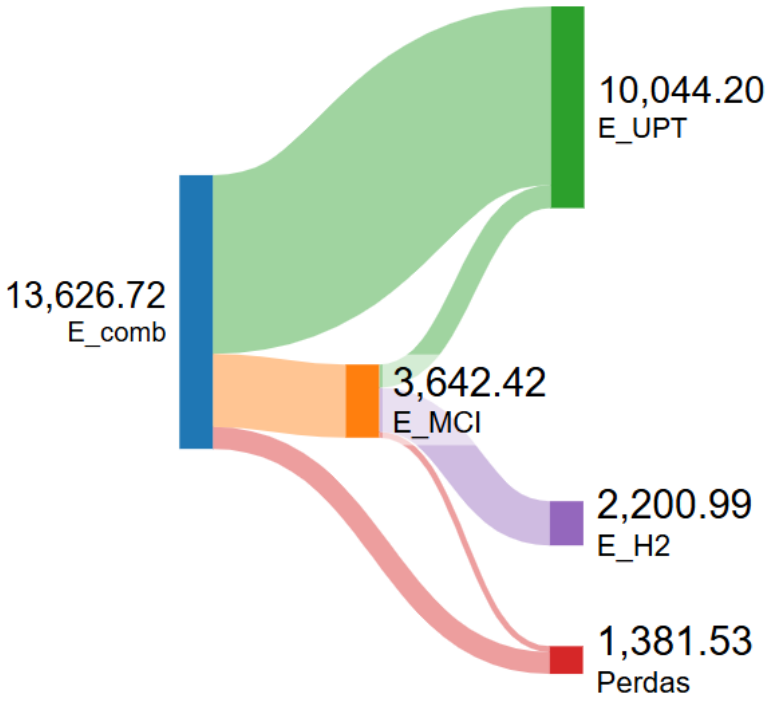
Tabela 23: Erro Percentual entre a potência elétrica do biohidrogênio real e teórico.

	São José da Estiva	**São Manoel**
$E_{H_2 real}$	2.200,99 kW	1.886,82 kW
$E_{H_2 teórico}$	2.199,51 kW	1.867,56 kW
ϵ_P	0,067 %	0,067 %

Fonte: Produção do próprio autor

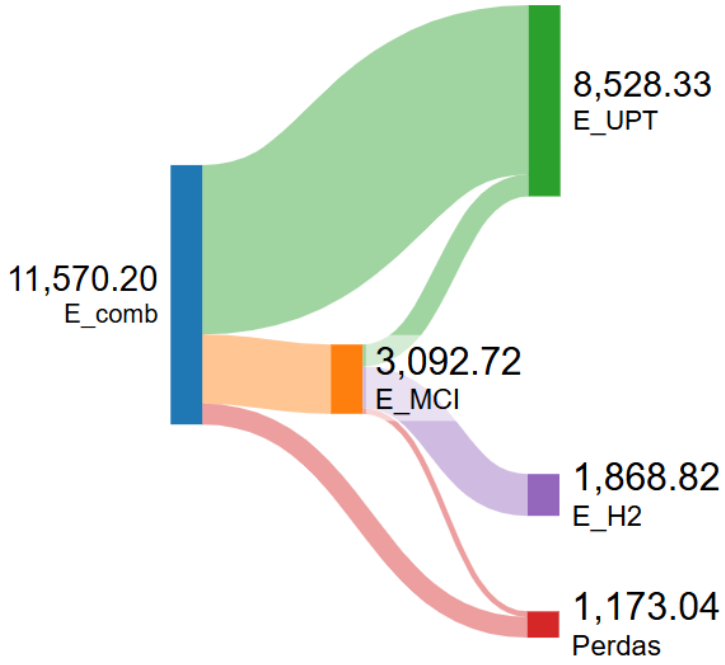
Na Figura 20 e Figura 21, mostra-se o Diagrama SANKEY do processo completo. Que inclui a produção de bioeletricidade feita pelo conjunto motor/gerador usando biogás de vinhaça e depois da produção de biohidrogênio feito pelo processo de eletrolises no eletrolisador.

Figura 20: Diagrama SANKEY do balanço energético do processo completo em kW (caso de estudo São José da Estiva)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21: Diagrama SANKEY do balanço energético do processo completo em kW (caso de estudo São Manoel)



Fonte: Elaborado pelo autor

Juntando o processo completo, a produção de bioeletricidade e de biohidrogênio é possível desenhar um diagrama SANKEY do processo geral, que representa visualmente como a potência elétrica suprida pelo combustível é aproveitada durante o processo até produzir biohidrogênio. Como se sabe agora, a eficiência global do processo foi de 16,14%. Na Figura 20 e na Figura 21 é possível observar que a potência térmica, E_{UPT}, é a maior dado que a eficiência do processo é muito baixa. Existem trabalhos e pesquisas onde aquela energia perdida e aproveitada para esquentar água com um trocador de calor ou para gelar água com um sistema de refrigeração por absorção. Mas para este trabalho não é preciso estudar isso dado que está se estudando só se o sistema é viável para produzir biohidrogênio

A partir da análise energética, embora a eficiência geral do sistema seja relativamente baixa, com 16,14%, quando cada parte do sistema é avaliada separadamente, a perspectiva muda. Conforme explicado anteriormente, sistemas de motores a combustão interna que funcionam com biogás não têm uma eficiência elétrica superior a 30%, então era esperado que uma parte significativa da energia não fosse

utilizada. Porém, a potência elétrica gerada pelo conjunto motor/gerador é maior que a mínima exigida pelo eletrolisador, portanto podemos inferir que a potência total produzida será utilizada para operar o eletrolisador.

Por outro lado, ao avaliar a eficiência do eletrolisador, verifica-se que ela é de 60,39%, o que significa que a maior parte da bioeletricidade é utilizada para a geração de biohidrogênio. Se bem agora parece que o sistema não aproveita o máximo da energia suprida pelo combustível, na seguinte parte na análise econômica é demostrado que efetivamente o sistema é viável ao curto e longo termo para ser implementado.

7. ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO USANDO BIOELETRICIDADE DO CONJUNTO MOTOR/GERADOR

7.1 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE

A análise econômica foi conduzida considerando a potência energética produzida pelo conjunto motor/gerador calculada na parte anterior. Ela é desenvolvida a partir do cálculo do custo de produção de bioeletricidade, bem como da receita anual esperada, para determinar a economia de custos em energia ao longo dos anos. São considerados os gastos com investimento, operação e manutenção da planta geradora, assim como o custo do combustível utilizado (biogás) (DE CAMPOS *et al.*, 2019). O custo da eletricidade produzida pode ser calculado usando a Equação (24):

$$C_{el.MCI} = \frac{I_{MCI} * f}{H * E_{p.MCI}} + C_{comb} \frac{E_{comb}}{E_{p.MCI}} + C_{man_{MCI}} \quad (24)$$

Sendo:

C_{comb}: Custo do combustível [USD/kWh]

$C_{el.MCI}$: Custo da bioeletricidade produzida pelo conjunto motor/gerador [USD/kWh]

$C_{man_{MCI}}$: Custo de manutenção do conjunto motor/gerador [USD/kWh]

E_{comb}: Potência fornecida pelo combustível [kW]

$E_{p.MCI}$: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador [kW]

f: Fator de anuidade [1/ano]

H: Período equivalente de utilização do sistema [h/ano]

I_{MCI}: Investimento no conjunto motor/gerador [USD]

Primeiro, é necessário realizar alguns cálculos. Para calcular o fator de anuidade, *f*, é utilizado a Equação (25):

$$f = \frac{q^k * (q-1)}{q^k - 1} \quad (25)$$

Sendo:

f: Fator de anuidade [1/ano]

k: Período de retorno do investimento [anos]

i: Taxa de juros anual [%]

$q = 1 + \frac{i}{100}$.

