



Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG
Curso de Engenharia Mecânica

LORRANNY SOARES BATISTA

**ANÁLISE DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO DE MEMBRANA
POLIMÉRICA APLICÁVEIS EM SISTEMAS PROPULSORES DE AERONAVES**

Publicação Nº III

Goianésia - GO
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

BATISTA, LORRANNY SOARES.

Análise de Célula de Combustível a Hidrogênio de Membrana Polimérica Aplicáveis em Sistemas Propulsores de Aeronaves [Goiás] 2023 xi, 20P, 297 mm (ENM/FACEG, Bacharel, Engenharia Mecânica, 2023).

ARTIGO – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Mecânica.

1. Membrana polimérica
2. Hidrogênio.
3. Célula de combustível
- I. ENM/FACEG

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BATISTA, L. S. Análise de Célula de Combustível a Hidrogênio de Membrana Polimérica Aplicáveis em Sistemas Propulsores de Aeronaves, Publicação III de 2023/2 Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO. 2023.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR(A): Lorranny Soares Batista

TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Análise de Célula de Combustível a Hidrogênio de Membrana Polimérica Aplicáveis em Sistemas Propulsores de Aeronaves

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica ANO: 2023

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

DocuSigned by:

Lorranny Soares Batista

6C3F5937DEB3484...

Lorranny Soares Batista
Goianésia-GO - Brasil

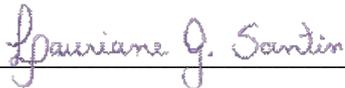
LORRANNY SOARES BATISTA

**ANÁLISE DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO DE MEMBRANA
POLIMÉRICA APLICÁVEIS EM SISTEMAS PROPULSORES DE AERONAVES**

Publicação N° III

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, EM FORMA DE ARTIGO,
SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACEG**

Aprovados por:



Lauriane Gomes Santin, Dra.

(ORIENTADOR)



Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes, Dra.

(EXAMINADOR INTERNO)



Ariane Martins Caponi Lima, Me.

(EXAMINADOR INTERNO)

ANÁLISE DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO DE MEMBRANA POLIMÉRICA APLICÁVEIS EM SISTEMAS PROPULSORES DE AERONAVES

Lorranny Soares Batista¹

Lauriane Gomes Santin²

RESUMO

As Células de Combustível de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC) têm se destacado como uma tecnologia promissora no cenário de energia limpa. A versatilidade das PEMFCs é evidente em sua aplicação em veículos elétricos, proporcionando uma alternativa eficiente e sustentável aos combustíveis convencionais. Para aprimorar o desempenho e a compreensão das PEMFCs, a análise numérica desempenha um papel vital. Nesse contexto, a metodologia envolve a modelagem matemática teórica da célula de combustível alimentada por hidrogênio. A densidade de corrente, temperatura, pressão e outros parâmetros são integrados ao modelo, e equações que descrevem os fenômenos físicos e químicos são traduzidas em expressões matemáticas. Essa verificação permite a resolução eficiente de equações diferenciais e otimização, proporcionando resultados para parâmetros cruciais, como eficiência, densidade de potência e distribuição de temperatura na célula. A capacidade de compreender e otimizar os parâmetros da PEMFC através de uma abordagem cienciométrica oferece oportunidades significativas para avanços tecnológicos, promovendo uma transição mais sustentável para fontes de energia mais limpas e eficientes.

Palavras-chave: Membrana Polimérica. Células de Combustível. Hidrogênio.

¹ Discente do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG). E-mail: annysbaptiste@outlook.com

