

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA SENAI: CENTRO DE TECNOLOGIA DA
INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL

André Luis Vigné Larcher Filho

**PROJETO CONCEITUAL DE ENGENHARIA DE UMA PLANTA DE ELETRÓLISE
E CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM PARA GERAÇÃO DE H₂V E
ENERGIA LIMPA**

Rio de Janeiro
Junho de 2024

André Luis Vigné Larcher Filho

**PROJETO CONCEITUAL DE ENGENHARIA DE UMA PLANTA DE ELETRÓLISE
E CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM PARA GERAÇÃO DE H₂V E
ENERGIA LIMPA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador: Roberto Bentes de Carvalho

Rio de Janeiro

Junho de 2024

L319p Larcher Filho, André Luis Vigné.

Projeto conceitual de engenharia de uma planta de eletrólise e célula de combustível do tipo PEM para geração de H₂V e energia limpa / André Luis Vigné Larcher Filho - 2024.
56 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - SENAI CETIQT, Rio de Janeiro, 2024

1. H₂V. 2. Eletrólise. 3. Célula Combustível. I. Carvalho, Roberto Bentes de (Orientador). II. SENAI CETIQT. III. Título

CDD

André Luis Vigné Larcher Filho

**PROJETO CONCEITUAL DE ENGENHARIA DE UMA PLANTA DE ELETRÓLISE
E CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM PARA GERAÇÃO DE H₂V E
ENERGIA LIMPA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.
Aprovada em: 17/06/2024

Aprovado por:



Orientador: Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc. – SENAI CETIQT

Banca Examinadora:



André Luiz Carneiro Simões, M.Sc. – SENAI CETIQT



Adriana Alves Barbosa, M.Sc. – SENAI CETIQT



Pedro Chatack Dias, Eng. – PUC-RIO/CEPEL

Rio de Janeiro

Junho de 2024

Dedico este trabalho aos meus pais, André Luis Vigné Larcher e Alessandra Rodrigues Larcher, os pilares da minha vida. Todo o apoio que vocês me dão são as luzes que guiam cada passo da minha jornada. O amor que sinto por vocês é a força motriz por trás de cada conquista, e por isso, este trabalho é dedicado a vocês, com profunda gratidão e amor.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este ciclo repleto de intensos desafios e valiosos aprendizados, é imprescindível expressar minha gratidão a todos que me apoiaram e contribuíram até a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Roberto Bentes. Foi um ótimo orientador e professor, cujas orientações e apoios foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sua dedicação e paciência me guiaram por todo esse processo, e sou imensamente grato por sua ajuda.

Aos professores André Simões, Cláudia Gimenez, e à ex-professora da instituição, Flávia Duta, que foram grandes inspirações para mim. A grande admiração que tenho por seus conhecimentos e suas personalidades únicas foi um verdadeiro estímulo. Muito obrigado por serem exemplos de excelência e dedicação.

Aos meu pais, André Vigné e Alessandra Rodrigues. Pai, você é meu eterno apoio e sempre esteve ao meu lado em todas as decisões que tomei, oferecendo suporte incondicional e orientação. Sua presença e conselhos foram essenciais em todos os momentos. Mãe, você esteve presente nos momentos mais importantes da minha vida. Seu amor, cuidado e apoio são inestimáveis. Obrigado por ser minha rocha em todos os momentos. Vocês dois são a base de todas as minhas conquistas.

À minha avó Ivete Vigné, que sempre ajudou a mim e aos meus pais nos momentos difíceis. Seu amor e generosidade são fontes de inspiração para mim.

À minha tia Adriana Rodrigues, minha tia-avó Ivone Rodrigues, minha prima Marcele Rodrigues e à minha avó Ivonete Rodrigues, que sempre me apoiaram em tudo e fizeram com que nosso laço familiar fosse tão especial. Agradeço por estarem sempre presentes, e sou grato por todo o amor e incentivo de vocês.

À minha prima, Leticia Rodrigues, que é como uma irmã para mim. Seu apoio e amizade foram inestimáveis ao longo dos anos. Obrigado por estar sempre ao meu lado, sou muito grato por tê-la em minha vida.

E aos meus avôs, Paulo Larcher e Luiz Cabral, que faleceram quando eu ainda era criança. Embora o tempo que passei com eles tenha sido breve, as memórias que guardo são preciosas. Vocês foram pessoas que amei e respeitei profundamente, e me orgulho das histórias de vida que compartilharam comigo.

Por fim, agradeço a todos os amigos e colegas que me acompanharam nesta jornada. Com vocês, todo o caminho percorrido ficou mais dinâmico e divertido.

A transição para a energia limpa significa fazer um investimento no nosso futuro.

Gloria Reuben

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto conceitual de uma planta de eletrólise e célula a combustível do tipo PEM para a geração de hidrogênio verde (H₂V) e energia limpa. Com a crescente preocupação com questões energéticas e a necessidade de promover a sustentabilidade, o desenvolvimento deste projeto surge como uma alternativa promissora para a produção de energia limpa e renovável. Para alcançar esse objetivo, o trabalho foi conduzido com base em pesquisas bibliográficas, utilizando dados e informações relevantes sobre os princípios da eletrólise e da célula a combustível. A planta projetada possui uma capacidade de 1 MW. Seguindo a metodologia *Front End Loading* (FEL), desenvolveu-se o FEL-1 do processo de interesse, elaborando: a Tabela de Processos, o Diagrama de Blocos e o Balanço Preliminar de Massa e Energia. Com as informações obtidas, realizou-se ainda uma estimativa preliminar do investimento inicial necessário para implementar a planta, obtendo um valor próximo à 55 milhões de reais.

Palavras-chave: Célula Combustível. Eletrólise. Hidrogênio Verde. PEM

ABSTRACT

This paper presents the conceptual design of an electrodialysis and PEM fuel cell plant for the generation of green hydrogen (H₂V) and clean energy. With the growing concern about energy issues and the need to promote sustainability, the development of this project emerges as a promising alternative to produce clean and renewable energy. To achieve this objective, the work was conducted based on bibliographic research, using relevant data and information about the principles of electrodialysis and fuel cells. The designed plant has a capacity of 1 MW. Following the Front End Loading (FEL) methodology, FEL-1 of the process of interest was developed, elaborating the Process Table, Block Diagram, and Preliminary Mass and Energy Balance. With the obtained information, a preliminary estimate of the initial investment required to implement the plant was also made, obtaining a value close to 55 million reais.

Keywords: Fuel Cell. Electrolysis. Green Hydrogen. PEM

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ELETRÓLISE ALCALINA.....	20
FIGURA 2 - ELETRÓLISE DE ÓXIDO SÓLIDO	21
FIGURA 3 - ELETRÓLISE DO TIPO PEM	23
FIGURA 4 - SEQUÊNCIA DE ETAPAS UTILIZADAS NA METODOLOGIA DO TRABALHO	33
FIGURA 5 - TABELA DE PROCESSOS DA ELETRÓLISE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA	35
FIGURA 6 - TABELA DE PROCESSOS DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	36
FIGURA 7 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO.....	37
FIGURA 8 - TABELA COM REFERENCIAL DO ΔG E ΔH DE FORMAÇÃO DA ÁGUA.....	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES DOS TIPOS DE ELETRÓLISE	24
TABELA 2 - VANTAGENS DOS TIPOS DE ELETRÓLISE	25
TABELA 3 - DESVANTAGENS DOS TIPOS DE ELETRÓLISE	25
TABELA 4 - VANTAGENS DA CÉLULA COMBUSTÍVEL (PEM).....	27
TABELA 5 - DESVANTAGENS DA CÉLULA COMBUSTÍVEL (PEM)	27
TABELA 6 - DADOS DAS CORRENTES DO PROJETO	51

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - ETAPAS PARA DETERMINAR A ENERGIA DE ENTRADA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL	40
EQUAÇÃO 2 - ETAPAS PARA DETERMINAR A VAZÃO MÁSSICA DE H_2 QUE ENTRA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL	41
EQUAÇÃO 3 - ETAPAS PARA DETERMINAR A VAZÃO MÁSSICA DE AR QUE ENTRA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL	42
EQUAÇÃO 4 - ETAPAS PARA DETERMINAR A VAZÃO MÁSSICA DE ÁGUA NECESSÁRIA PARA A ELETRÓLISE	44
EQUAÇÃO 5 - ETAPAS PARA DETERMINAR A VAZÃO MÁSSICA DE O_2 QUE É LIBERADO DA ELETRÓLISE	45
EQUAÇÃO 6 - ETAPAS PARA DETERMINAR VAZÃO MÁSSICA DO NaCl COMO FLUIDO DE ENTRADA	46
EQUAÇÃO 7 - ETAPAS PARA DETERMINAR A COMPOSIÇÃO DA SOLUÇÃO SALINA E VAZÃO MÁSSICA DOS COMPONENTES QUE ENTRAM NA ELETRÓLISE	47
EQUAÇÃO 8 - ETAPAS PARA DETERMINAR A ENERGIA TOTAL NECESSÁRIA PARA QUE OCORRA O PROCESSO	50
EQUAÇÃO 9 - ETAPAS PARA DETERMINAR O CAPEX PARA IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA.....	52

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
1.1. INTRODUÇÃO	15
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
1.3. JUSTIFICATIVA	17
1.4. DELIMITAÇÃO	18
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. ELETRÓLISE DA ÁGUA	19
2.2. DIFERENTES TIPOS DE ELETRÓLISE	20
2.2.1. Eletrólise Alcalina	29
2.2.2. Eletrólise de Óxido de Sólido (SOE)	21
2.2.3. Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons (PEM)	22
2.3. ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DOS DIFERENTES TIPOS DE ELETRÓLISE	24
2.4. CÉLULA A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM	26
2.5. SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE	28
2.6. APLICAÇÕES E EXPECTATIVAS FUTURAS	28
2.7. METODOLOGIA FEL	29
2.7.1. Front End Loading 1 (FEL 1)	29
2.7.2. Front End Loading 2 (FEL 2)	30
2.7.3. Front End Loading 3 (FEL 3)	30
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	32
3.1. MAPA MENTAL	33
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. TABELA DE PROCESSOS	34
4.2. DIAGRAMA DE BLOCOS	34
4.3. MEMÓRIA DE CÁLCULO PRELIMINAR DO BALANÇO DE MASSA E ENERGIA	39
4.3.1. Dados Encontrados na Bibliografia	39
4.3.1.1. Dados Referentes a Eletrólise e Célula Combustível (PEM)	39
4.3.1.2. Dados Referentes as Massas Molares	40
4.3.2. Determinação da Energia de Entrada Necessária para a PEM	40
4.3.3. Determinação da Vazão Mássica do H₂ que Entra na PEM	41

4.3.4. Determinação da Vazão Mássica do Ar que Entra na PEM	42
4.3.5. Determinação da Vazão Mássica Necessária de H₂O que Alimenta a Eletrólise	44
4.3.6. Determinação da Vazão Mássica de O₂ que é Liberado pela Eletrólise	45
4.3.7. Determinação da Vazão Mássica do NaCl	46
4.3.8. Determinação da Composição da Solução Salina	47
4.3.9. Determinação da Energia Necessária para a Eletrólise	49
4.3.10. Construção de uma Tabela de Balanço Preliminar de Massa e Energia	51
4.4. ESTIMATIVA PRELIMINAR DO INVESTIMENTO FIXO (CAPEX) NECESSÁRIO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA	52
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO	53
5.1. SUGESTÕES FUTURAS	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem havido um crescimento consistente na emissão contínua de gases de efeito estufa, resultando em um aumento gradual da temperatura média global. Atualmente, o planeta está cerca de um grau mais quente do que estava antes da era da industrialização. No entanto, apesar do aumento parecer pequeno, sua importância é significativa. Com base nesses problemas, o Relatório de Avaliação Climática Nacional de 2018 alertou que, sem uma redução rápida nas emissões globais, pode-se haver uma séria crise econômica e ambiental (Osmanski, 2020).