Os valores de i e k selecionados estão mostrados na tabela 24:

Tabela 24: Taxa de juros anual e período de retorno.

i	4 %
	8 %
	12 %
k	25 anos

Fonte: Produção do próprio autor

Para o custo de investimento do conjunto motor/gerador, I_{MCI} , foi calculado utilizando a metodologia proposta por Boehm (BOEHM, 1987), na qual o custo de investimento da implementação da planta pode ser estimado através da Equação (26) (BOEHM, 1987; PAULINO; SILVEIRA, 2019):

$$C = C_R * \left(\frac{S}{S_R}\right)^m \tag{26}$$

Sendo:

C: Custo estimado de implementação da planta [USD]

C_R: Custo de referência do equipamento [USD]

m: Fator de correção para determinar o custo estimado, normalmente entre 0,5 e 1. [-]

S: Especificação do equipamento [kW]

S_R: Referência de uma especificação para o sistema necessário [kW]

Esta é uma técnica utilizada para estimar custos de investimento em sistemas térmicos, onde $\boldsymbol{C}$, é o custo do equipamento para uma determinada quantidade de interesse $\boldsymbol{S}$, e $\boldsymbol{m}$ é o fator de incidência que indica o custo estimado, seu valor é encontrado entre 0,5 e 1,0. $\boldsymbol{C_R}$ é o custo do equipamento para uma quantidade de referência $\boldsymbol{S_R}$ (BOEHM, 1987). Para aplicar a técnica são necessários os seguintes passos:

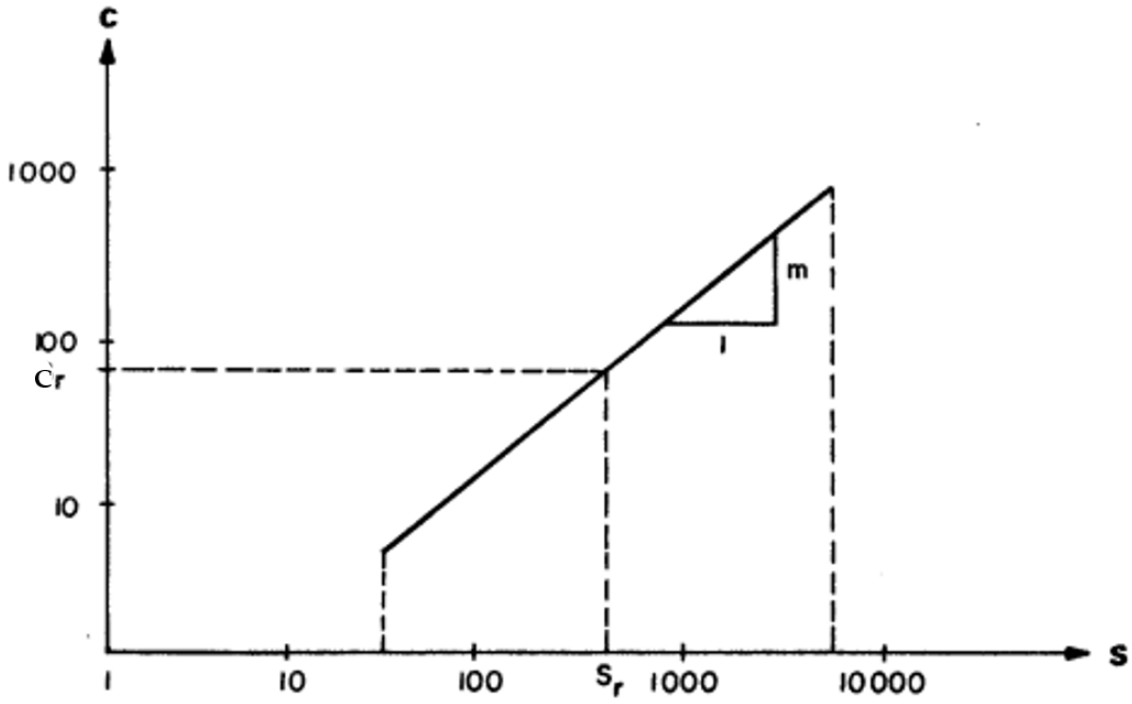
- Caracterização do equipamento, que se refere a encontrar os limites das faixas para C e S, sendo (C_{max}, C_{min}) e (S_{max}, S_{min}). $\boldsymbol{C_R}$ é o valor médio entre a faixa de custo

encontrada na caracterização (C_{max}, C_{min}), e $\boldsymbol{S_R}$ é o valor médio entre (S_{min} *e* S_{max})(BOEHM, 1987; JOSÉ LUZ SILVEIRA, 1990).

- O fator de incidência $\boldsymbol{m}$ é encontrado a partir da tangente do ângulo formado entre uma diferença de uma unidade em $\boldsymbol{S}$ (BOEHM, 1987; JOSÉ LUZ SILVEIRA, 1990).

Uma ilustração desta técnica é mostrada na Figura 22.

Figura 22: Técnica para estimar os custos de investimento em sistemas térmicos.



Fonte: Recuperado de (BOEHM, 1987)

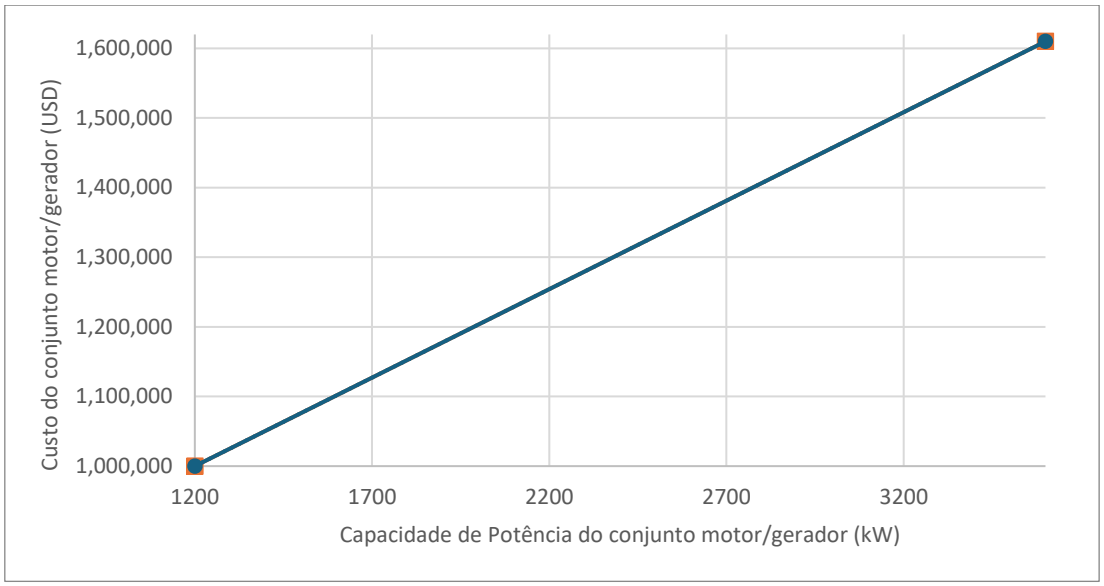
Com isso, é possível estimar o custo de investimento da implementação da planta, I_{MCI}, a partir da Tabela 25, onde se tem o custo de dois conjuntos geradores para uma faixa de potência entre 1200 e 3600 kW, é possível desenhar a Figura 23, de onde é obtida a Equação (27).

Tabela 25: Custo de motores de combustão interna.

Capacidade	Custo
1200 kW	1.000.000 US$
3600 kW	1.610.000 US$

Fonte: recuperado de (PAULINO; SILVEIRA, 2019)

Figura 23: Curva Custo x Potência para determinar o custo de investimento do conjunto motor/gerador.



Fonte: Elaborado pelo autor

$$I_{MCI} = 1305 * \left(\frac{E_{MCI}}{2400}\right)^{0,5} * 10^3 \quad (27)$$

Sendo:

E_{MCI}: Potência elétrica de catálogo do conjunto motor/gerador [kW]

I_{MCI}: Investimento no conjunto motor/gerador [USD]

O período equivalente de utilização do sistema, H, do conjunto motor/gerador será de aproximadamente 7300 horas por ano, equivalente a 20 horas de trabalho por dia, e o custo de manutenção do conjunto motor/gerador é de 3% do custo de investimento para o conjunto motor/gerador, de acordo com a Equação (28) (SILVEIRA, 2017).

$$C_{man_{MCI}} = 0,03 * \frac{I_{MCI} * f}{H * E_{p.MCI}} \quad (28)$$

Onde:

$C_{man_{MCI}}$: Custo de manutenção do conjunto motor/gerador [USD/kWh]

$E_{p.MCI}$: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador [kW]

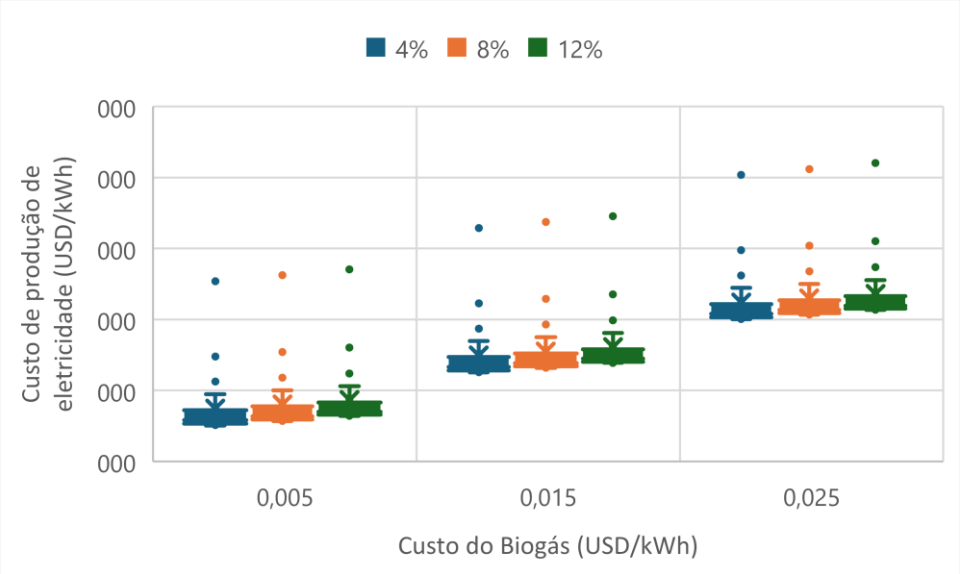
H: Período equivalente de utilização do sistema [h/ano]