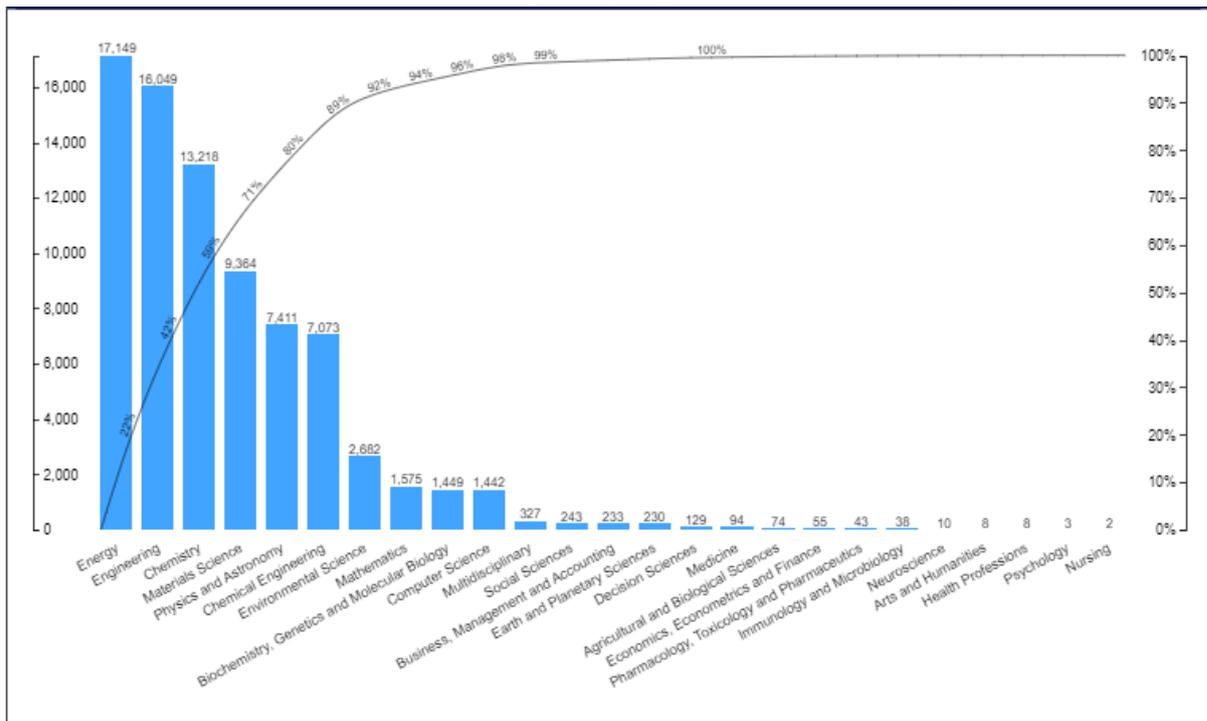
² Dra., professora do curso da Faculdade Evangélica de Goianésia. E-mail: lauriane.santin@docente.evangelicagoianesia.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), a indústria da aviação foi responsável por 2,4% das emissões globais de CO² em 2018, compreendendo uma taxa de 12% no setor de transporte. Considerando outros produtos, como óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado (PM) e vapor de água, acredita-se que o impacto total da aviação no meio ambiente seja significativamente maior. Embora isso possa parecer uma porcentagem relativamente baixa, o impacto das emissões de viagens aéreas no meio ambiente é considerável devido à alta altitude em que as aeronaves trafegam (YBANEZ et al, 2022).

Nos últimos 40 anos foram publicados 78.909 trabalhos e artigo sobre temas relacionados à bateria com membrana trocadora de prótons. Entretanto, apenas na última década o assunto ganhou relevância, considerando variáveis como a crise pandêmica de Covid-19 e o aumento infracionário do custo da querosene de aviação. Com o intuito de apresentar um alternativa mais viável no quesito ecológico e econômico, os setores de energia, engenharia e química, especialmente, têm investido amplamente em pesquisas para avaliar métodos de aplicação e uso do hidrogênio como fonte limpa e produtiva, como aponta o gráfico 1.

Gráfico 1: Número de publicações por área com o tema “*PEM fuel cell*”



Fonte: Autora, 2023.

O grande impacto das emissões das viagens aéreas no ambiente é motivo de preocupação, uma vez que contribuem para as alterações climáticas, que podem ter efeitos devastadores no planeta. Para resolver essa questão, muitas companhias aéreas estão tomando medidas paliativas para redução da sua pegada de carbono. Isso inclui investir em aeronaves mais eficientes em termos de combustível, desenvolvimento de combustíveis de aviação sustentáveis e implementar medidas operacionais para reduzir as emissões, como otimizar as rotas de voo e reduzir o peso nos aviões (KOZAKIEWICZ; GRZEGORCZYK, 2021).

Com esse intuito, há um esforço colaborativo de várias organizações, incluindo Airbus, Rolls-Royce e outras empresas ou instituições do ramo para implementar alternativas viáveis.

Buscando contribuir com a finalidade da SRIA - *Strategic Research and Innovation Agenda* (Agenda Estratégica de Pesquisa e Inovação), reduzindo até 2050 as emissões totais as emissões de gases poluentes, soluções como os projetos ZEROe e ASCEND estão em desdobramento pela empresa Airbus (AIRBUS, 2023).