A produção de energia é um tema de grande importância na atualidade, tendo em vista a crescente demanda por fontes de energia limpa e renovável. O hidrogênio, que é considerado uma fonte de energia limpa e renovável, pois quando é queimado o único subproduto é a água, pode ser considerado um combustível alternativo promissor. Isso ocorre porque sua produção pode vir a partir de fontes renováveis, como a energia solar, eólica e hidrelétrica (Arnemann, 2019).

Quando se trata do armazenamento de energias renováveis, o hidrogênio é amplamente reconhecido como o método mais eficaz para armazenar energia proveniente de fontes renováveis e intermitentes. Nesse contexto, pode ser testemunhado uma transição energética em escala global, que tende a substituir as matrizes energéticas baseadas em combustíveis fósseis por fontes renováveis e limpas, como a energia solar e eólica (Miranda, 2017).

Aproximadamente 47% da produção global de hidrogênio é derivada do gás natural, 27% do carvão, 22% do petróleo (como subproduto), e apenas cerca de 4% é resultado do processo de eletrólise da água (International Renewable Energy Agency, 2022)

Avanços tecnológicos podem tornar esse processo de geração de energia através da eletrólise da água como uma forma de produção mais atrativa para o futuro. Assim, como uma

opção de longo prazo, a produção de H_2 por meio da eletrólise da água também pode contribuir significativamente para a expansão do uso de energias renováveis (Peredo, 2012).

Dentre as diversas opções para a produção de hidrogênio, a eletrólise se destaca atualmente como uma alternativa viável, fazendo uso de fontes de energia renovável. Esta abordagem é vista como promissora para superar os desafios da variação na geração de energia em fontes renováveis convencionais, como parques eólicos. Os dispositivos de eletrólise têm o potencial de converter a eletricidade gerada a partir de fontes de energia renovável em energia química, e quando combinados com células a combustível, podem novamente transformar o hidrogênio em eletricidade. Este sistema possibilita um armazenamento eficiente de energia e uma distribuição mais rápida e ampla na rede elétrica (Falcão e Pinto, 2020).

Com relação aos tipos de células a combustíveis operadas com hidrogênio, destaca-se a membrana trocadora de prótons (“Proton Exchange Membrane” - PEM), devido à sua grande eficiência. A PEM é considerada uma estratégia promissora para a produção de energia renováveis (Arnemmann, 2019).

Diante do contexto do tema abordado, a produção de energia é um tema de grande importância na atualidade, tendo em vista a crescente demanda por fontes de energia limpa e renovável. O hidrogênio verde, que é o nome dado ao hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis, como a energia solar, eólica e hidrelétrica, é considerado uma fonte de energia limpa, pois não emite nenhum poluente durante seu processo de produção, gerando apenas o oxigênio como único subproduto.

Portanto, o presente trabalho busca analisar estudos que envolvem a produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise da água, com utilização de energia solar, e célula a combustível PEM para a geração de energia limpa.

Dessa forma, a problematização do tema envolveu a necessidade de encontrar alternativas sustentáveis para a produção de energia limpa, auxiliando também para uma maior diversificação da matriz energética.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um projeto conceitual de engenharia de uma planta de eletrólise e célula a combustível do tipo PEM para geração H₂V e energia limpa.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver uma Tabela de Processos com as principais informações sobre o funcionamento das tecnologias de eletrólise e célula a combustível - PEM;
- Elaborar um Diagrama de Blocos para ilustrar uma visão geral do processo de energia limpa através da combinação da eletrólise e célula a combustível - PEM;
- Realizar uma memória de cálculo preliminar de balanço de massa e energia do processo de eletrólise e célula a combustível - PEM;
- Construir as memórias de cálculos para determinação do CAPEX do eletrolisador e da célula a combustível - PEM.

1.3. JUSTIFICATIVA

A constante preocupação com a preservação do meio ambiente e a busca por fontes de energias renováveis e limpas têm se tornado temas centrais no contexto global. Diante desse cenário, projetos que visam o desenvolvimento e a implementação de tecnologias sustentáveis vem ganhando cada vez mais relevância. Nesse contexto, a proposta de um projeto conceitual de engenharia de uma planta de eletrólise e célula de combustível do tipo PEM para geração de

H₂V e energia limpa traz uma contribuição na jornada de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais decorrentes de sua utilização.

A implementação de uma planta de eletrólise e célula de combustível para a geração de H₂V e energia limpa apresenta potencial para impulsionar o desenvolvimento econômico, uma vez que promove a diversificação da matriz energética e a criação de novas oportunidades de negócio e emprego no setor de energias renováveis.

1.4. DELIMITAÇÃO

O presente trabalho limita-se a projetar a fase conceitual de uma planta de produção de hidrogênio verde e energia limpa através da eletrólise e célula combustível PEM, buscando compreender o processo, as reações envolvidas, forças motrizes e princípios de funcionamento.

A pesquisa se concentrará na análise de diferentes tipos de eletrolisadores, e também nas células a combustível do tipo PEM, analisando seus parâmetros de funcionamento e suas eficiências produtivas, que serão utilizadas no projeto conceitual desenvolvido. Através desse estudo, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento sobre a produção de hidrogênio verde e geração de energia limpa, fornecendo informações preliminares que poderão ser utilizados futuramente para as fases de projetos básicos e de detalhamento.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ELETRÓLISE DA ÁGUA

Segundo Himabindu e Kumar (2019), a utilização da eletrólise da água destaca-se como um dos métodos mais eficazes para a produção de hidrogênio, pois emprega uma fonte renovável de H_2O e gera oxigênio puro como subproduto. Além disso, esse processo utiliza energia elétrica de corrente contínua proveniente de fontes sustentáveis, como energia solar, eólica e biomassa. No entanto, atualmente, apenas cerca de 4% do hidrogênio é produzido por meio da eletrólise da água, principalmente devido a questões econômicas.

Himabindu e Kumar (2019) também comentam que é previsto que essa proporção aumente nos próximos anos, à medida que a utilização de energias renováveis, como solar, eólica e nuclear, cresça. Além disso, a eletrólise da água apresenta diversas vantagens, que incluem a alta eficiência da célula e uma taxa elevada de produção de hidrogênio com alta pureza, o que é vantajoso para sua subsequente conversão em energia elétrica por meio de células de combustível de baixa temperatura.

Himanbindu e Kumar (2019) explicam que durante o processo de eletrólise, a molécula de água é decomposta em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) sob a influência da eletricidade. Para esse processo de eletrólise, existem alguns tipos principais de métodos de eletrólise, classificados com base no tipo de eletrólito, condições de operação e agentes iônicos envolvidos (OH^- , H^+ , O_2). Esses métodos incluem a Eletrólise de Água Alcalina (AWE), a Eletrólise de Óxido Sólido (SOE) e a Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons (PEM).

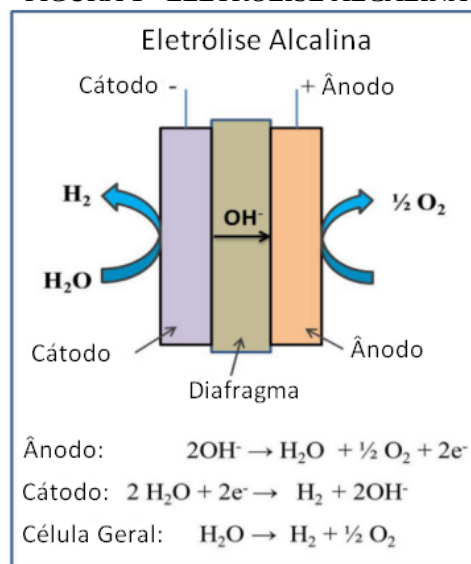
O gás armazenado de hidrogênio tem a capacidade de ser aproveitado para suprir a demanda por energia elétrica através das células a combustível. Esse processo tem o benefício de eliminar a intermitência natural da energia solar, garantindo um fornecimento contínuo e estável de energia quando necessário. Dessa forma, o armazenamento de energia na forma de gás oferece uma solução eficaz para superar os desafios associados à variabilidade da geração de energia solar (Fukurozaki, 2011).

2.2. DIFERENTES TIPOS DE ELETRÓLISE

2.2.1. Eletrólise Alcalina

Segundo Himabindu e Kumar (2019), a técnica de produção de hidrogênio através da eletrólise alcalina da água é uma prática consolidada em larga escala, com capacidade de alcançar até a faixa dos megawatts para uso comercial global. A origem desse processo remonta a 1789, quando Troostwijk e Diemann fizeram suas primeiras observações. Durante a eletrólise alcalina, no cátodo, duas moléculas de solução alcalina (KOH/NaOH) são reduzidas a uma molécula de hidrogênio (H₂), produzindo também dois íons hidroxila (OH⁻). O hidrogênio formado é liberado da superfície do cátodo, recombinando-se na forma gasosa, enquanto os íons hidroxila (OH⁻) são conduzidos através do circuito elétrico, passando pelo diafragma poroso para chegar ao ânodo. O oxigênio se combina novamente na superfície do eletrodo e é liberado, conforme ilustrado no mecanismo representado na Figura 1.

FIGURA 1 - ELETRÓLISE ALCALINA



Fonte: Adaptado de Himabindu e Kumar (2019)

Para Carmo *et al.* (2013), os eletrolisadores alcalinos enfrentam três principais desafios. Primeiramente, o diafragma não consegue bloquear completamente a difusão cruzada dos gases do produto, o que pode reduzir a eficiência do processo. Isso ocorre porque o oxigênio pode se difundir para a câmara catódica, onde pode reagir com o hidrogênio presente no lado do cátodo. Além disso, a mistura extensiva de gases, particularmente a difusão de hidrogênio para a câmara

de evolução de oxigênio, precisa ser evitada para preservar a eficiência e a segurança do sistema, especialmente em cargas baixas, ou seja, menores que 40%, onde a produção de oxigênio diminui, aumentando drasticamente a concentração de hidrogênio para níveis perigosos.

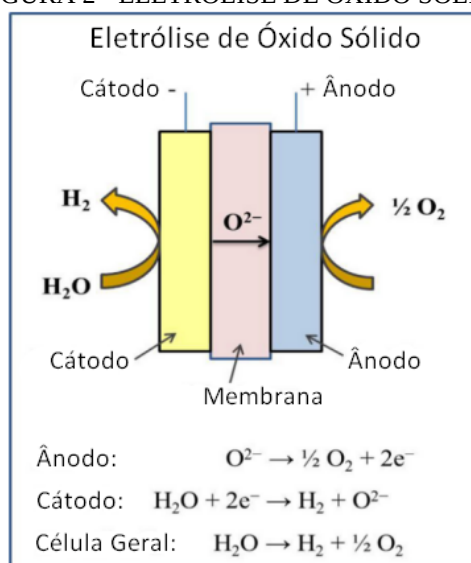
Carmo *et al.* (2013) também afirma que outro desafio enfrentado pelos eletrolisadores alcalinos é a baixa densidade de corrente máxima alcançável, devido às perdas *ôhmicas* elevadas no eletrólito líquido e no diafragma. Além disso, a incapacidade de operar em alta pressão resulta em um *design* de pilha volumoso, o que representa um desafio adicional para a eficiência e compactação do sistema.