I_{MCI}: Investimento no conjunto motor/gerador [USD]

f: Fator de anuidade [1/ano]

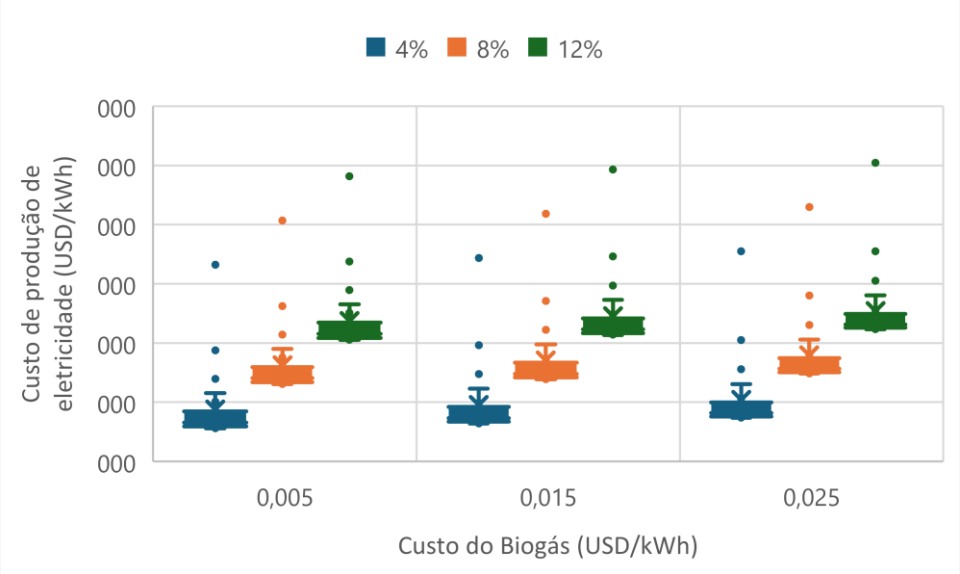
Por fim, é necessário calcular $C_{comb}\frac{E_{comb}}{E_{p.MCI}}$ da Equação (24). O custo de produção do biogás, C_{comb}, varia amplamente no mercado, considerando as diferentes fontes de onde provém, ou o processo usado para sua produção. Por isso, foi realizada uma análise inicial, variando o custo do combustível (biogás) na Equação (24) com valores entre 0,005 USD/kWh e 0,025 USD/kWh, de acordo com algumas literaturas, para visualizar como o custo de produção de eletricidade, $C_{el.MCI}$, se comportaria com valores variáveis de combustível. As Figura 24 e Figura 25 mostram os resultados desse cálculo.

Figura 24: Custo de produção de Bioeletricidade com base no custo do biogás (caso de estudo São José da Estiva).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25: Custo de produção de Bioeletricidade com base no custo do biogás (caso de estudo São Manoel).



Fonte: Elaborado pelo autor

Se tem em conta que o custo de eletricidade para processos industriais no estado de São Paulo é de 0,145 USD/kWh, observamos que, para o pior cenário para ambas as usinas, onde a taxa de juros anual é de 12% e o custo do combustível C_{comb} é de 0,025 USD/kWh, o custo de produção de bioeletricidade com o conjunto motor/gerador, $C_{el.MCI}$, para a usina São Jose da Estiva, o preço máximo é de 0,21 USD/kWh, e para a usina São Manoel, o preço máximo é de 0,25 USD/kWh, tendo apenas 0,105 USD a mais do que o custo comercial. Esses preços são apenas para a produção de bioeletricidade do sistema proposto, e sabe-se que cada usina de açúcar e álcool produz eletricidade através da queima de bagaço que excede, então pode-se dizer que este sistema é viável para continuar o cálculo da produção de bioeletricidade com um valor fixo para C_{comb}, para este caso é necessário o custo do biogás de vinhaça, que é de 0,019 USD/kWh (DE CAMPOS *et al.*, 2019). Finalmente, é necessário apenas realizar o cálculo da produção esperada de bioeletricidade nas usinas de etanol para continuar mais tarde com a receita anual esperada do investimento do sistema. A Tabela 26 mostra alguns dos parâmetros fixos usados na Equação (24).

Tabela 26: Parâmetros fixos para cálculo do custo de investimento do conjunto motor/gerador.

Potência produzida pelo conjunto motor/gerador	3037 kW
Custo do combustível (Biogás de Vinhaça)	0,019 USD/kWh
Custo da eletricidade para processos industriais	0,145 USD/kWh
Período de trabalho (horas por ano)	7.300 Horas

Fonte: Produção do próprio autor

Agora, para calcular a receita anual esperada da produção de bioeletricidade do conjunto motor/gerador, alimentado pela produção de vinhaça das usinas, com a Equação (29) (SILVEIRA, 2017):

$$R_{el.MCI} = E_{p.MCI} * H * (C_{el} - C_{el.MCI}) \quad (29)$$

Onde:

C_{el}: Tarifa da eletricidade para processos industriais [USD/kWh]

$C_{el.MCI}$: Custo da bioeletricidade produzida pelo conjunto motor/gerador [USD/kWh]

$E_{p.MCI}$: Potência produzida pelo conjunto motor/gerador [kW]

H: Período equivalente de utilização do sistema [h/ano]

$R_{el.MCI}$: Receita anual esperada pela produção de bioeletricidade com base no retorno do investimento [USD/ano]

7.2 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO (PROCESSO DE ELETRÓLISE ALIMENTADO COM BIOELETRICIDADE)

A análise é a mesma que a do processo de produção de bioeletricidade, apenas agora o objetivo é determinar o custo de produção de biohidrogênio a partir da eletrólise da água, então alguns cálculos variam. Este custo pode ser calculado com a Equação (30):

$$C_{H_2.eletro} = \frac{I_{eletro} * f}{H * E_{H_2}} + C_{op_{eletro}} + C_{man_{eletro}} \quad (30)$$

Sendo:

$C_{H_2 eletro}$: Custo da produção de biohidrogênio por eletrólise [USD/kWh]

$C_{man_{eletro}}$: Custo de manutenção do eletrolisador [USD/kWh]

$C_{op_{eletro}}$: Custo de operação do eletrolisador [USD/kWh]

E_{H_2}: Potência fornecida pelo biohidrogênio [kW]

H: Período equivalente de utilização do sistema [h/ano]

I_{eletro}: Investimento no eletrolisador [US$]

f: Fator de anuidade [1/ano]

A Equação (31) permite calcular o custo operacional do eletrolisador:

$$C_{op_{eletro}} = \frac{E_{req_{eletro}} * C_{el.MCI}}{E_{H_2}} + \frac{m_{H_2O} * C_{H_2O}}{E_{H_2}} \quad (31)$$

Sendo:

$C_{el.MCI}$: Custo da bioeletricidade produzida pelo conjunto motor/gerador [USD/kWh]

C_{H_2O}: Custo da água fornecida [USD/kg]

$C_{op_{eletro}}$: Custo de operação do eletrolisador [USD/kWh]

E_{H_2}: Potência fornecida pelo biohidrogênio [kW]

$E_{req_{eletro}}$: Potência elétrica requerida no eletrolisador [kW]

m_{H_2O}: Fluxo mássico de água no eletrolisador [kg/h]

Dos quais, a potência requerida pelo eletrolisador, $E_{req_{eletro}}$, é de 2.940 kW, o custo da água C_{H_2O}, para processos industriais no estado de São Paulo, para aqueles que consomem mais de 50 m³/mês, é de 12,18 R$/m³ (0,21 USD = 1R$, atualizado em 16/11/2023). O fluxo de mássico de água no eletrolisador, m_{H_2O}, é de 1,05 m³/h, os valores com as dimensões corrigidas estão mostrados na Tabela 27. O custo da eletricidade gerada pelo conjunto motor/gerador $C_{el.ICM}$, foi obtido na parte anterior.

Tabela 27: Parâmetros utilizados para custo de operação do eletrolisador com dimensões corrigidas.