Glenn Llewellyn, vice-presidente do projeto *Zero Emission Aircraft* (Aeronave emissão zero) da Airbus, afirmou que as células de combustível representam uma possível solução para atingir a ambição de emissão zero. Ele destacou o compromisso da empresa em desenvolver e testar essa tecnologia para avaliar sua viabilidade e considerar a possibilidade de introduzi-la em uma aeronave de emissão zero até 2035. Além disso, Llewellyn mencionou que o investimento contínuo nessa tecnologia proporcionará mais opções, informando as decisões sobre a arquitetura da futura aeronave ZEROe, cujo desenvolvimento está planejado para o período entre 2027 e 2028 (AIRBUS, 2022).

Nesse contexto, mediante a crescente necessidade de se buscar métodos alternativos em âmbito de sustentabilidade equiparado à eficiência energética conforme demanda no setor de aviação, pretende-se, neste trabalho, apresentar a efetividade do conjunto motriz ou propulsor elétrico (*powertrain*) como fonte de energia sustentável em comparação ao sistema tradicional de combustão interna (MOBILIS, 2018).

Essa avaliação é realizada por análise cienciométrica para estabelecer dados básicos comuns para testes matemáticos, considerando futuras propostas de interligação tanto em série quanto em paralelo de células de combustível a hidrogênio, como a tensão gerada, temperatura de operação e tempo de autonomia que emprega à máquina conforme requisitos solicitados pelo motor gerador, com validação matemática e integração sistemática pelo software *MatLab Simulink*[®] (MATHWORKS INC., 2023).

Dessa forma, são exploradas estratégias para validar a eficiência de uma célula de combustível. A pesquisa abrange desde a otimização dos parâmetros operacionais até o desenvolvimento de estratégias de controle avançadas, visando melhorar o desempenho sob diversas condições de operação além de comparação de custos.

Sob esse aspecto, o objetivo do projeto é demonstrar a tecnologia necessária para criar uma aeronave de emissão zero que possa voar comercialmente, usando células de combustível de hidrogênio como sua principal fonte de energia e uma alternativa viável e sustentável às aeronaves tradicionais movidas a combustíveis fósseis, por meio das seguintes ações:

- Realizar uma análise sistemática da literatura para responder quais os principais desafios encontrados pela indústria da aviação na implementação de células de hidrogênio para geração de energia limpa. Adicionalmente, pretende-se elencar as principais tecnologias já testadas nesse mercado;
- Avaliar quais os principais países que fazem pesquisas sobre baterias de hidrogênio, quais as principais agências financiadoras e quais os pesquisadores mais influentes nesse segmento;
- Analisar a disposição da célula de combustível, componentes e materiais do sistema de propulsão de modo a analisar e apresentar proposta de melhoria viável, para viabilizar um sistema de propulsão totalmente elétrico ou híbrido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um *powertrain*, ou conjunto motriz, elétrico para aeronaves é um sistema de propulsão que usa eletricidade como sua principal fonte de energia para gerar empuxo e impulsionar a

aeronave. Ao contrário dos motores de combustão tradicionais, os powertrains elétricos dependem de motores elétricos e baterias ou células de combustível para gerar energia e fornecer empuxo.

Em um trem de força elétrico, as baterias ou células de combustível fornecem a energia elétrica necessária para alimentar o motor elétrico, que por sua vez aciona as hélices ou turbinas para gerar empuxo. O motor elétrico pode ser um motor de ímã permanente, motor de indução ou um híbrido de ambos, e muitas vezes é menor e mais leve do que os motores de combustão tradicionais (MOBILIS, 2018). Como um dos principais componentes, é a principal fonte de propulsão e é responsável por converter energia elétrica em energia mecânica para mover o veículo. Esse, por sua vez, é normalmente alimentado por uma bateria, que armazena energia elétrica e a entrega ao motor quando necessário.

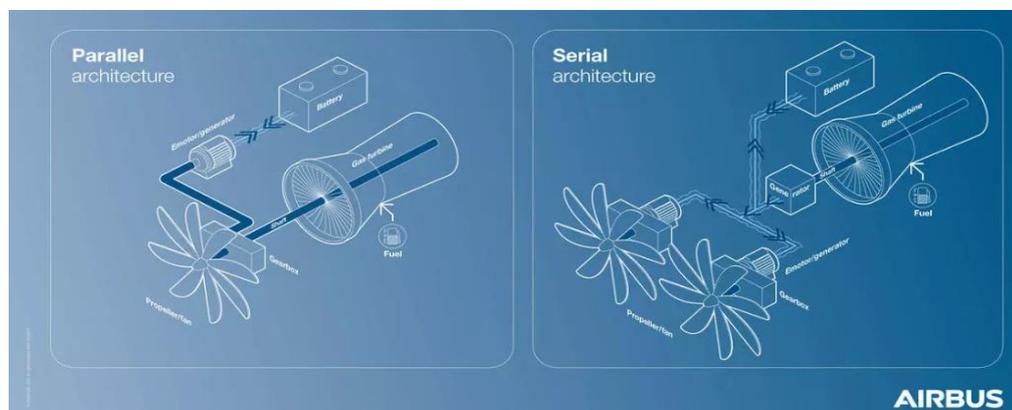
A unidade de controle de energia é responsável por gerenciar o fluxo de energia elétrica entre a bateria e o motor. Ele regula a tensão e a corrente para garantir que o motor receba a quantidade apropriada de energia em todos os momentos. Isso é importante para alcançar a máxima eficiência e prolongar a vida útil da bateria.