2.2.2. Eletrólise de Óxido de Sólido (SOE)

Segundo Himabindu e Kumar (2019), a eletrólise de óxido sólido (SOE), introduzida pela primeira vez por Donitz e Erdle na década de 1980, recebeu muita atenção devido à sua capacidade em converter energia elétrica em energia química, resultando na produção de hidrogênio ultrapuro com alta eficiência. Operando em altas pressões e temperaturas entre 500°C e 850°C, a eletrólise de óxido sólido utiliza vapor d'água como fonte de hidrogênio.

Himabindu e Kumar (2019) comentam que, tradicionalmente, este processo emprega condutores de oxigênio, predominantemente compostos de zircônia, estabilizada com níquel/íttria, operando pelo princípio de SOE, conforme ilustrado na Figura 2

FIGURA 2 - ELETRÓLISE DE ÓXIDO SÓLIDO



Fonte: Adaptado de Himabindu e Kumar (2019)

Atualmente, há um aumento de interesse nos materiais cerâmicos condutores de prótons para a eletrólise SOE, devido à sua alta eficiência e capacidade iônica superior em comparação com os condutores de oxigênio, especialmente em temperaturas operacionais entre 500°C e 700°C. No entanto, apesar de suas vantagens, esses materiais cerâmicos ainda enfrentam desafios relacionados à estabilidade e à degradação, que precisam ser resolvidos antes que possam ser comercializados em larga escala (Himabindu e Kumar, 2019).

2.2.3. Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons (PEM)

Na década de 1950, Grubb concebeu o método inicial de eletrólise da água utilizando membranas de troca de prótons (PEM), sendo posteriormente desenvolvido pela General Electric Co. em 1966 para superar as limitações da eletrólise alcalina. Essa tecnologia, similar à utilizada em células de combustível PEM, emprega membranas sólidas de polissulfona, como Nafion e *fumapem*, como eletrólitos condutores de prótons. Essas membranas oferecem diversas vantagens, como menor permeabilidade a gases, alta condutividade de prótons, e menor espessura, permitindo operações em alta pressão. Do ponto de vista da sustentabilidade e do impacto ambiental, a eletrólise da água PEM é uma das formas mais favoráveis de converter energia renovável em hidrogênio de alta pureza. (Vidas e Castro, 2021)

De acordo com Himabindu e Kumar (2019), uma outra abordagem promissora da eletrólise da água PEM apresenta são benefícios como *design* compacto, alta densidade de corrente, alta eficiência, resposta rápida, pegada reduzida, operação em temperaturas mais baixas (20–80 °C) e produção de hidrogênio ultrapuro, além da geração de oxigênio como subproduto.

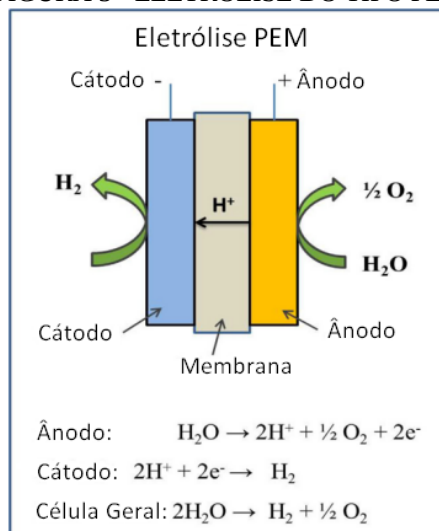
A simplificação do balanceamento das instalações de eletrólise PEM é atrativa para aplicações industriais. Os eletrocatalisadores de última geração, como Pt/Pd para a Reação de Evolução de Hidrogênio (HER) no cátodo e IrO₂/RuO₂ para a Reação de Evolução de Oxigênio (OER) no ânodo, contribuem para o alto desempenho, embora encareçam a eletrólise da água em comparação com a eletrólise alcalina (Himabindu e Kumar, 2019).

Dessa forma, Himabindu e Kumar (2019) afirmam que, reduzir o custo de produção mantendo a eficiência é um dos principais desafios na eletrólise da água PEM, sendo assim

necessário a realização de pesquisas dedicadas à melhoria de seus componentes, visando sua pronta entrada nos mercados comerciais.

Himabindu e Kumar (2019) também comentam que na eletrólise da água PEM ocorre a divisão eletroquímica da água em hidrogênio e oxigênio nos respectivos eletrodos, com a formação de hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo. Nesse processo, a água é bombeada para o ânodo, onde se decompõe em oxigênio (O_2), prótons (H^+) e elétrons (e^-). Os prótons são então transportados através da membrana condutora de prótons em direção ao cátodo, enquanto os elétrons fluem do ânodo através de um circuito externo de energia, que fornece a força necessária para a reação ocorrer. No cátodo, os prótons e elétrons se combinam novamente, resultando na produção de hidrogênio, conforme ilustrado no diagrama da Figura 3.

FIGURA 3 - ELETRÓLISE DO TIPO PEM



Fonte: Adaptado de Himabindu e Kumar (2019)

De maneira geral, a eletrólise PEM apresenta diversas vantagens em relação ao eletrolisador alcalino. Isso inclui um nível superior de pureza devido à baixa permeabilidade gasosa da membrana, capacidade de operar em densidades de corrente elevadas e a capacidade de integração dos modos de eletrolisador e célula de combustível. Apesar dessas vantagens, o uso de eletrolisadores de água PEM é limitado, principalmente devido ao seu custo mais elevado, associado ao investimento em materiais como platina, irídio e rutênio, necessários para operar em condições de baixo pH da membrana eletrolítica. Além disso, sua vida útil (10-20 anos) é geralmente menor quando comparada à do eletrolisador alcalino (20-30 anos) (Carmo *et al.*, 2013).

2.3. ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DOS DIFERENTES TIPOS DE ELETRÓLISE

Segundo Carmo *et al.* (2013), os eletrolisadores PEM têm a capacidade de operar em densidades de corrente significativamente mais altas, podendo exceder 2 A/cm², o que resulta em uma redução nos custos operacionais e, potencialmente, no custo total do processo de eletrólise, como mostram as Tabelas 1, 2 e 3.

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES DOS TIPOS DE ELETRÓLISE

Especificações	Eletrólise Alcalina	Eletrólise PEM
Temperatura da célula (°C)	60 - 80	50 - 80
Pressão da célula (bar)	< 30	< 30
Densidade de corrente (mA.cm ⁻²)	0,2 - 0,4	0,6 - 2,0
Voltagem da célula (V)	1,8 - 2,4	1,8 - 2,2
Densidade de potência (mW.cm ⁻²)	< 1	< 4,4
Eficiência de tensão PCS (%)	62 - 82	67 - 82
Consumo específico de energia armazenado (kW.h.Nm ⁻³)	4,2 - 5,9	4,2 - 5,6
Consumo específico de energia do sistema (kW.h.Nm ⁻³)	4,5 - 7,0	4,5 - 7,5
Faixa de carga parcial inferior (%)	20 - 40	0 - 10
Área celular (m ²)	> 4	< 0,03
Taxa de produção de H ₂ no sistema de armazenamento (Nm.h ⁻¹)	< 760	< 10
Tempo de vida do armazenamento (h)	< 90.000	< 20.000
Tempo de vida do sistema (y)	20 - 30	10 - 20
Taxa de degradação (μV h ⁻¹)	< 3	< 4

Fonte: Adaptado de Carmo et al. (2013)

Por outro lado, as perdas *ôhmicas* limitam as densidades máximas de corrente, onde uma membrana fina com boa condutividade de prótons pode permitir alcançar densidades de corrente mais elevadas. Além disso, devido à membrana de polímero sólido, os eletrolisadores PEM podem utilizar um eletrólito mais fino em comparação com os eletrolisadores alcalinos (Carmo *et al.*, 2013).

De acordo com Carmo *et al.* (2013), a membrana eletrolítica de polímero dos eletrolisadores PEM possui uma baixa taxa de passagem de gás, o que resulta na produção de hidrogênio de alta pureza. Isso permite que o eletrolisador PEM opere em uma ampla gama de entradas de energia, o que é vantajoso em termos econômicos. Essa capacidade é devida à rápida resposta do transporte de prótons através da membrana à entrada de energia, não sendo retardada pela inércia, como ocorre com eletrólitos líquidos.

TABELA 2 - VANTAGENS DOS TIPOS DE ELETRÓLISE

Eletrólise Alcalina	Eletrólise PEM	Eletrólise SOEC
Tecnologia bem estabelecida	Alta densidade de corrente	Eficiência até 100%; termoneutro
Catalisador não-nobre	Eficiência de alta tensão	Eficiência > 100% com vapor quente
Estabilidade de longa duração	Boa faixa de carga parcial	Catalisadores não-nobres
Custo relativamente baixo	Sistema rápido de resposta	Alta pressão de operação
Pilhas na faixa de MW	Projeto de sistema compacto	
Custo-benefício	Gás de alta pureza	
	Operação dinâmica	

Fonte: Adaptado de Carmo et al. (2013)

TABELA 3 - DESVANTAGENS DOS TIPOS DE ELETRÓLISE

Eletrólise Alcalina	Eletrólise PEM	Eletrólise SOEC
Baixas densidades de corrente	Alto custo dos componentes	Estágio laboratorial
Cruzamento de gases (grau de pureza)	Ácido corrosivo ao ambiente	Projeto de sistema volumoso
Baixa dinâmica	Possível baixa durabilidade	Durabilidade (cerâmica quebradiça)
Baixas pressões operacionais	Acúmulo inferior a faixa de MW	Não apresenta informações de custos confiáveis
Eletrólito de líquido corrosivo		

Fonte: Adaptado de Carmo et al. (2013)

Carmo *et al.*, (2013) afirma que, ao contrário dos eletrolisadores alcalinos, onde a produção de hidrogênio e oxigênio diminui em operações de baixa carga, enquanto a permeabilidade do hidrogênio através do diafragma permanece constante, levando a uma maior concentração de hidrogênio no lado do ânodo (oxigênio) e criando condições menos eficientes e potencialmente perigosas. Em contraste, os eletrolisadores PEM abrangem praticamente toda a faixa de densidade de potência nominal (10 a 100%).

Carmo *et al.*, (2013) comenta que um eletrólito sólido permite a concepção de um sistema compacto com propriedades estruturais robustas, onde é possível alcançar altas pressões operacionais, sejam iguais ou diferenciais através do eletrólito. A operação em alta pressão de um eletrolisador traz a vantagem de fornecer hidrogênio a uma pressão elevada, às vezes chamada de compressão eletroquímica, para o usuário final. Isso resulta em uma demanda reduzida de energia para comprimir e armazenar ainda mais o hidrogênio.