	São José da Estiva	**São Manoel**
Energia fornecida por biohidrogênio	2.200,99 kW	1.868,82 kW
Potência exigida pelo eletrolisador	2.940 kW	
Taxa de água para processo industrial	0,00256 USD/kg	
Fluxo de massa de água no eletrolisador	0,8329 kg/h	

Fonte: Produção do próprio autor

O custo dos eletrolisadores C_{eletro}, para a produção de biohidrogênio variando de 0,1 kg/h a 100 kg/h, pode ser estimado com a Equação (32) (PAULINO, 2017):

$$C_{eletro} = 224{,}49 * \left(m_{H_2}\right)^{0{,}6156} * 10^3 \quad (32)$$

Sendo:

C_{eletro}: Custo do eletrolisador com base na sua produção de hidrogênio [USD]

m_{H_2}: Fluxo mássico de biohidrogênio produzido [kg/s]

A Equação (32) permite uma estimativa confiável do custo de investimento do equipamento eletrolisador. Considerando uma capacidade de produção de 100 Nm³/h e outra de 1.000 Nm³/h, que correspondem a taxas de produção de biohidrogênio de 8,99 kg/h e 89,9 kg/h, respectivamente, valores ainda dentro da faixa para poder usar a Equação (32), pois esses valores estão dentro do intervalo indicado para o uso da equação, os resultados são mostrados na Tabela 28:

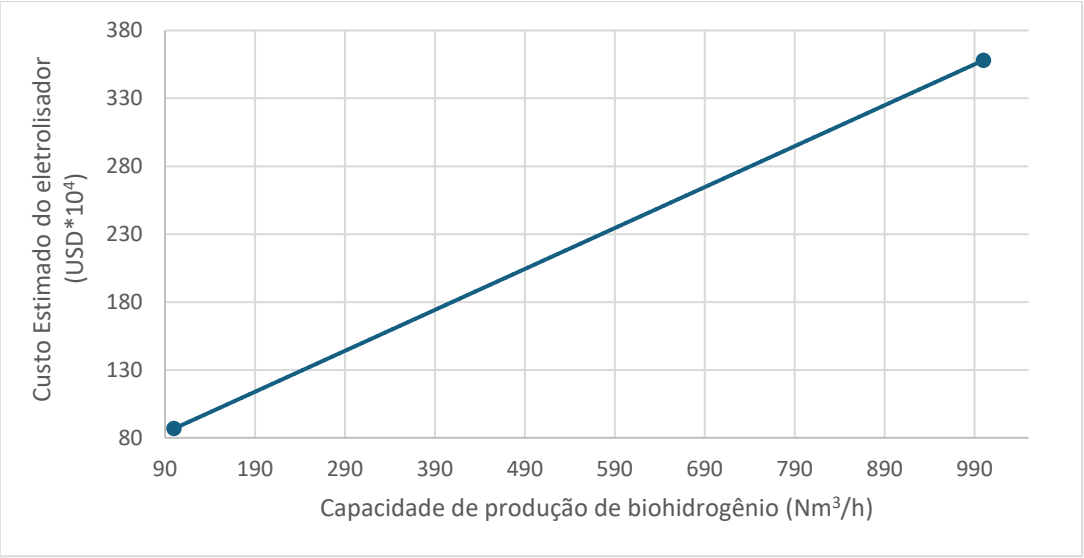
Tabela 28: Custo estimado dos eletrolisadores usando a Eq. (32).

Capacidade do eletrolisador	**Taxa de fluxo de biohidrogênio**	**Custo estimado do eletrolisador**
100 Nm^3/h	8,99 kg/h	867.623,82 US$
1.000 Nm^3/h	89,9 kg/h	3.580.399,32 US$

Fonte: Produção do próprio autor

O método de Boehm (1987) utilizado na parte anterior também é aplicado aqui, usando os valores da Tabela 28 que serão plotados a Figura 26. Este método facilita a caracterização do equipamento e permite a identificação de parâmetros como Cr, Sr, e m para poder usar a Equação (26), ao mesmo tempo em que considera erros típicos de equipamento.

Figura 26: Curva Custo x Potência para determinar o custo de investimento do eletrolisador.



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 26 e da Equação (26), é possível obter a Eq. (33) para determinar o custo de investimento do eletrolisador, I_{eletro}.

$$I_{eletro} = 150 * \left(\frac{P_{H_2}}{400}\right)^{0,71} * 10^4 \quad (33)$$

Sendo:

I_{eletro}: Investimento no eletrolisador [USD]

P_{H_2}: Capacidade de produção de biohidrogênio [Nm^3/h]

O custo de manutenção do processo de eletrólise, $C_{man_{eletro}}$, assim como a Equação (28) onde pode ser considerado como 3% do custo de investimento do equipamento, é obtido pela Eq. (34) (SILVEIRA, 2017):

$$C_{man_{eletro}} = 0,03 * \frac{I_{eletro} * f}{H * E_{H_2}} \quad (34)$$

Sendo:

$C_{man_{eletro}}$: Custo de manutenção do eletrolisador [USD/kWh]

E_{H_2}: Potência fornecida pelo biohidrogênio [kW]

f: Fator de anuidade [1/ano]

H: Período equivalente de utilização do sistema [h/ano]

I_{eletro}: Investimento no eletrolisador [USD]

Para determinar a receita anual projetada do sistema de produção de biohidrogênio, $R_{H_2.eletro}$, que envolve a utilização do eletrolisador alimentado pela bioeletricidade fornecida pelo conjunto motor/gerador alimentado por biogás de vinhaça, é empregada uma versão modificada da Equação (29), obtendo a Equação (35). Esta equação modificada incorpora alguns parâmetros considerando os diversos fatores envolvidos no sistema de produção de biohidrogênio, como a eletricidade consumida pelo eletrolisador, o trabalho específico realizado pelo eletrolisador e o preço de mercado pelo qual o biohidrogênio é vendido. Ao aplicar esta equação, uma estimativa confiável da receita anual gerada pelo sistema pode ser obtida.

$$R_{H_2.eletro} = E_{H_2} * H * \left(C_{H_2} - C_{H_2.eletro}\right) \quad (35)$$

Sendo:

C_{H_2}: Preço de venda do biohidrogênio produzido [USD/kWh]

$C_{H_2.eletro}$: Custo da produção de biohidrogênio por eletrólise [USD/kWh]

E_{H_2}: Potência fornecida pelo biohidrogênio [kW]

H: Período equivalente de utilização do sistema [h/ano]

$R_{H_2eletro}$: Receita anual esperada pela produção de biohidrogênio com base no retorno do investimento [USD/ano]

De acordo com a Agência Internacional de Energia, 1 quilo de hidrogênio verde, que pode fornecer cerca de 33,3 kWh, custa entre 8 e 10 euros, o que equivale a 0,238 €/kWh e 0,297 €/kWh (GARCÍA, 2023), que na taxa de câmbio atual (16/11/2023), a relação é de cerca de 1 US$ é igual a 0,92€. Portanto, para este caso de estudo, um valor médio foi selecionado entre esses valores. A Tabela 29 mostra os valores com as dimensões corrigidas para os cálculos.

Tabela 29: Parâmetros utilizados para o rendimento anual projetado do sistema de produção de biohidrogênio com dimensões corrigidas.

	São José da Estiva	**São Manoel**
Energia fornecida pelo set motor/gerador	3.642,42 kW	3.092,71 kW
Energia fornecida pelo biohidrogênio	2.200,99 kW	1.868,82 kW
Preço de venda da eletricidade	0,145 US$/kWh	
Preço de venda do biohidrogênio	0,291 US$/kWh	
Período de trabalho	7300 h	

Fonte: Produção do próprio autor

7.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA

7.3.1 Resultado da Análise Econômica do processo de geração de bioeletricidade

E_{ICM} é substituído na Equação (27) por 3.037 kW, o valor correspondente à capacidade de potência do conjunto motor/gerador com 75% de carga. Isso torna possível obter o valor em dólares do investimento no equipamento, conforme mostrado na Tabela 30.

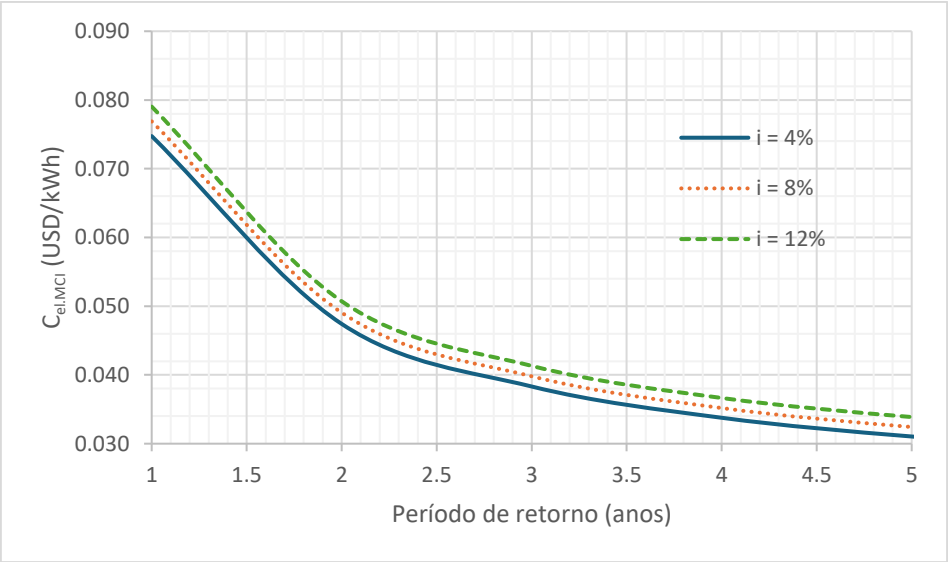
Tabela 30: Custo de investimento do conjunto motor/gerador.