Os grupos motopropulsores elétricos são conhecidos pela sua eficiência e respeito pelo ambiente, uma vez que não produzem emissões pelo tubo de escape e têm o potencial de serem alimentados por fontes de energia renováveis, como a energia eólica ou solar. Eles também têm o potencial de proporcionar uma experiência de condução suave, com torque instantâneo e aceleração responsiva (MOBILIS, 2018).

Em um arranjo em série, uma única fonte de energia mecânica impulsiona a hélice ou ventilador, e há opções além das baterias, como as células de combustível de hidrogênio. Independentemente da fonte de energia, a hélice é sempre movida por um motor elétrico, permitindo uma propulsão distribuída. Quanto à hibridização, que é a combinação de diferentes fontes de energia, esta é a maior vantagem da arquitetura em série, embora implique na adição de peso na forma de um gerador para converter a energia mecânica em energia elétrica (MOBILIS, 2018).

Por outro lado, em uma arquitetura em paralelo, a eficiência da turbina a gás às vezes fica abaixo do pico. No entanto, um motor elétrico menor e mais leve é suficiente para atender aos requisitos. Assim, a arquitetura em paralelo é mais adequada para aplicações híbridas, como mostra a figura abaixo.

Figura 1 – Arquitetura de solução híbrida.



Fonte: Airbus SAS (2022)

Uma das principais vantagens dos powertrains elétricos é a sua eficiência, que pode ser até três vezes maior do que os motores de combustão tradicionais devido a sua menor dimensão e maior potência em comparação. Os powertrains elétricos também têm requisitos de

manutenção mais baixos, produzem menos emissões e são muito mais silenciosos do que os motores tradicionais.

Entretanto, os powertrains elétricos para aeronaves ainda estão em seus estágios iniciais de desenvolvimento e enfrentam vários desafios, incluindo o alcance limitado e a resistência de baterias ou células de combustível, o que limita seu uso a aeronaves menores e voos de curta distância. Além disso, os powertrains elétricos exigem sistemas avançados de gerenciamento de energia para otimizar o desempenho, o que pode ser complexo e caro de desenvolver.

2.2 CRIOGENIA E SUPERCONDUTIVIDADE

Criogenia é o estudo de materiais e seu comportamento a temperaturas muito baixas, tipicamente abaixo de -150°C (-238°F). As tecnologias criogênicas são essenciais para armazenar e manusear hidrogênio líquido, que é um combustível altamente eficiente para foguetes e aeronaves (AIRBUS, 2022). O hidrogênio líquido tem uma alta densidade de energia, o que significa que pode fornecer mais energia por unidade de peso do que outros combustíveis. Para isso, deve ser armazenado a temperaturas muito baixas, o que requer sistemas de isolamento criogênicos, usados para evitar a transferência de calor entre o hidrogênio líquido e o meio ambiente, permitindo que ele seja armazenado por longos períodos.

Além do hidrogênio líquido, os sistemas criogênicos também podem ser usados para resfriar materiais supercondutores. Os materiais supercondutores têm a propriedade única de resistência zero quando são resfriados a temperaturas muito baixas, necessárias para sua operação. Em complemento à essa funcionalidade, os sistemas criogênicos podem ser aplicados para armazenar combustível de hidrogênio líquido, que pode ser usado para alimentar células de combustível (KOZAKIEWICZ; GRZEGORCZYK, 2021).

Uma aplicação potencial de tecnologias criogênicas e supercondutoras em aeronaves é no desenvolvimento de sistemas de propulsão elétrica. A propulsão elétrica criogênica é um tipo de sistema utilizado em espaçonaves que envolve o uso de propulsores extremamente frios, tipicamente hidrogênio líquido ou metano líquido, para gerar empuxo (DIAS *et al*, 2022).