Além disso, a operação em alta pressão reduz o volume da fase gasosa nos eletrodos, melhorando consideravelmente a remoção do gás do produto, seguindo a lei de difusão de *Fick*. Em uma configuração de pressão diferencial, apenas o lado catódico (hidrogênio) está sob pressão, o que pode eliminar os riscos associados ao manuseio de oxigênio pressurizado e a possibilidade de sua autoignição. O aumento da pressão minimiza a expansão e desidratação da membrana, preservando a integridade da camada catalítica. Embora o aumento da pressão de operação resulte em tensões termodinâmicas mais altas, isso resulta apenas em uma melhoria ligeira da eficiência global, especialmente em densidades de corrente elevadas (Carmo *et al.*, 2013).

Para Carmo *et al.*, (2013), desafios relacionados às pressões operacionais mais elevadas na eletrólise PEM também se manifestam, como o aumento do fenômeno de permeação cruzada sob pressão. Quando as pressões ultrapassam 100 bar, torna-se necessário o uso de membranas mais espessas, embora mais resistentes, e de dispositivos internos de recirculação de gás para manter as concentrações críticas (principalmente de H_2 em O_2) abaixo do limite de segurança. Para reduzir a permeabilidade do gás através da membrana, pode-se incorporar diferentes preenchimentos dentro do material da membrana, embora isso geralmente resulte em materiais menos condutores.

Carmo *et al.*, (2013) também comenta que o ácido corrosivo criado pela membrana de troca de prótons demanda o uso de materiais específicos. Esses materiais não apenas precisam resistir às condições corrosivas de baixo pH (pH cerca de 2), mas também suportar as altas sobretensões aplicadas, especialmente em altas densidades de corrente. A resistência à corrosão não se aplica apenas aos catalisadores utilizados, mas também aos coletores de corrente e placas separadoras. Sendo assim, apenas alguns materiais são adequados para operar neste ambiente hostil, o que acarreta o uso de materiais e componentes escassos e caros, como catalisadores nobres (metais do grupo da platina - PGM, por exemplo, Pt, Ir e Ru), coletores de corrente à base de titânio e placas separadoras.

2.4. CÉLULA A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM

Segundo Sangtam e Park (2023), o mecanismo de funcionamento da célula combustível PEM é semelhante a eletrólise da água com membrana de troca de prótons (PEM), pois ambas

utilizam membranas sólidas para trocar prótons entre o ânodo e o cátodo. No entanto, seus objetivos e direções dos processos eletroquímicos são diferentes. Como visto anteriormente, na eletrólise da água PEM, a energia elétrica é usada para dividir a água em oxigênio e hidrogênio, este produzido no cátodo. Em contraste, uma célula de combustível PEM gera eletricidade a partir da introdução de hidrogênio e oxigênio, tendo a água como único subproduto.

Sangtam e Park (2023) comentam que, quando o gás hidrogênio entra na camada catalítica anódica de uma célula a combustível, ele se dissocia em duas partes. Uma parte forma um próton (H^+), que atravessa a membrana de troca de prótons até o cátodo. A outra parte se converte em um elétron (e^-), que percorre um circuito externo, gerando corrente elétrica. As Tabelas 4 e 5 exemplificam as vantagens e desvantagens das células a combustível do tipo PEM.

TABELA 4 - VANTAGENS DA CÉLULA COMBUSTÍVEL (PEM)

Características	Célula a Combustível (PEM)
Eficiência energética	Produção de energia a partir do fornecimento de hidrogênio e oxigênio
Baixo impacto ambiental	Só produz água como subproduto
Uso	Usado em diversas aplicações, como transporte e fontes de energia
Processo de inicialização	Capacidade de iniciar e parar rapidamente, tornando-o viável para diferentes demandas de energia

Fonte: Adaptado de Sangtam e Park (2023)

TABELA 5 - DESVANTAGENS DA CÉLULA COMBUSTÍVEL (PEM)

Características	Célula a Combustível (PEM)
Custo mais alto	Catalisadores como platina são caros, o que aumenta os custos de produção
Escassez de catalisador	Os catalisadores requerem metais como platina, resultando em preocupações de fornecimento
Longevidade e estabilidade	A vida útil do catalisador diminui com o tempo

Fonte: Adaptado de Sangtam e Park (2023)

2.5. SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Mascaro e Pereira (2021) comentam que a produção de hidrogênio enfrenta desafios significativos em termos de sustentabilidade. No entanto, a produção de hidrogênio verde oferece benefícios ambientais significativos em comparação com outras formas de produção de hidrogênio. Isso inclui a redução das emissões de gases de efeito estufa e a minimização do uso de recursos naturais. A produção de hidrogênio verde desempenha um papel crucial na transição energética, proporcionando uma solução sustentável para as necessidades futuras de energia.

Assim, para associar hidrogênio à ideia de sustentabilidade é necessário produzir preferencialmente o hidrogênio verde. O desafio é melhorar o processo de eletrólise da água para que a demanda de energia seja menor e possa ser suprida por fontes renováveis como solar ou eólica: desenvolver materiais para os anodos e catodos onde a quebra da ligação da molécula de água com posterior produção de hidrogênio e oxigênio ocorra com maior facilidade (o que demanda menor consumo de energia) e em maior quantidade (Mascaro e Pereira, 2021).

2.6. APLICAÇÕES E EXPECTATIVAS FUTURAS

Segundo Moore (2022), para que o hidrogênio verde atinja todo o seu potencial, esse precisa ser adaptado para a utilização em indústrias altamente poluentes. Além disso, embora o uso do hidrogênio verde ainda esteja no seu início, já foram desenvolvidas aplicações para essa fonte renovável. A substituição de matérias-primas de hidrogênio, onde o hidrogênio verde vem sendo utilizado para substituir as matérias-primas de hidrogênios existentes. Podendo ser utilizado também para sistemas de aquecimento residencial e comercial, em que o hidrogênio verde é utilizado para descarbonizar sistemas de aquecimento, que é uma importante fonte de emissão de carbono. Além desses, também pode ser utilizado no armazenamento de energia, onde é utilizado para o desenvolvimento de células combustível para geração de energia.

Diante disso, Moore (2022) comenta que o hidrogênio possui diversas aplicações em setores como transporte, geração de energia elétrica e aquecimento. Além disso, suas propriedades como fonte de energia limpa e seu potencial de armazenamento tornam o hidrogênio uma opção atraente para a transição energética. As tendências de mercado atuais

indicam investimentos significativos na produção de hidrogênio verde, sendo esperado que seu uso se expanda ainda mais no futuro. O hidrogênio verde é reconhecido como uma solução promissora e sustentável para a produção de energia, impulsionando a busca por alternativas energéticas mais limpas e renováveis.

2.7. METODOLOGIA FEL

A abordagem conhecida como *Front End Loading* (FEL) é um método utilizado na execução de projetos de engenharia, que visa desenvolvê-los em etapas para garantir o controle de riscos e maximizar os resultados esperados. Essa metodologia é caracterizada pelo uso de documentos e desenhos de engenharia, a fim de assegurar que o produto do projeto esteja em conformidade com as especificações técnicas desejadas e que os custos estejam alinhados com o planejamento (Ferreira, 2018).

Ferreira (2018) destaca que FEL é composto por três etapas de planejamento realizadas antes da execução do projeto, responsáveis pela avaliação da qualidade e, consequentemente, pela aprovação dos entregáveis em cada fase. Essas etapas são o projeto conceitual (FEL 1), o projeto básico (FEL 2) e o projeto de detalhamento (FEL 3). Cada uma dessas etapas envolve a elaboração de documentos e desenhos de engenharia com níveis crescentes de precisão e detalhamento, permitindo que o nível de detalhamento aumente ao longo do processo.

2.7.1. *Front End Loading* 1 (FEL 1)

A fase FEL 1 tem como objetivo avaliar e desenvolver oportunidades de investimento, levando em consideração a atratividade do projeto e a criação de valor. Essa etapa representa a definição do negócio, na qual o alinhamento estratégico e a análise de mercado são validados. A engenharia associada se baseia em índices de projetos semelhantes. Nessa etapa, ocorre a definição do escopo e dos objetivos do empreendimento, juntamente com uma estimativa inicial dos investimentos necessários (Ferreira, 2018).

Ocorre, também, a elaboração do Diagrama de Blocos, onde cada estágio, representado por um bloco, possui uma característica de "caixa preta", no qual apenas se conhece a existência

do estágio e sua função, além da Tabela de Processos em que há o detalhamento das tecnologias utilizados no processo, e pôr fim a construção da Memórias de Cálculo, com o balanço de massa preliminar (Spangler, 2005).

2.7.2. *Front End Loading 2 (FEL 2)*

A fase FEL-2 tem como objetivo desenvolver e articular o escopo do projeto até um ponto em que se pode ter a certeza de que todos os elementos do escopo foram considerados. Essa etapa é considerada a mais importante no desenvolvimento de qualquer projeto. No início do FEL-2, é necessário selecionar a tecnologia básica a ser aplicada ao projeto, caso essa seleção não tenha sido feita anteriormente. O escopo desenvolvido deve ser definido, analisado e validado por todas as disciplinas envolvidas, levando em consideração questões ambientais e de riscos. A etapa de FEL-2 marca o início do gerenciamento técnico do projeto e tem como foco reduzir o número de alternativas para chegar a uma única ou melhor opção (Ferreira, 2018).

O Fluxograma de Processos (PFD), esquema correspondente a este estágio, detalha as correntes principais do processo de forma mais específica e as enumera. Todos os equipamentos são representados por suas características pictóricas típicas, e aspectos relacionados à eletrônica. No entanto, o foco principal desta etapa é nas definições de processo para cada etapa operacional necessária (Spangler, 2005).

2.7.3. *Front End Loading 3 (FEL 3)*

A fase FEL3 concentra-se na construção e preparação do projeto para a aprovação corporativa e implantação futura. Nessa etapa, a Engenharia Básica da opção selecionada na fase FEL2 é desenvolvida, resultando em uma menor imprecisão no CAPEX do projeto. Essa fase é ideal para a aprovação pela Diretoria Executiva, uma vez que a probabilidade de mudanças no escopo é muito menor (Ferreira, 2018).

Além disso, segundo Ferreira (2018), o objetivo da FEL3 é desenvolver a engenharia detalhada, o plano de execução e a estimativa de custo detalhados para a alternativa selecionada

na fase anterior. Após a aprovação da FEL3, dá-se início à execução do projeto por meio dos seguintes processos: engenharia detalhada, que envolve o detalhamento do projeto de engenharia para a construção; Construção, que abrange a execução da engenharia detalhada e a construção em si; Início de Operação, quando o produto do projeto é iniciado; e Operação, que marca o início da operação do produto resultante do projeto.

O presente trabalho concentrou-se na criação de um projeto conceitual inicial, limitando-se à fase de *Front End Loading 1* (FEL 1).

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Este capítulo tem como função informar os métodos utilizados para realizar a pesquisa, e quais foram as etapas ocorrentes após a coleta de dados. Essa pesquisa utiliza a abordagem descritiva, ou seja, através da coleta e análise de características de um fenômeno que apresenta técnicas padronizadas.

Para realizar o projeto conceitual de uma planta de eletrólise e célula a combustível voltada para a geração de energia limpa, foram utilizados os softwares *draw.io* para a criação do Diagrama de Blocos e do Mapa Mental, e o software *excel* para o desenvolvimento da Memória de Cálculo Preliminar de Balanço de Massa e Energia e construção da Tabela de Processos.