Conjunto Motor/Gerador	**Investimento**
Caterpillar CG260-16	1.383.746,04 US$

Fonte: Produção do próprio autor

Todas as estimativas foram realizadas utilizando a Equação (24), e as Tabela 24 e Tabela 26, para possibilitar a obtenção do custo da bioeletricidade produzida pelo conjunto motor-gerador, alimentado pelas duas usinas separadamente, conforme mostrado nas Figura 27 e Figura 28. O estudo foi feito para um tempo k de 25 anos, mas para um fim mais ilustrativo, as figuras só mostram até um tempo de 5 anos, dados que depois desse tempo, o custo de produção de bioeletricidade fica numa faixa baixa e estável.

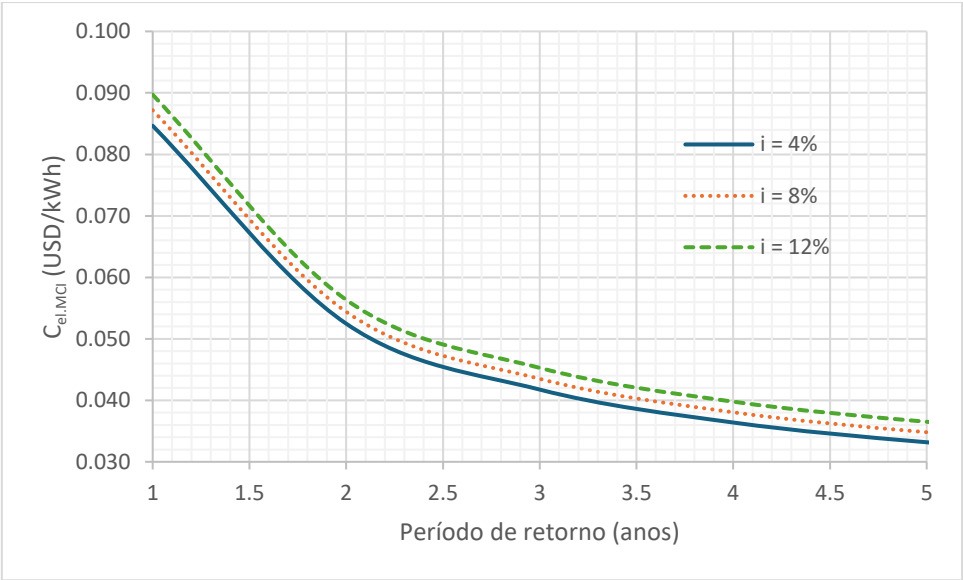
Figura 27: Custo da bioeletricidade produzida pela usina São José da Estiva.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o sistema funcionando 7.300 horas por ano e considerando taxas de juros anuais variando de 4, 8 e 12%, ao longo de um período de 25 anos após a implementação do sistema, é mostrado na figura 27 que o custo de produção de bioeletricidade variou de 0,075 USD/kWh (4%) e 0,079 US$/kWh (12%) no primeiro ano de implementação do sistema, para uma faixa de preços estável de 0,031 USD/kWh (4%) e 0,034 US$/kWh (12%) no quinto ano e atingindo uma faixa de preço mínima de 0,022 US$/kWh (4%) e 0,025 US$/kWh (12%) no final do período de 25 anos para a planta São José da Estiva

Figura 28: Custo da bioeletricidade produzida pela usina São Manoel.



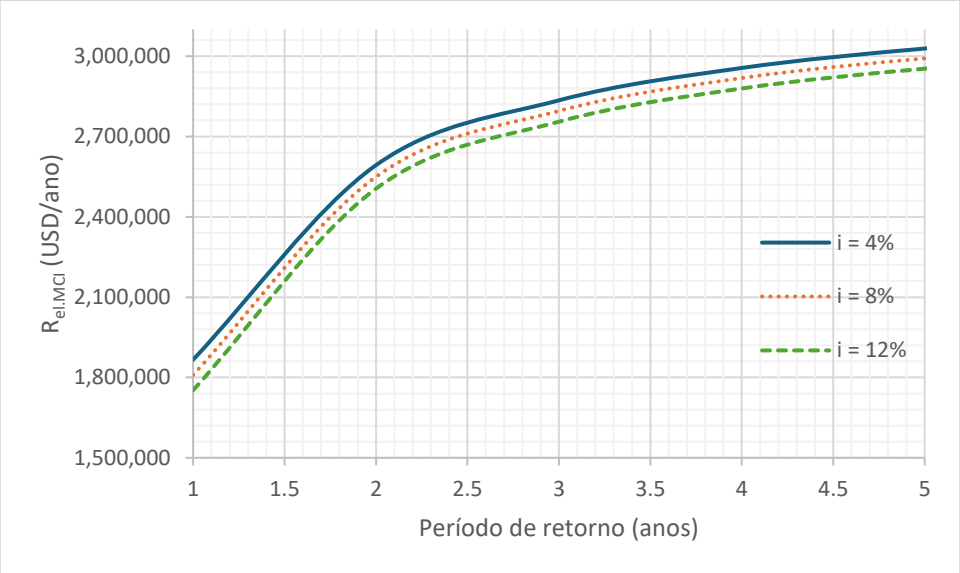
Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 28 o custo de produção de bioeletricidade variou de 0,085 USD/kWh (4%) e 0,089 USD/kWh (12%) no primeiro ano de implementação do sistema, para uma faixa de preços estável de 0,033 USD/kWh (4%) e 0,036 USD/kWh (12%) nos primeiros 5 anos e atingindo uma faixa de preço mínima de 0,023 USD/kWh (4%) a 0,027 USD/kWh (12%) no final do período de 25 anos para a planta São Manoel.

Considerando que o custo atual da eletricidade para processos industriais no estado de São Paulo gira em torno de 0,14 USD/kWh (SGT/ANEEL, 2022), observa-se que o custo de produção de bioeletricidade, $C_{el.MCI}$, usando o biogás proveniente de sua própria produção de vinhaça, com a implementação do conjunto motor/gerador, mesmo com uma eficiência elétrica baixa de 26,73%, o custo de produção será baixo inclusive antes do primeiro ano de implementação para as duas usinas.

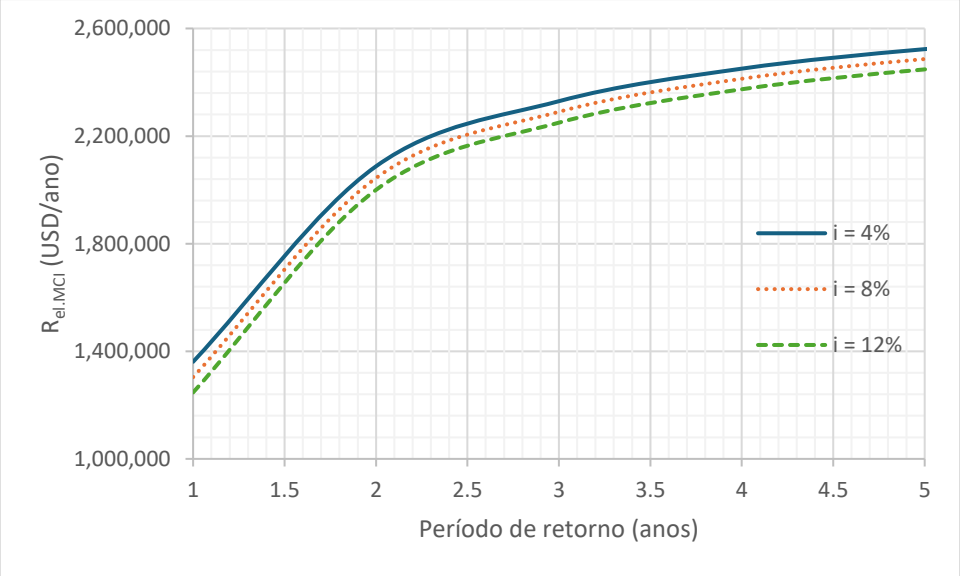
Os resultados da receita anual para a implementação do conjunto motor/gerador são apresentados nas Figura 29 e Figura 30.

Figura 29: Receita anual esperada da produção de Bioeletricidade a partir do conjunto motor/gerador utilizando a energia fornecida pela usina São José da Estiva.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30: Receita anual esperada da produção de Bioeletricidade a partir do conjunto motor/gerador utilizando a energia fornecida pela usina São Manoel.