Foi usado como instrumento de coleta de dados uma pesquisa bibliográfica referente aos processos de eletrólise e células combustível. A pesquisa bibliográfica foi filtrada em investigar o processo de funcionamento e coleta de dados referentes a diferentes tipos de eletrolisadores e células a combustível do tipo PEM. A metodologia de Projeto de Engenharia de Processos conhecida como FEL, foi o tipo escolhido para desenvolvimento do projeto.

A metodologia FEL é um processo de avaliação, análise e desenvolvimento de projetos que visa minimizar erros na fase de planejamento, reduzindo mudanças e retrabalhos durante a execução (Spangler, 2005).

A metodologia FEL é segmentada em três partes: FEL 1, FEL 2 e FEL 3. Cada parte elabora documentos e projetos de engenharia de maneira sequencial e coerente. Neste trabalho, o foco foi o desenvolvimento do FEL 1, também conhecido como Projeto Conceitual, essa fase envolveu buscar informações na literatura para obter um entendimento inicial do processo.

A Tabela de Processo, que trata de aspectos gerais do processo e serve como guia para as próximas partes, deve ser o primeiro documento de engenharia a ser elaborado. Nessa etapa, são exploradas as questões sobre as tecnologias e equacionamentos envolvidos. Em projetos contratados por terceiros, a Tabela de Processo é entregue como um Relatório Técnico de Processo, explicando detalhadamente as perguntas norteadoras.

O Diagrama de Blocos (*Block Process Diagram*), que é o desenho de engenharia do projeto presente no FEL 1, ilustra as correntes e as tecnologias envolvidas. Para facilitar a compreensão e leitura do diagrama, diferentes cores são usadas para distinguir os tipos de

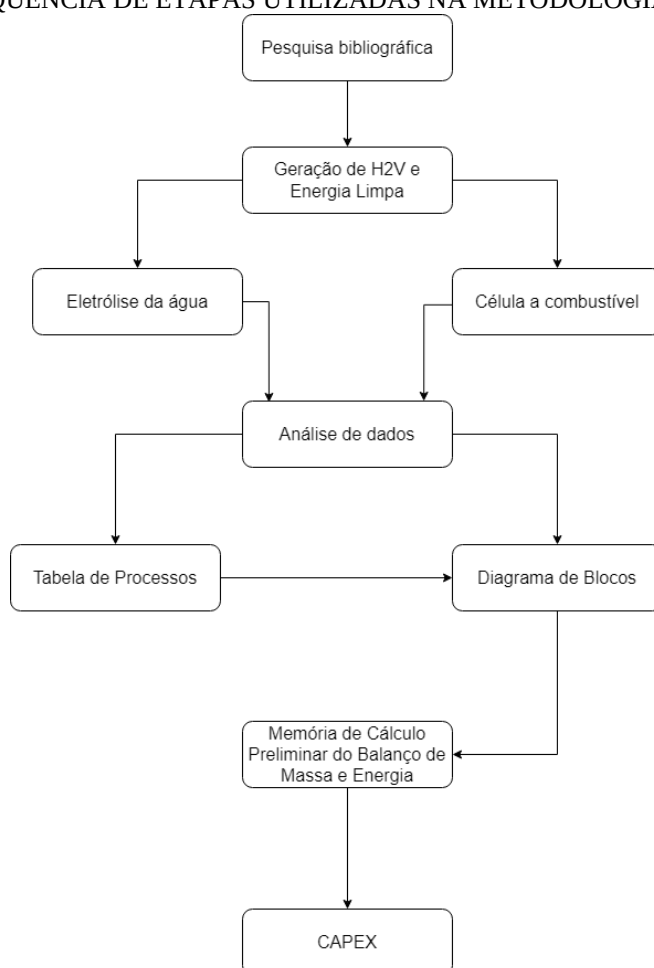
corrente, como a principal, secundária e drenagem. Todos os símbolos utilizados no diagrama são explicados na área de simbologia para facilitar o entendimento.

Por fim, no FEL 1, é criado a Memória de Cálculo Preliminar do Balanço de Massa e Energia, fornecendo informações iniciais sobre a capacidade da planta e a composição das principais correntes do processo. A Tabela de Processo e o Diagrama de Blocos são combinados para reunir todas as informações necessárias nos documentos dessa fase.

3.1. MAPA MENTAL

Durante a elaboração deste projeto, foi desenvolvido a sequência de etapa ilustrada na Figura 4, que serviu como uma ferramenta auxiliar, atuando para uma melhor organização e estruturação do trabalho.

FIGURA 4 – SEQUÊNCIA DE ETAPAS UTILIZADAS NA METODOLOGIA DO TRABALHO



Fonte: Elaboração própria (2024)

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. TABELA DE PROCESSOS

As Tabelas de Processos construídas para as etapas de eletrólise e de célula a combustível do tipo PEM são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente. São levantadas características importantes para as etapas do processo, como por exemplo: objetivo, princípio de funcionamento, força motriz, eficiência, recuperação, dentre outros.

4.2. DIAGRAMA DE BLOCOS

A partir das questões iniciais levantadas na Tabela de Processo, foi possível elaborar o Diagrama de Blocos do Processo, mostrado na Figura 7. Este desenho é dividido em várias áreas distintas:

Área de Grid: Parte que apresenta marcações horizontais e verticais nas bordas do desenho, auxiliando na localização.

Área Gráfica: Onde o processo é representado visualmente.

Área de Referências: Indica os nomes dos documentos utilizados como referência para a construção do Diagrama de Blocos.

Área de Simbologia: Parte onde é apresentada e descrita todas as simbologias usadas na área gráfica.

Área de Revisão: Registra todas as versões do desenho, incluindo datas e os profissionais que executaram, revisaram e aprovaram.

Área de Título: Contém informações sobre o projeto, como nome do desenho, nome do documento, empresa contratante, tamanho da folha para impressão, entre outras informações.

FIGURA 5 - TABELA DE PROCESSOS DA ELETRÓLISE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA

Perguntas Norteadoras		Operação Unitária
Nome da Operação Unitária		Eletrólise da água
Aplicada para?		É aplicada na dessociação da água em hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio produzido é enviado a uma célula a combustível para geração de energia limpa.
Operação unitária de separação ou reação?		É uma reação.
Princípio de Funcionamento?		A eletrólise da água é um processo que ocorre quando essa é exposta a uma corrente elétrica, que separa as suas moléculas em íons de hidrogênio e de oxigênio. Isso é feito colocando-se dois eletrodos na água, um ânodo e um cátodo, e aplicando corrente elétrica. O hidrogênio é encaminhado para cátodo e o oxigênio é enviado para o ânodo.
Força motriz?		A força motriz é a energia elétrica.
Remove ou degrada o que?		A água é convertida em hidrogênio e oxigênio.
Quais os solutos que deseja-se após a reação ou separação permaneça no fluido de saída da operação unitária?		Deseja-se obter o hidrogênio que será utilizado para alimentar da célula a combustível, visando gerar energia limpa.
Qual a eficiência típica da operação unitária? - eficiencia é em termos da alteração de concentração deseja		A sua eficiência pode variar entre 80 a 60%. No projeto foi utilizado uma eficiência de 70%.
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da operação unitária?		Área dos eletrodos. A energia aplicada é obtida por placas fotovoltaicas ou eólica, devendo também serem dimensionadas.
Quais as principais variáveis que devem ser monitoradas e controladas na operação unitária?		Corrente elétrica, vazão mássica e composição.
Quais são as malhas de controle principais da operação unitária?		Malha do controle de corrente elétrica e malha da vazão.
Apresentar os equacionamentos principais para dimensionamento da operação unitária.		Lei de Faraday e equação de Nernst.
Operação contínua ou em batelada? Manual ou automatizada?		A operação é contínua.
Para operação contínua, deve ser previsto mais de um trem operando? Quantos serão escolhidos? Com que capacidade?		Não há a necessidade da operação de mais de 1 trem.
Qual a operação principal da operação unitária em estudo?		A operação principal é a reação de dissociação da água em hidrogênio e oxigênio.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Água, NaCl e energia.
	Saídas	Hidrogênio, oxigênio, produtos de cloro, produtos de sódio, água residual.
Na operação unitária existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Não
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não
Quais os produtos químicos utilizados na operação principal?		NaCl
Quais as concentrações desses produtos químicos?		A concentração de NaCl deve seguir a seguinte proporção: $2 \text{ NaCl} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2 + \text{NaOH}$

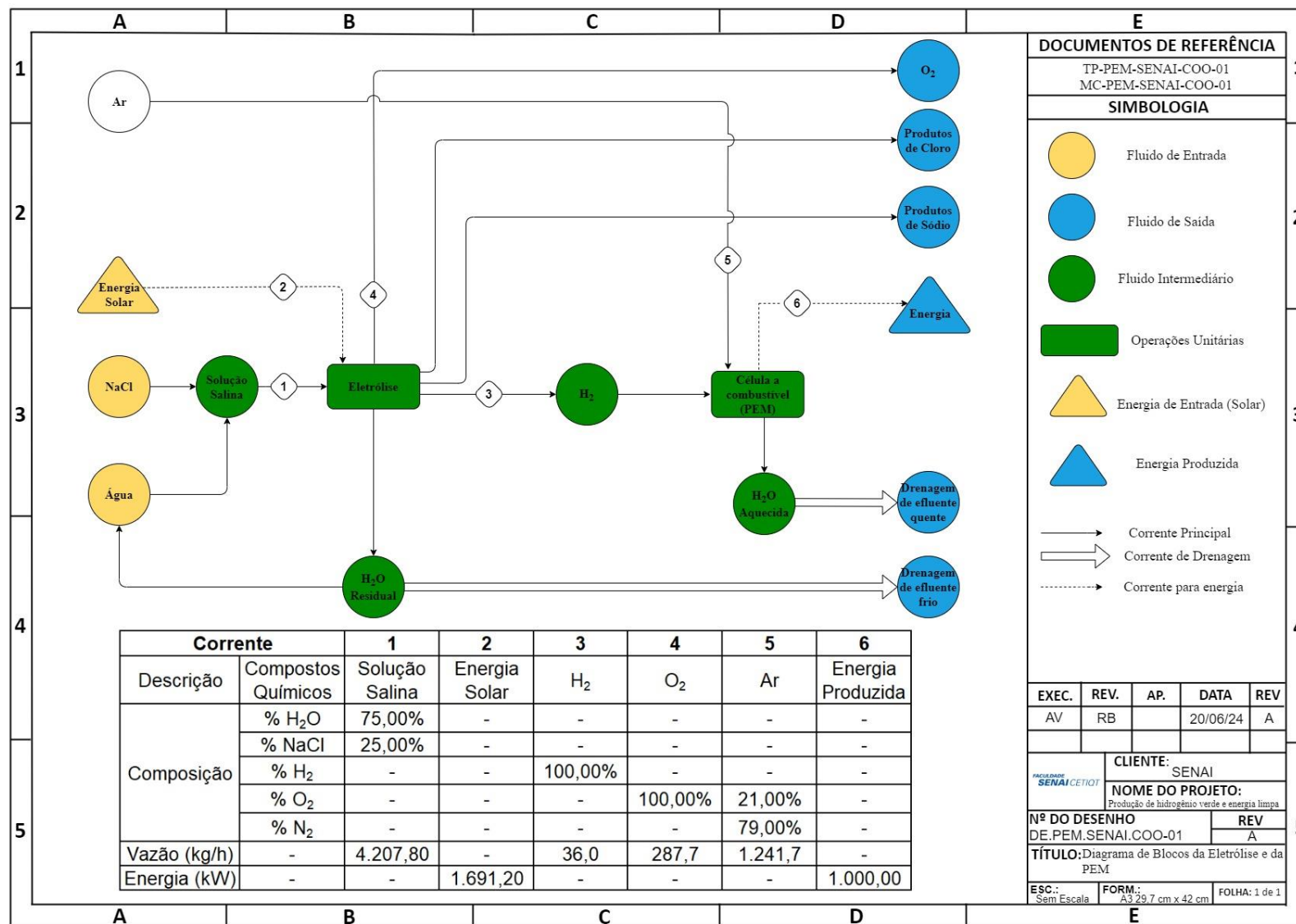
Fonte: Elaboração própria (2024)