Fonte: Elaborado pelo autor

Aqui pode-se observar que, para ambas as usinas, o tempo de retorno do investimento no conjunto motor/gerador será inferior ao primeiro ano. Para a planta de São José da Estiva, o valor da renda que eles obterão no primeiro ano será de cerca de 1.866.320 USD (4%) e 1.752.299 USD (12%), e para planta de São Manoel, o valor de renda que obterão no primeiro ano será de 1.360.956 USD (4%) e 1.246.935 USD (12%). Estes valores são iguais ou superiores ao valor do investimento inicial de 1.383.746,04 USD, por tanto isso significa que o investimento nesse tipo de sistema para gerar bioeletricidade é viável para usinas comuns de açúcar e etanol com uma produção média de 150.000 m³/ano.

Lembrando do resultado obtido na análise energética, onde foi explicado que os conjuntos geradores de eletricidade que funcionam a partir de biogás costumam ter uma eficiência elétrica muito baixa, neste caso 26,73%, portanto em ambos os casos se observou que a grande parte da potência elétrica do combustível não estava muito bem usada. Porém, a análise econômica mostrou que mesmo com baixa eficiência energética, o investimento feito no conjunto motor/gerador é recuperado em pouco tempo.

7.3.2 Resultado da Análise Econômica do processo de geração de biohidrogênio

O modelo escolhido foi o HySTAT 600 da Hydrogenics, com uma produção de 600 Nm³/h de biohidrogênio. Se esse valor for substituído na Eq. (33), o custo de investimento do eletrolisador é apresentado na Tabela 31:

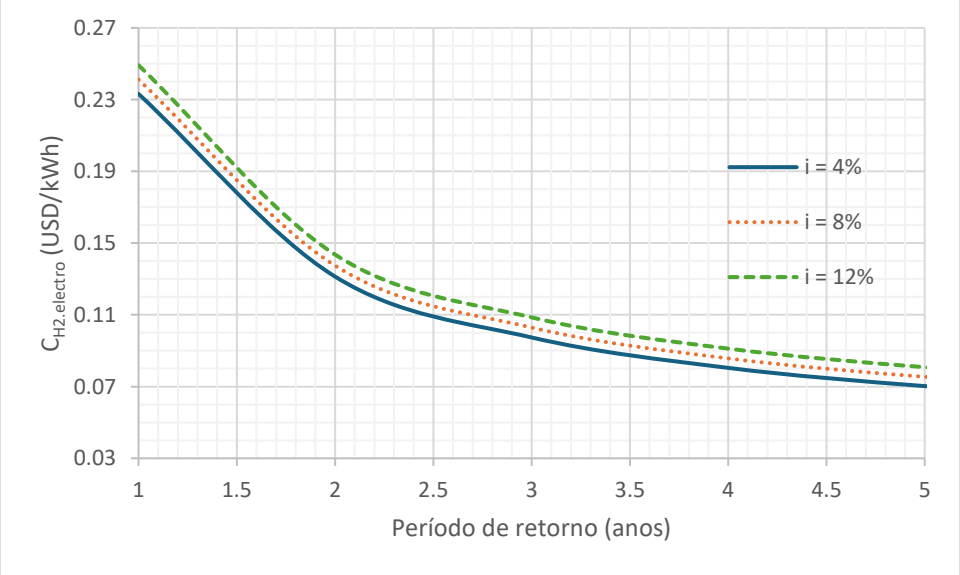
Tabela 31: Custo de investimento para o eletrolisador HySTAT 600.

Capacidade do Eletrolisador	**Taxa de fluxo de biohidrogênio**	**Custo estimado do eletrolisador**
600 Nm^3/h	53,26 kg/h	2.000.396,35 US$

Fonte: Produção do próprio autor

O custo de produção de biohidrogênio, $C_{H_2eletro}$, baseado num período de 25 anos de implantação do sistema foi calculado pela equação (30), e os resultados são mostrados nas Figura 31 e Figura 30. Da mesma forma que no caso da produção de bioeletricidade, onde o período k de uso do sistema está planejado para ser de 25 anos, aqui só é plotado até os primeiros 5 anos após a implementação, porque depois de esse ano o preço chega numa faixa baixa e estável que não é preciso para o analise de este trabalho.

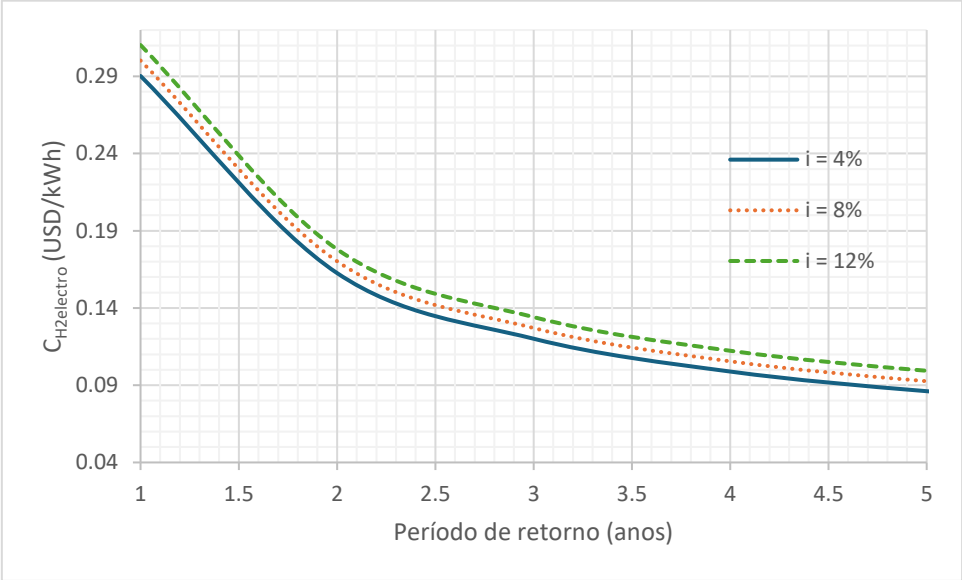
Figura 31: Custo de produção de Biohidrogênio pela usina São José da Estiva.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 31, o custo de produção de biohidrogênio, $C_{H_2eletro}$, começa variando entre 0,23 USD/kWh (4%) e 0,25 USD/kWh (12%) no primeiro ano de uso do sistema. Os preços caem pela metade no segundo ano de uso, atingindo um preço na faixa de 0,13 USD/kWh (4%) e 0,14 USD/kWh (12%), alcançando o preço comercial para o hidrogênio nos primeiros doze meses após a implementação antes do primeiro ano de uso do sistema na usina São José da Estiva.

Figura 32: Custo de produção de Biohidrogênio pela usina São Manoel.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 32, o custo de produção de biohidrogênio, $C_{H_2.eletro}$, inicia variando entre 0,29 USD/kWh (4%) a 0,31 USD/kWh (12%) no primeiro ano de uso do sistema. Mas da mesma forma que no caso anterior, os preços caem pela metade no segundo ano de uso, atingindo um preço na faixa 0,16 USD/kWh (4%) a 0,18 USD/kWh (12%). Alcançando o preço comercial para o hidrogênio no primeiro ano após a implementação do sistema na usina São Manoel.

Conclui-se que considerando o processo completo de geração de biohidrogênio usando a bioeletricidade produzida pelo conjunto motor/gerador o sistema é viável e dado que o preço do hidrogênio no mercado de 0,29 USD/kWh (GARCÍA, 2023) é atingido no primeiro ano após a implementação do sistema. Portanto, infere-se que para as duas usinas nos primeiros 5 anos, uma receita anual do sistema é esperada.

Os valores necessários para o cálculo da receita anual para a produção de biohidrogênio, utilizando a equação (35), com suas dimensões corrigidas, são

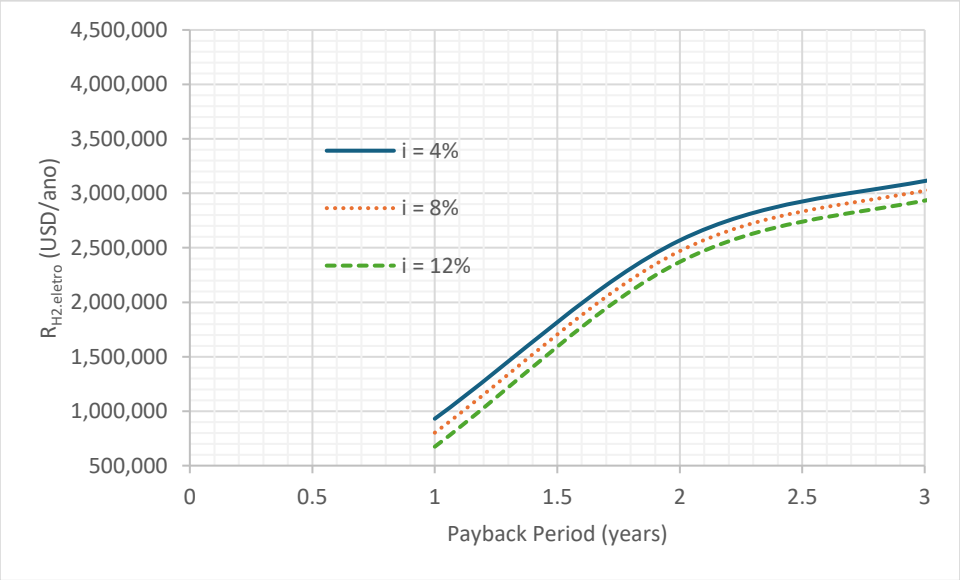
apresentados na Tabela 32, e o resultado dos cálculos é mostrado nas Figura 33 e Figura 34:

Tabela 32: Parâmetros fixos para cálculo do rendimento anual projetado.

Preço de venda do biohidrogênio	0,291 US$/kWh
Período de trabalho	7300 h
Custo da eletricidade	0,145 US$/kWh

Fonte: Produção do próprio autor

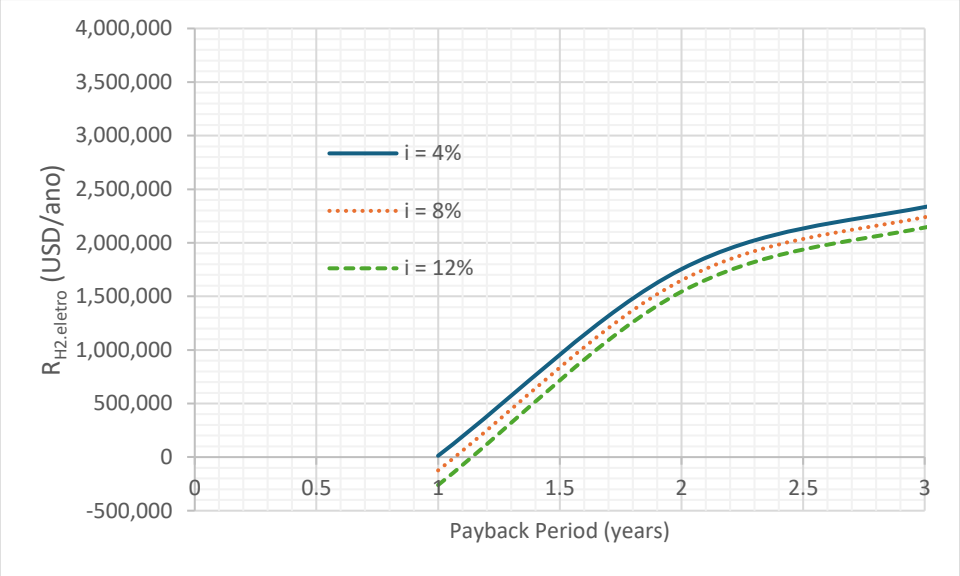
Figura 33: Receita anual esperada da produção de Biohidrogênio a partir da Bioeletricidade fornecida pela usina São José da Estiva.



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da figura 33, fica claro que, a partir do processo completo, agora considerando também a produção de biohidrogênio, o tempo de retorno do investimento no motor/gerador e no eletrolisador aumenta um pouco comparado com o sistema só gerando bioeletricidade. Tendo uma renda esperada desde o primeiro ano de funcionamento sendo 930.922,99 USD para uma taxa de juros de 4% e 674.057,90 USD para uma taxa de 12% para a planta São José da Estiva.

Figura 34: Receita anual esperada da produção de Biohidrogênio a partir da Bioeletricidade fornecida pela usina São Manoel.



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da figura 34, o tempo de retorno do investimento no motor/gerador e no eletrolisador também aumenta para a usina São Manoel. Para este caso se espera uma renda positiva de 12.276,45 USD no primeiro ano e 2.567.808,36 USD no segundo ano para uma taxa de juros de 4%, mas para uma taxa de juros de 12%, no primeiro ano o valor de receita obtido será ainda negativo, sendo de -260.946,77 USD, tendo a renda só a partir do segundo ano, sendo está de 1.543.357,53 USD.

Mesmo tendo obtido um pequeno aumento no tempo de retorno do investimento para as duas usinas; se levamos em consideração que esses valores consideram que o eletrolisador está funcionando apenas com a bioeletricidade produzida pelo motor/gerador e não consumindo eletricidade da rede elétrica geral ou da própria energia que geram as usinas, pode-se inferir que esse sistema proposto, funcionando 7300 horas a cada ano, pode ser viável para esse tipo de usina de açúcar e etanol.

Além disso, é bom afirmar que, para o caso da usina São José da Estiva, o investimento inicial foi recuperado antes do primeiro ano após a implementação. E para o caso da usina São Manoel, o investimento inicial foi recuperado entre o primeiro e o segundo ano após a implementação do sistema. Para São José da Estiva, se espera no decimo ano uma renda de 3.874.304,90 USD para uma taxa de juros de 4%, e uma renda de 3.701.905,98 USD para uma taxa de juros de 12%. E no caso de São Manoel, no

decimo sétimo ano de uso terá uma renda de 3.143.103,98 USD para uma taxa de 4%, e uma renda de 2.959.726,05 USD para uma taxa de juros de 12%.

Como pode ser observado, em nenhum dos dois casos o período de espera para recuperar o investimento inicial nos componentes do sistema ultrapassa os primeiros 3 anos. Sendo que a análise foi proposta para um período de 25 anos de uso, se pode dizer que o investimento feito no conjunto motor/gerador e no eletrolisador, mais os custos de operação e manutenção, são recuperados mesmo se a taxa de juros chega a 12%, e se terá uma renda da venda do biohidrogênio produzido.

8. CONCLUSÕES

O objetivo geral de realizar uma análise técnica e econômica da produção de biohidrogênio utilizando bioeletricidade obtida a partir de biogás de vinhaça foi atingido, o trabalho determinou que o sistema tem possibilidades reais de ser implementado. Os objetivos específicos do trabalho foram resolvidos na sua totalidade, dado que foi feito um estudo profundo do potencial de geração de bioeletricidade a partir de biogás de vinhaça da indústria sucro-alcooleira do brasil; foi compreendido o processo de eletrolises quando o eletrolisador funciona com bioeletricidade; foi analisada a eficiência energética da produção de biohidrogênio; assim como também foi determinado o custo de produção de biohidrogênio.

Os resultados da análise energética e econômica do sistema proposto foram avaliados para verificar a viabilidade de sua implementação nas duas plantas estudadas. Em primeiro lugar, pode-se afirmar que o sistema é autossustentável, pois requer só de um produto que faz parte do próprio processo da planta, que é a vinhaça, um subproduto do processo de destilação do etanol.

Além disso, também deve ser considerado que a maioria das usinas de açúcar gera sua própria eletricidade, seja por meio da combustão de bagaço ou outros processos. No sistema proposto neste estudo, essa geração de eletricidade a partir da planta não foi considerada, e a avaliação baseou-se exclusivamente na bioeletricidade gerada pelo motor/gerador para alimentar o eletrólito e gerar o biohidrogênio. Considerando também que para este trabalho, o 100% da produção de vinhaça foi utilizada para a geração de biogás, em trabalhos futuros, ao incluir a energia que a própria usina produz, esse percentual poderia diminuir, com apenas uma fração da vinhaça sendo usada para a geração de biogás e o restante da vinhaça sendo utilizado como fertilizante.

Também foi obtido que o investimento inicial feito para a implementação do sistema é recuperado antes dos 25 anos propostos para o funcionamento, sendo um tempo mínimo de 5 anos para São José da Estiva e de 8 anos para o caso de São Manoel, tornando o sistema viável para instalação em outras usinas de açúcar e álcool que possuam uma produção igual o parecida de entre 130.000 e 160.000 m^3/ano de etanol, que foi a faixa de produção das usinas estudadas.

Em conclusão, o processo de obtenção de biohidrogênio por eletrólise, usando apenas 30% da produção total de vinhaça de ambas as plantas, São José da Estiva e São Manoel, é um investimento viável a curto, médio e longo prazo, mesmo sem considerar a eletricidade gerada pela usina.

Para trabalhos futuros, sugere-se avaliar um sistema de produção de H_2 semelhante, mas usando outro tipo de combustível, como a combustão de bagaço de cana-de-açúcar, ou a implementação do sistema em outros tipos de plantas, como as de produção de milho e beterraba, que também são muito comuns no Brasil. Também é preciso implementar um sistema que aproveite a energia térmica perdida durante o processo, utilizando a técnica de cogeração, seja para produzir agua quente em sistema trocador de calor ou água gelada em sistema de refrigeração por absorção, corroborando para o aumento da eficiência energética global. Sugere-se ainda análise dos impactos ambientais associados ao sistema e desenvolvimento de modelos termo econômicos de otimização da produção de biohidrogênio a partir do biogás de vinhaça.

REFERÊNCIAS

AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 47, n. 57, p. 24136–24154, 2022.