FIGURA 6 - TABELA DE PROCESSOS DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Perguntas Norteadoras		Operação Unitária
Nome da Operação Unitária		Célula a Combustível (PEM).
Aplicada para?		Geração de energia elétrica a partir de hidrogênio e oxigênio.
Operação unitária de separação ou reação?		É uma reação.
Princípio de Funcionamento?		Hidrogênio, gerado na eletrólise da água, e oxigênio, presente no ar, reagem para formar água, liberando energia elétrica e calor, convertendo a energia química em energia elétrica por meio da reação eletroquímica.
Força motriz?		A força motriz da célula eletroquímica é representada pela diferença entre o potencial do eletrodo e o potencial de equilíbrio.
Remove ou degrada o que?		Produção de energia limpa através da reação entre hidrogênio e oxigênio, gerando água como sub-produto.
Quais os produtos que deseja-se após a reação ou separação permaneça no fluido de saída da operação unitária?		Deseja-se produzir energia com a maior eficiência possível.
Qual a eficiência típica da operação unitária? - eficiência é em termos da alteração de concentração deseja		A eficiência da PEM pode variar de 85 a 60%. No projeto considerou-se 70% de eficiência.
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da operação unitária?		Área de membranas da PEM.
Quais as principais variáveis que devem ser monitoradas e controladas na operação unitária?		Vazão, pressão e temperatura de hidrogênio e oxigênio. Potência da energia gerada.
Quais são as malhas de controle principais da operação unitária?		Malha de controle de vazão dos gases.
Apresentar os equacionamentos principais para dimensionamento da operação unitária.		Há a equação de eficiência para uma célula a combustível, que pode ser dada pela razão entre a potência elétrica gerada e a variação de energia livre de Gibbs da reação.
Operação contínua ou em batelada? Manual ou automatizada?		A operação é contínua.
Para operação contínua, deve ser previsto mais de um trem operando? Quantos serão escolhidos? Com que capacidade?		Não há a necessidade da operação de mais de 1 trem.
Qual a operação principal da operação unitária em estudo?		Produção contínua de eletricidade através da conversão de energia química do hidrogênio.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Hidrogênio e oxigênio (oriundo do ar atmosférico).
	Saídas	Energia limpa e água aquecida (encaminhada para drenagem de efluente quente).
Na operação unitária existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Não
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não
Quais os produtos químicos utilizados na operação principal?		Não tem.
Quais as concentrações desses produtos químicos?		-

Fonte: Elaboração própria (2024)

FIGURA 7 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO



Fonte: Elaboração própria (2024)

Os códigos empregados para nomear os documentos geralmente são listados na Lista de Documentos do Projeto de Engenharia. O grupo inicial, com duas letras, indica o tipo de documento: Tabela de Processo (TP), Memória de Cálculo (MC) e desenho para o Diagrama de Blocos (DE). O segundo grupo, SENAI, se refere à empresa do projeto. O terceiro grupo, *Proton Exchange Membrane* (PEM) e Eletrólise Alcalina (EA), refere-se ao processo em estudo. O quarto grupo indica a disciplina do documento. No FEL1, todos os documentos são de Coordenação (COO).

Na área gráfica do Diagrama de Blocos retratado na Figura 7, os fluidos e energia, que são representados respectivamente na forma circular e triangular, apresentam a coloração amarela e estão alinhados à esquerda, os de saída em azul e alinhados à direita, e os fluidos intermediários em verde, espalhados pela área gráfica. As correntes principais são mostradas por uma seta da cor preta, as correntes de drenagem são demonstradas por uma seta branca, enquanto a corrente de energia é representada por uma seta preta com tracejados. As tecnologias envolvidas são representadas por retângulos verdes.

As concentrações de H_2O e $NaCl$ alimentam o eletrolisador na proporção de 1:1, gerando uma solução salina, referenciada como a corrente 1.

A corrente 2 fornece energia elétrica, proveniente da energia solar, para alimentar o eletrolisador e dissociar a molécula de água, gerando hidrogênio como produto principal e oxigênio, que é representado pela corrente 4 como subproduto da reação e é liberado na atmosfera.

A corrente 3, que é o hidrogênio gerado através da eletrólise, é armazenado e reutilizado como reagente para alimentar a célula a combustível.

A corrente 6, que é a energia produzida pelo sistema, que é proveniente da reação do H_2 armazenado com o oxigênio do ar, representados respectivamente pelas correntes 3 e 5. Além de gerar água como subproduto, a reação gerada é do tipo exotérmica, sendo capaz de gerar energia.

Nesta fase não são representadas as correntes de drenagem e manobra de parada das etapas da planta projetada.

4.3. MEMÓRIA DE CÁLCULO PRELIMINAR DO BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

Para a determinação do Balanço de Massa e Energia, foram utilizados os dados referentes às massas molares dos componentes químicos, conforme encontrados na bibliografia.

4.3.1. Dados Encontrados na Bibliografia

FIGURA 8 - TABELA COM REFERENCIAL DO ΔG E ΔH DE FORMAÇÃO DA ÁGUA

Substância	ΔH_f° em 25°C (kJ/mol)	ΔG_f° em 25°C (kJ/mol)	S° em 25°C (J/(mol.K))	C_p em 25°C (J/(mol.K))
FeCO ₃ (s)	-740.6	-666.7	92.9	82.1
FeS ₂ (s)	-178.2	-166.9	52.9	62.2
FeCl ₂ (s)	-341.8	-302.3	118	75.7
FeCl ₃ (s)	-399.5	-334.0	142.3	96.7
FeBr ₂ (s)	-249.8	-238.1	140.6	
FeBr ₃ (s)	-268.2			
Fe ₃ C(s)	25.1	20.1	104.6	105.9
H(g)	218.0	203.3	114.7	20.8
H ⁺ (aq)	0	0	0	
H ₂ (g)	0	0	130.7	28.8
H ₂ O(g)	-241.8	-228.6	188.8	33.6
H ₂ O(l)	-285.8	-237.1	70.0	75.3

Fonte: Adaptado de The Engineering ToolBox (2017)

4.3.1.1. Dados Referentes a Eletrólise e Célula Combustível (PEM)

- Eficiência da PEM: 70%
- Eficiência da Eletrólise: 70%
- Fração de O₂ no ar: 21%
- Energia de combustão do H₂: 286 kJ/mol, equivalente a 0,079445 kWh

- A solubilidade do NaCl em água, a 25°C, corresponde a: 36g de NaCl a cada 100g de água.
- Energia necessária para eletrólise: 237 kJ/mol de H₂, equivalente a 0.065833 kWh

4.3.1.2. Dados Referentes as Massas Molares

- NaCl: 58,5 g/mol
- H₂O: 18 g/mol
- NaOH: 40,0 g/mol
- H₂: 2,0 g/mol
- Cl₂: 71,0 g/mol
- O₂: 32,0 g/mol
- Ar: 29,0 g/mol

4.3.2. Determinação da Energia de Entrada Necessária para a PEM

A energia desejada a ser produzida pela célula a combustível do tipo PEM é de 1 MW, equivalente a 1.000 kW, resultando em 1 MWh de energia. O valor foi escolhido em função das diretrizes em projetos de pesquisa & desenvolvimento no setor elétrico. Tal capacidade é apresentada como valor para validação da tecnologia.

Considerando a eficiência da célula a combustível em 70%, a capacidade efetiva da PEM para gerar 1 MW pode ser determinada da seguinte forma:

EQUAÇÃO 1 - ETAPAS PARA DETERMINAR A ENERGIA DE ENTRADA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

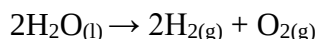
$$Capacidade\ Efetiva = \frac{Energia\ a\ ser\ produzida\ por\ hora}{Eficiência} \quad (1.1)$$

$$Capacidade\ Efetiva = \frac{1.000\ kWh}{0,7} \quad (1.2)$$

$$Capacidade\ Efetiva = 1.428,57\ kWh \quad (1.3)$$

4.3.3. Determinação da Vazão Mássica do H₂ que Entra na PEM

A fim de determinar as vazões mássicas necessárias de hidrogênio, oxigênio, água e ar, deve-se fazer o cálculo com base no número de mols da dissociação da molécula de água. Este procedimento de dissociação é descrito na Fórmula 1:



FÓRMULA 1 - DISSOCIAÇÃO DA MOLÉCULA DE ÁGUA

De acordo com a literatura, a energia de combustão do H₂ gerado, que segue a reação do processo de dissociação da Fórmula 1, é de 286 kJ/mol, que é aproximadamente 0,079445 kWh/mols. Portanto, para a determinação da vazão mássica do hidrogênio, deve-se primeiro descobrir a quantidade de mols necessários, para posteriormente encontrar a massa necessária. Para a determinação da vazão mássica, foi considerado que todas as massas encontradas passam pelas correntes a cada 1 hora.

EQUAÇÃO 2 - ETAPAS PARA DETERMINAR A VAZÃO MÁSSICA DE H₂ QUE ENTRA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

$$Mols\ de\ H_2\ Necessários = \frac{Capacidade\ Efetiva\ por\ hora}{Energia\ de\ Combustão\ do\ H_2} \quad (2.1)$$

$$Mols\ de\ H_2\ Necessários = \frac{1.428,57\ kWh}{0,079445\ kWh/mols} \quad (2.2)$$

$$\text{Mols de } H_2 \text{ Necessários} = 17.981,87 \text{ mols} \quad (2.3)$$

$$\text{Massa de } H_2 \text{ Necessários} = \text{Mols de } H_2 \text{ Necessários} * \text{Massa Molar do } H_2 \quad (2.4)$$

$$\text{Massa de } H_2 \text{ Necessários} = 17.981,87 \text{ mols} * 2 \text{ g/mol} \quad (2.5)$$

$$\text{Massa de } H_2 \text{ Necessários} = 35,96 \text{ kg} \cong 36 \text{ kg} \quad (2.6)$$

Portanto, o H_2 apresenta uma vazão mássica que alimenta a PEM de aproximadamente 36 kg/h.

4.3.4. Determinação da Vazão Mássica do Ar que Entra na PEM

Para determinar a vazão mássica do ar que alimenta a célula a combustível, é necessário inicialmente estabelecer a relação molar baseada na Fórmula 1, onde a proporção molar é de 1 mol de O_2 produzido para cada 2 mols de H_2 gerados durante a eletrólise. Portanto, o seguinte cálculo pode ser aplicado:

EQUAÇÃO 3 - ETAPAS PARA DETERMINAR A VAZÃO MÁSSICA DE AR QUE ENTRA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

$$\text{Mols de } O_2 \text{ Necessários} = \frac{\text{Mols de } H_2 \text{ Necessários} * N^{\circ} \text{ de mols de } O_2}{N^{\circ} \text{ de mols de } H_2} \quad (3.1)$$

$$\text{Mols de } O_2 \text{ Necessários} = \frac{17.981,87 \text{ mols de } H_2 * 1 \text{ mols de } O_2}{2 \text{ mols de } H_2} \quad (3.2)$$

$$\text{Mols de O}_2 \text{ Necessários} = 8.990,94 \text{ mols} \quad (3.3)$$

De acordo com *The Engineering ToolBox* (2004), os dados referentes a massa molar do ar e a fração de O₂ no ar, são, respectivamente, iguais a 29g/mol e 21%. Portanto, com base nisso, é feito uma razão entre o número de mols de O₂ necessários com a fração de O₂ no ar para determinar os mols de ar necessários e posteriormente realizar o cálculo para determinação da sua vazão mássica.

$$\text{Mols de Ar Necessários} = \frac{\text{Mols de O}_2 \text{ Necessários}}{\text{Fração de O}_2 \text{ no ar}} \quad (3.4)$$

$$\text{Mols de Ar Necessários} = 42.813,99 \text{ mols} \quad (3.5)$$

$$\text{Massa de Ar Necessários} = \frac{\text{Mols de Ar Necessários}}{\text{Massa Molar do Ar}} \quad (3.6)$$

$$\text{Massa de Ar Necessários} = 42.813,99 \text{ mols} * 29 \text{ g/mol} \quad (3.7)$$

$$\text{Massa de Ar Necessários} = 1.241.605,59 \text{ g} = 1.241,61 \text{ kg} \quad (3.8)$$

Portanto, a vazão mássica de ar necessária para alimentar a célula a combustível é de 1.241,61 kg/h.

4.3.5. Determinação da Vazão Mássica Necessária de H₂O que Alimenta a Eletrólise

No contexto relacionado a eletrólise da água, utiliza-se a Fórmula 1 para determinar o número de mols de cada componente, e são conduzidos os seguintes cálculos para determinar a vazão mássica de H₂O necessária para alimentar o processo de eletrólise:

EQUAÇÃO 4 - ETAPAS PARA DETERMINAR A VAZÃO MÁSSICA DE ÁGUA NECESSÁRIA PARA A ELETRÓLISE

$$\text{Mols de H}_2\text{O Necessários} = \frac{\text{Mols de H}_2 \text{ Necessários} * \text{N}^\circ \text{ de mols de H}_2\text{O}}{\text{N}^\circ \text{ de mols de H}_2} \quad (4.1)$$

$$\text{Mols de H}_2\text{O Necessários} = \frac{17.981,87 \text{ mols de H}_2 * 2 \text{ mols de H}_2\text{O}}{2 \text{ mols de H}_2} \quad (4.2)$$

$$\text{Mols de H}_2\text{O Necessários} = 17.981,87 \text{ mols} \quad (4.3)$$

$$\text{Massa de H}_2\text{O Necessários} = \text{Mols de H}_2\text{O Necessários} * \text{Massa Molar do H}_2\text{O} \quad (4.4)$$

$$\text{Massa de H}_2\text{O Necessários} = \text{Mols de H}_2\text{O Necessários} * \text{Massa Molar do H}_2\text{O} \quad (4.5)$$

$$\text{Massa de H}_2\text{O Necessários} = 323.673,73 \text{ g} = 323,7 \text{ kg} \quad (4.6)$$

Portanto, a vazão mássica de H₂O que entra na eletrólise apresenta 323,7 kg/h

4.3.6. Determinação da Vazão Mássica de O₂ que é Liberado pela Eletrólise

Para determinar a vazão mássica do O₂ que é gerado no processo da eletrólise, procede-se o seguinte cálculo:

EQUAÇÃO 5 - ETAPAS PARA DETERMINAR A VAZÃO MÁSSICA DE O₂ QUE É LIBERADO DA ELETRÓLISE

$$\text{Mols de O}_2 \text{ Liberados} = \frac{\text{Mols de H}_2\text{O Necessários} * \text{N}^\circ \text{ de mols de O}_2}{\text{N}^\circ \text{ de mols de H}_2\text{O}} \quad (5.1)$$

$$\text{Mols de O}_2 \text{ Liberados} = \frac{17.981,87 \text{ mols de H}_2\text{O} * 1 \text{ mol de O}_2}{2 \text{ mols de de H}_2\text{O}} \quad (5.2)$$

$$\text{Mols de O}_2 \text{ Liberados} = 8.990,94 \text{ mols} \quad (5.3)$$

$$\text{Massa do O}_2 \text{ Liberado} = \text{Mols de O}_2 \text{ Liberados} * \text{Massa Molar do O}_2 \quad (5.4)$$

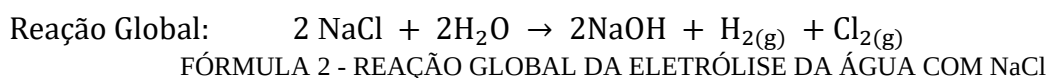
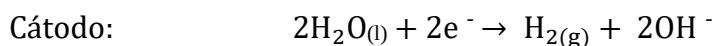
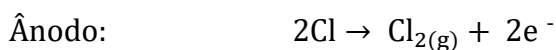
$$\text{Massa do O}_2 \text{ Liberado} = 8.990,94 \text{ mols} * 32 \text{ g/mol} \quad (5.5)$$

$$\text{Massa do O}_2 \text{ Liberado} = 287.709,99 \text{ g} = 287,7 \text{ kg} \quad (5.6)$$

Portanto, a vazão mássica do O₂ derivada do processo da eletrólise é de 287,7 kg/h.

4.3.7. Determinação da Vazão Mássica do NaCl

Para os cálculos que envolvem a quantidade de NaCl, utiliza-se a Fórmula 2 para analisar a reação de eletrólise da água com NaCl:



Para calcular a vazão mássica de NaCl como fluido de entrada no sistema, são realizados os seguintes cálculos:

EQUAÇÃO 6 - ETAPAS PARA DETERMINAR VAZÃO MÁSSICA DO NaCl COMO FLUIDO DE ENTRADA

$$\text{Mols de NaCl Necessários} = \frac{\text{Mols de H}_2\text{O Necessários} * \text{N}^\circ \text{ de mols de NaCl}}{\text{N}^\circ \text{ de mols de H}_2\text{O}} \quad (6.1)$$

$$\text{Mols de NaCl Necessários} = \frac{17.981,87 \text{ mols de H}_2\text{O} * 2 \text{ mols de NaCl}}{2 \text{ mols de H}_2\text{O}} \quad (6.2)$$

$$\text{Mols de NaCl Necessários} = 17.981,87 \text{ mols} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} &\text{Massa de NaCl Necessário} \\ &= \text{Mols de NaCl Necessário} * \text{Massa Molar de NaCl} \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\text{Massa de NaCl Necessário} = 17.981,87 \text{ mols} * 58,5 \text{ g/mol} \quad (6.5)$$

$$\text{Massa de NaCl Necessário} = 1.051.939,64 \text{ g} = 1051,9 \text{ kg} \quad (6.6)$$

Portanto, a vazão mássica de NaCl que se mistura com a água no início do processo é de 1051,9 kg/h.

4.3.8. Determinação da Composição da Solução Salina

Para determinar as composições mássicas foram feitos os seguintes cálculos:

EQUAÇÃO 7 - ETAPAS PARA DETERMINAR A COMPOSIÇÃO DA SOLUÇÃO SALINA E VAZÃO MÁSSICA DOS COMPONENTES QUE ENTRAM NA ELETRÓLISE

$$Vazão\ Mássica\ Total = Vazão\ Mássica\ de\ H_2O + Vazão\ Mássica\ de\ NaCl \quad (7.1)$$

$$Vazão\ Mássica\ Total = 323,7\ kg/h + 1051,9\ kg/h \quad (7.2)$$

$$Vazão\ Mássica\ Total = 1.375,61\ kg/h \quad (7.3)$$

$$Composição\ Mássica\ do\ H_2O = \frac{Vazão\ Mássica\ do\ H_2O}{Vazão\ Total} \quad (7.4)$$

$$Composição\ Mássica\ do\ H_2O = \frac{323,7\ kg/h}{1.375,61\ kg/h} \quad (7.5)$$

$$Composição\ Mássica\ do\ H_2O = 23,53\% \quad (7.6)$$

$$Composição\ Mássica\ do\ NaCl = \frac{Vazão\ Mássica\ do\ NaCl}{Vazão\ Total} \quad (7.7)$$

$$Composição\ Mássica\ do\ NaCl = \frac{1051,9\ kg/h}{1.375,61\ kg/h} \quad (7.8)$$

$$\text{Composição Mássica do NaCl} = 76,47\% \quad (7.9)$$

Segundo a *National Center for Biotechnology Information* (2024), a solubilidade do NaCl em água, a 25°C, corresponde a 36g de NaCl a cada 100g de água.

$$\text{Composição Mássica do NaCl} = \frac{\text{Vazão Mássica do NaCl}}{\text{Vazão Total}} \quad (7.10)$$

$$\text{Composição Mássica do NaCl} = \frac{36 \text{ kg/h}}{136 \text{ kg/h}} \quad (7.11)$$

$$\text{Composição Mássica do NaCl} = 26,47\% \quad (7.12)$$

$$\text{Composição Mássica do H}_2\text{O} = \frac{\text{Vazão Mássica do H}_2\text{O}}{\text{Vazão Total}} \quad (7.13)$$

$$\text{Composição Mássica do NaCl} = \frac{100 \text{ kg/h}}{136 \text{ kg/h}} \quad (7.14)$$

$$\text{Composição Mássica do H}_2\text{O} = 73,53\% \quad (7.15)$$

Portanto, constata-se que a solução salina obtida está supersaturada. Dessa forma, deve-se realizar o ajuste na sua vazão e composição, com base na vazão mássica do NaCl, para que se tenha uma solução homogênea.

$$Vazão\ Mássica\ de\ NaCl = 1051,9\ kg/h \quad (7.16)$$

$$Vazão\ Total = \frac{Vazão\ Mássica\ do\ NaCl}{Composição\ Mássica\ do\ NaCl} \quad (7.17)$$

$$Vazão\ Total = \frac{1051,9\ kg/h}{25\%} \quad (7.18)$$

$$Vazão\ Total = 4.207,8\ kg/h \quad (7.19)$$

Para a água, é feito o reajuste na sua vazão mássica de forma que apresente 75% de composição mássica.

$$Vazão\ Mássica\ de\ H_2O = Vazão\ Total - Vazão\ Mássica\ do\ NaCl \quad (7.20)$$

$$Vazão\ Mássica\ de\ H_2O = 4.207,8 - 1051,9\ kg/h \quad (7.21)$$

$$Vazão\ Mássica\ de\ H_2O = 3.155,9\ kg/h \quad (7.22)$$

4.3.9. Determinação da Energia Necessária para a Eletrólise

Segundo os princípios da termodinâmica, a eletrólise da água em condições padrão requer um mínimo teórico de 237 kJ de energia elétrica para dissociar cada mol de água, correspondente à energia livre Gibbs para a formação de água.