BALAGUER, M. D.; VICENT, M. T.; PARÍS, J. M. Anaerobic fluidized bed reactor with sepiolite as support for anaerobic vinasse treatment. **Biotechnology Letters**, [*s. l.*], v. 14, n. 5, p. 433–438, 1992.

BARBOSA, I. **Relatório de Sustentabilidade 2022 São Manoel**. São Manoel: [*s. n.*], 2022.

BELINCANTA, J.; ALCHORNE, J. A.; SILVA, M. T. The Brazilian experience with ethanol fuel: Aspects of production, use, quality and distribution logistics. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 33, n. 4, 2016.

BOEHM, R. **Design Analysis of Thermal Systems**. [*S. l.*]: Wiley, 1987.v. 1.

BRIZI, F.; SILVEIRA, J. L.; DESIDERI, U.; REIS, J. A.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. D. Q. **Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system**: Comparison between natural gas and biogas. [S. l.: s. n.], 2014.

BUDIYONO; SYAICHURROZI, I.; SUMARDIONO, S. Effect of total solid content to biogas production rate from vinasse. I**nternational Journal of Engineering, Transactions B**: Applications, [s. l.], v. 27, n. 2, 2014.

CAMPOS, V. A. F.; CANTAGALLO, J. P. T.; LLERENA-PIZARRO, O. R.; SILVEIRA, J. L. Internal combustion engine fueled with biogas: energetic, economic and environmental analyses. **IEEE Latin America Transactions**, [s. l.], v. 17, n. 11, 2019.

CASSMAN, N. A.; LOURENÇO, K. S.; CARMO, J. B.; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. Genome-resolved metagenomics of sugarcane vinasse bacteria. **Biotechnology for Biofuels**, [*s. l.*], v. 11, n. 1, 2018.

CATERPILLAR. **CG260-16 DATASHEET**. [*S. l.: s. n.*], 2018. Disponível em: https://www.foleyinc.com/content/uploads/2016/07/CG260-16cyl_4050kW.pdf. Acesso em: 5 nov. 2024.

CONAB. **Monitoring of the Brazilian crop, 2022/2023 crop year 4th survey**. [*S. l.: s. n.*], 2023.

ESPAÑA-GAMBOA, E. I.; MIJANGOS-CORTÉS, J. O.; HERNÁNDEZ-ZÁRATE, G.; MALDONADO, J. A. D.; ALZATE-GAVIRIA, L. M. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. **Biotechnology for Biofuels**, [*s. l.*], v. 5, n. 1, p. 82, 2012.

FLORIAN GERLACH; BEATRICE GRIEB; ULI ZERGER. **Sustainable biogas production**: A handbook for organic farmers. 1642. ed. [S. l.]: FiBL, 2014.

GARCÍA, J. **The power of hydrogen: Exploring the energy potential of 1 kg of hydrogen**. [*S. l.: s. n.*], 2023.

GOMES, J. Eletrólise da água na obtenção de hidrogénio. **Revista de Ciência Elementar**, [*s. l.*], v. 10, n. 2, 2022. Disponível em: http://rce.casadasciencias.org/art/2022/025.

HASSAN, N. S.; JALIL, A. A.; RAJENDRAN, S.; KHUSNUN, N. F.; BAHARI, M. B.; JOHARI, A.; KAMARUDDIN, M. J.; ISMAIL, M. Recent review and evaluation of green hydrogen production via water electrolysis for a sustainable and clean energy society. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 52, 2024.

HYDROGENICS. **Generadores de hidrogeno HySTAT**. [*S. l.: s. n.*], 2017.

JU, H. K.; BADWAL, S.; GIDDEY, S. **A comprehensive review of carbon and hydrocarbon assisted water electrolysis for hydrogen production**. [*S. l.: s. n.*], 2018.

KIANI DEH KIANI, M.; PARSAEE, M.; SAFIEDDIN ARDEBILI, S. M.; REYES, I. P.; FUESS, L. T.; KARIMI, K. **Different bioreactor configurations for biogas production from sugarcane vinasse: A comprehensive review**. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2022.

KONCHINSKI V. **Estados se movimentam para produzir hidrôgenio verde.** [*S. l.: s. n.*], 2023.

LÓPEZ, I.; BORZACCONI, L. **Modelling of an EGSB treating sugarcane vinasse using first-order variable kinetics**. 10. ed. [S. l.: s. n.], 2011. v. 64.

MACHADO, V.; C. M. **Técnicas de previsão**. Caparica: FCT/UNL, 2023.

MACIEL, L. B. B.; VIOLA, L.; QUEIRÓZ LAMAS, W.; SILVEIRA, J. L. Environmental studies of green hydrogen production by electrolytic process: A comparison of the use of electricity from solar PV, wind energy, and hydroelectric plants. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 48, n. 93, 2023.

OBILEKE, K. C.; NWOKOLO, N.; MAKAKA, G.; MUKUMBA, P.; ONYEAKA, H. **Anaerobic digestion**: Technology for biogas production as a source of renewable energy: A review. [S. l.]: SAGE Publications Inc., 2021.

PARSAEE, M.; KIANI DEH KIANI, M.; KARIMI, K. **A review of biogas production from sugarcane vinasse**. [*S. l.: s. n.*], 2019.

PAULINO, R. F. S.; SILVEIRA, J. L. Biohydrogen production and bagasse gasification process in the sugarcane industry. *Em*: SUSTAINABLE BIOENERGY: ADVANCES AND IMPACTS. [*S. l.: s. n.*], 2019.

PAULINO, R. F. S. **Uso do Biogás para Produção de Biohidrogênio: Eletrólise versus Reforma a Vapor**. 2017. Master's Dissertation - Universidade Estadual Paulista "Julho Mesquita Filho", Guaratinguetá 2017.

PRENZIER, A.; FERNANDES, D.; PEREIRA, R.; MORAIS, T. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, [*s. l.*], v. 4, n. 1, p. 221–237, 2011.

REN, N.-Q.; TANG, J.; LIU, B.-F.; GUO, W.-Q. Biological hydrogen production in continuous stirred tank reactor systems with suspended and attached microbial growth. **International Journal of Hydrogen Energy**, [*s. l.*], v. 35, n. 7, p. 2807–2813, 2010.

SGT/ANEEL. **Tarifas de aplicação das distribuidoras de energia elétrica**. [*S. l.: s. n.*], 2022. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br. Acesso em: 19 mar. 2024.

SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. **Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review**. [*S. l.: s. n.*], 2019.

SHOENER, B. D.; ZHONG, C.; GREINER, A. D.; KHUNJAR, W. O.; HONG, P. Y.; GUEST, J. S. Design of anaerobic membrane bioreactors for the valorization of dilute organic carbon waste streams. **Energy and Environmental Science**, [*s. l.*], v. 9, n. 3, p. 1102–1112, 2016.

SILVEIRA, J. L. **Estudo de sistema de cogeração aplicado a fabricação de papel e celulose**. 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1990.

SILVEIRA, J. L. **Sustainable Hydrogen Production Processes**. Cham: Springer International Publishing, 2017. 2017.

SOUZA, L.; ALVES, H.; BORBA, C. **Modelagem e simulação da produção de biogás a partir da vinhaça e estimativa de produção de gás de síntese no setorsucroenergético**. 2020. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Federal do Paraná, Palotina 2020.

SYAICHURROZI, I. Review – Biogas Technology to Treat Bioethanol Vinasse. **Waste Technology**, [*s. l.*], v. 4, n. 1, 2016.

TAFANNUM TORSHA. **A Novel Approach for Anaerobic Treatment of Food Waste under Psychrophilic Temperature**. 2023. Master of Applied Science Civil Engineering - Concordia University, Montreal 2023.

TORSHA, T. **A novel approach for anaerobic treatment of food waste under psychrophilic temperature.** 2023. Dissertation (Master of Applied Science Civil Engineering) - Concordia University, Montreal, 2023.

USINA ESTIVA. **Etanol - Usina Estiva**. [*S. l.: s. n.*], 2023.

WENDLING, J. M. **Technical and economic feasibility analysis of a hybrid system applied to the sugar and alcohol sector**: use of vinasse biogas and photovoltaic energy. 2020. Dissertation (Master of Applied Science) - Concordia University Montreal, Quebec, 2023.

XAVIER, B. **Thermodynamic, ecological and economic aspects of cogeneration systems with internal combustion engines operating with natural gas, biogás and synthesis gas**. 2016. Dissertation (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Guaratinguetá 2016.

YADVIKA; SANTOSH; SREEKRISHNAN, T. R.; KOHLI, S.; RANA, V. **Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniqu**es: A review. [S. l.: s. n.], 2004.

YINGJIAN, L.; QI, Q.; XIANGZHU, H.; JIEZHI, L. Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [*s. l.*], v. 6, 2014.

ZAIAT, M. Z.; VIEIRA, L. G. T.; FORESTF, E. Spatial and temporal variations of monitoring performance parameters in horizontal-flow anaerobic immobilized sludge (Hais) reactor treating synthetic substrate. **Water Research**, New York, v.31, n.7, p.1760-1766, 1997.