EQUAÇÃO 8 - ETAPAS PARA DETERMINAR A ENERGIA TOTAL NECESSÁRIA PARA QUE OCORRA O PROCESSO

$$\begin{aligned} \text{Energia Total Necessária} & \\ &= \text{Energia para Eletrólise} * \text{Mols de } H_2 \text{ Necessário} \end{aligned} \quad (8.1)$$

$$\text{Energia Total Necessária} = 237 \text{ kJ/mol} * 17.981,87 \text{ mols} \quad (8.2)$$

$$\text{Energia Total Necessária} = 4.261.704,17 \text{ kJ} \quad (8.3)$$

$$\text{Energia Efetiva Necessária} = \frac{\text{Energia Total Necessária}}{\text{Eficiência da Eletrólise}} \quad (8.4)$$

$$\text{Energia Efetiva Necessária} = \frac{4.261.704,17 \text{ kJ}}{70\%} \quad (8.5)$$

$$\text{Energia Efetiva Necessária} = 6.088.148,81 \text{ kJ} \quad (8.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Energia Efetiva Necessária} &= \text{Energia em kJ} * \\ &\text{fator de conversão para kWh} \end{aligned} \quad (8.7)$$

$$\text{Energia Efetiva Necessária} = 6.088.148,81 \text{ kJ} * 0.00027778 \text{ kWh/kJ} \quad (8.8)$$

$$\text{Energia Efetiva Necessária} = 1.691,17 \text{ kWh} \quad (8.9)$$

O cálculo de *déficit* de energia é importante para determinar a quantidade de energia extra necessária para o funcionamento do processo, seguindo os seguintes cálculos para sua determinação:

$$\text{Deficit de Energia} = \text{Energia a ser gerada} - \text{Energia Necessária} \quad (8.10)$$

$$\text{Deficit de Energia} = 1.000 \text{ kWh} - 1.691,17 \text{ kWh} \quad (8.11)$$

$$\text{Deficit de Energia} = -691,17 \text{ kWh} \quad (8.12)$$

4.3.10. Construção de uma Tabela de Balanço Preliminar de Massa e Energia

Com base nos cálculos obtidos através da memória de cálculo preliminar do balanço de massa e energia, foi possível desenvolver a Tabela 6, que contém especificações dos valores de composição, vazão mássica, e energia das correntes principais presentes no processo combinado de eletrólise da água e célula combustível PEM.

TABELA 6 - DADOS DAS CORRENTES DO PROJETO

Corrente		1	2	3	4	5	6
Descrição	Compostos	Solução Salina	Energia Solar	H ₂	O ₂	Ar	Energia Produzida
Composição	% H ₂ O	75,0%	-	-	-	-	-
	% NaCl	25,0%	-	-	-	-	-
	% H ₂	-	-	100,0%	-	-	-
	% O ₂	-	-	-	100,0%	21,0%	-
	% N ₂	-	-	-	-	79,0%	-
Vazão (kg/h)	-	4.207,8	-	36,0	287,7	1.241,7	-
Energia (kW)	-	-	1.691,2	-	-	-	1.000,0

Fonte: Elaboração própria (2024)

4.4. ESTIMATIVA PRELIMINAR DO INVESTIMENTO FIXO (CAPEX) NECESSÁRIO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA

De acordo com Lichner (2024), o custo médio gasto para eletrolisadores se apresenta na faixa média de € 1.400/kW. A conversão atual, do mês de junho de 2024, do euro para real é de 5,77. Dessa forma, seriam necessários o custo de R\$ 8.078/kW.

Segundo informações encontradas no site da Cemig (2020), o investimento médio necessário para adquirir uma unidade de geração de células a combustível do tipo PEM, com o propósito de servir como backup de energia, é aproximadamente € 5.000/kW, que é equivalente a cerca de R\$ 28.850/kW.

Portanto, para a construção do projeto elaborado neste trabalho, foram desenvolvidos os seguintes cálculos referentes aos custos do eletrolisador e da célula a combustível do projeto.

EQUAÇÃO 9 - ETAPAS PARA DETERMINAR O CAPEX PARA IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA

$$\text{Custo do Eletrolisador do Projeto} = 1.691,2 \text{ kW} * \text{R\$ } 8.078/\text{kW} \quad (9.1)$$

$$\text{Custo do Eletrolisador do Projeto} = \text{R\$ } 13.661.513,00 \quad (9.2)$$

$$\text{Custo da Célula a Combustível do Projeto} = 1.429 \text{ kW} * \text{R\$ } 28.850/\text{kW} \quad (9.3)$$

$$\text{Custo da Célula a Combustível do Projeto} = \text{R\$ } 41.226.650,00 \quad (9.4)$$

Assim, o valor total da estimativa preliminar de CAPEX para implementação do projeto em estudo seria igual a R\$ 54.888.163,00.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

Para o presente trabalho, foram elaborados objetivos específicos visando a compreensão e o desenvolvimento do projeto conceitual de uma planta de eletrólise e célula de combustível do tipo PEM para geração de H₂V e energia limpa.

Como um dos objetivos, foi desenvolvida uma Tabela de Processo, que apresenta as principais informações sobre o funcionamento das tecnologias de eletrólise e célula a combustível, como detalhes sobre o princípio de funcionamento, eficiência do processo e operação principal da operação unitária em estudo, proporcionando um entendimento detalhado do processo.

Também foi elaborado um Diagrama de Blocos, representando os fluidos de entrada, fluidos intermediários, e fluidos de saída, operações unitárias, energia de entrada e energia de saída, e as correntes principais, correntes de drenagem, e correntes para a energia. Dessa forma, torna-se possível uma visualização mais ampla do processo de produção de energia limpa relacionada ao projeto.

Foram realizados as Memórias de cálculo de Balanço Preliminar de Massa e Energia, possibilitando a determinação das vazões mássicas de entrada e saída do processo, bem como os dados referentes à energia necessária para a eletrólise e a célula a combustível. Além disso, como foi trabalhado uma eficiência de 70% para ambos os equipamentos, o *deficit* de energia se apresentou alto para a produção de 1.000 kWh. Dessa forma, se fosse trabalhado uma eficiência maior para os equipamentos, o *deficit* de energia seria menor, tornando o processo cada vez mais ideal.

Por fim, o valor do CAPEX para o eletrolisador e célula a combustível do projeto foram determinados com base na quantidade de energia requerida do projeto, sendo assim possível se obter uma análise de custos dos equipamentos principais do processo.

Em resumo, os objetivos do trabalho foram alcançados com sucesso, uma vez que os resultados obtidos forneceram os dados essenciais para a análise e desenvolvimento de um projeto de planta de eletrólise e célula a combustível para a produção de energia limpa.

5.1. SUGESTÕES FUTURAS

Para sugestões futuras, recomenda-se a otimização do processo para aumentar a eficiência das tecnologias de eletrólise e célula a combustível do tipo PEM. Além disso, sugere-se realizar uma análise econômica detalhada, a fim de avaliar a viabilidade financeira do projeto em diferentes escalas de produção. Essa análise possibilita compreender os custos associados a todas as etapas do processo, desde a construção e instalação da planta até sua operação e manutenção a longo prazo.

Outra possibilidade de trabalho futuro é fazer as fases de FEL-2 e FEL-3, chegando nas construções dos fluxogramas de processo (PFD), fluxogramas de engenharia de tubulação e instrumentação (P&ID) e maquete eletrônica 3D da planta completa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNEMANN, E. **DESENVOLVIMENTO DE COLETORES DE CORRENTE À BASE DE Ti/NbN PARA ELETRÓLISE PEM DA ÁGUA**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS, 2019.

CARMO, M. *et al.* A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, ed. 12, p. 4901-4934, 2013.

CEMIG, 2020. **VEJA COMO FUNCIONA E QUAIS APLICAÇÕES DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO**. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/usina-do-conhecimento/veja-como-funciona-e-quais-aplicacoes-da-celula-a-combustivel-de-hidrogenio/>>. Acesso em: 31 de maio de 2024.

FALCÃO, D; PINTO, A. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, 2020.

FERREIRA, A. S. **Utilização da metodologia FEL (front end loading) no gerenciamento de riscos dos aspectos de segurança de processo em projetos de uma empresa petroquímica na Bahia**. 2018. Disponível em: <https://www15.fgv.br/network/tcchandler.axd?TCCID=7881> Acesso em 12 de maio de 2024.

FUKUROZAKI, S. H. **Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa e energia solar fotovoltaica**. 2011. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 2011.

International Renewable Energy Agency. **Hydrogen**, 2022. Disponível em: <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>>. Acesso em: 25 de junho de 2024.

JOHANN, M. **Noções de Processos**, 2009. Disponível em: <<https://www.inf.ufrgs.br/~johann/sisop1/aula02.process.pdf>>. Acesso em: 25 de maio de 2024.

KUMAR, S; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, ed. 3, p. 442-454, 2019.

LICHNER, C. **Preços do eletrolisador – o que esperar**, 2024. Disponível em: <<https://www.pv-magazine-brasil.com/2024/03/21/precos-do-eletrolisador-o-que-esperar/>>. Acesso em: 31 de maio de 2024.

MASCARO, L; PEREIRA, E. **COMCIENCIA**, 2021. Desafios na Produção Sustentável de Hidrogênio. Disponível em: <<https://www.comciencia.br/desafios-na-producao-sustentavel-de-hidrogenio/>>. Acesso em: 21 de setembro de 2023.

MIRANDA, P. **O alvorecer da energia do hidrogênio**. Caderno Opinião. FGV Energia. 2017. Disponível em: < <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/1da76bbf-162a-4c60-b71b-38c5d1e2432d/content>>. Acesso em: 07 de junho de 2024.

MOORE, S. **AzoCleantech**, 2022. What is Green Hydrogen Used For? Disponível em: <<https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1614>>. Acesso em: 21 de setembro de 2023.

National Center for Biotechnology Information. **PubChem Compound Summary for CID 5234**, 2024. Disponível em: <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-Chloride#section=Solubility&fullscreen=true>>. Acesso em: 25 de maio de 2024.

OSMANSKI, S. **GreenMatters**, 2020. How Do Carbon Emissions Affect the Environment? Disponível em: <<https://www.greenmatters.com/p/how-do-carbon-emissions-affect-environment>>. Acesso em: 21 de setembro de 2023.

PEREDO, E. **Produção de hidrogênio por eletrólise da água e aproveitamento do oxigênio como subproduto**. Mestrado em Engenharia Química. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal, 2012.

SANGTAM, B; PARK, H.. Review on Bubble Dynamics in Proton Exchange Membrane Water Electrolysis: Towards Optimal Green Hydrogen Yield. **Micromachines**, 14(12), 2234, 2023.

SPANGLER, R. **KUSCHOLARWORKS**, 2005. Front End Loading (FEL) and Process Engineering Workflow. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1808/939>>. Acesso em: 5 de abril de 2024.

The Engineering ToolBox. **Air - Molecular Weight and Composition**, 2004. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/molecular-mass-air-d_679.html>. Acesso em: 27 de maio de 2024

The Engineering ToolBox. **Standard State and Enthalpy of Formation, Gibbs Free Energy of Formation, Entropy and Heat Capacity**, 2017. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/standard-state-enthalpy-formation-definition-value-Gibbs-free-energy-entropy-molar-heat-capacity-d_1978.html>. Acesso em: 27 de maio de 2024

VIDAS, L.; CASTRO, R. Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with Focus on Green-Electrolysis, **Appl. Sci.**, 11(23), 11363, 2021.