Nesse sistema, o propelente é primeiro armazenado em um tanque e, em seguida, alimentado em um motor de propulsão elétrica. O motor usa um campo elétrico para acelerar íons ou outras partículas carregadas a altas velocidades, que então geram empuxo ao serem expelidas para fora do motor em altas velocidades. No entanto, eles também exigem sistemas de resfriamento complexos e isolamento sofisticado para manter as temperaturas extremamente baixas necessárias para o propulsor, o que pode adicionar peso e complexidade à espaçonave (DIAS *et al*, 2022).

As temperaturas extremamente baixas desses propulsores podem aumentar a eficiência do sistema de propulsão elétrica, reduzindo a energia necessária para ionizar o propelente e permitindo velocidades de escape mais altas, o que resulta em maior empuxo.

A supercondutividade, por sua vez, é a propriedade de certos materiais que lhes permite conduzir eletricidade com resistência zero quando são resfriados a temperaturas muito baixas. Os supercondutores também podem criar campos magnéticos fortes, que podem ser usados em várias aplicações, incluindo trens de levitação magnética e motores de alta velocidade (OSTERMANN, 2005).

Quando se trata de aeronaves, a criogenia e a supercondutividade são frequentemente usadas juntas, e têm muitas aplicações potenciais no setor aeroespacial, desde o armazenamento

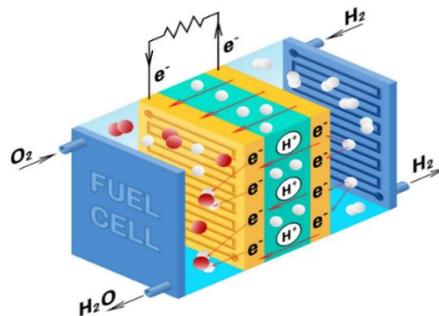
e manuseio de combustível até sistemas de propulsão e energia. À medida que a pesquisa nessas áreas continua, podemos ver tecnologias aeroespaciais mais avançadas e eficientes emergirem.

2.3 CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO

As células de combustível de hidrogênio são dispositivos que convertem a energia química armazenada no hidrogênio em energia elétrica através de uma reação química. Eles são um tipo de célula eletroquímica que usa gás hidrogênio e oxigênio do ar para produzir eletricidade, calor e vapor de água como subprodutos (US PATENT, 1993).

A estrutura básica de uma célula de combustível de hidrogênio consiste em dois eletrodos (um cátodo e um ânodo) separados por um eletrólito. O ânodo é onde o gás hidrogênio é introduzido, ocorrendo oxidação do combustível, e dividido em prótons e elétrons através de um processo chamado eletrólise. Os prótons passam através de uma membrana que separa o ânodo e o cátodo, enquanto os elétrons fluem através de um circuito externo para criar uma corrente elétrica. No cátodo ocorre a redução do oxigênio, onde os prótons e elétrons se recombinam com o oxigênio do ar para formar vapor de água, que é o único subproduto da reação, conforme demonstrado esquematicamente na FIGURA 2 (HAILE, 2003).

Figura 2 – Célula de combustível a hidrogênio.



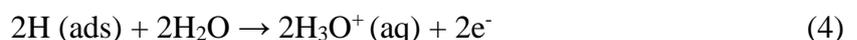
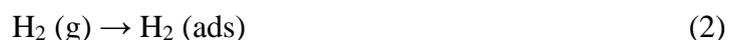
Fonte: Airbus SAS (2022)

Se o eletrólito conduz íons óxidos, o oxigênio será eletro-reduzido no cátodo para produzir íons e consumir elétrons, enquanto os íons óxido, após migrarem através do eletrólito, reagirão no cátodo com hidrogênio e liberarão elétrons (LARMINE, 2000).

A reação de oxidação-redução dos gases é catalisada e apresentada na reação global:



No ânodo ocorrem as reações:



O fluxo de carga iônica através do eletrólito deve ser equilibrado pelo fluxo de carga eletrônica através de um circuito externo, e é esse equilíbrio que produz energia elétrica. Eletrólitos nos quais prótons, íons hidrônio, íons hidróxido, íons óxido e íons carbonato são todos conhecidos e são a base para as muitas categorias de células a combustível em desenvolvimento atualmente (HAILE, 2003). Como a condução de íons é um processo ativado termicamente e sua magnitude varia drasticamente de um material para outro, o tipo de eletrólito, que pode ser líquido ou sólido, determina a temperatura na qual a célula a combustível é operada.

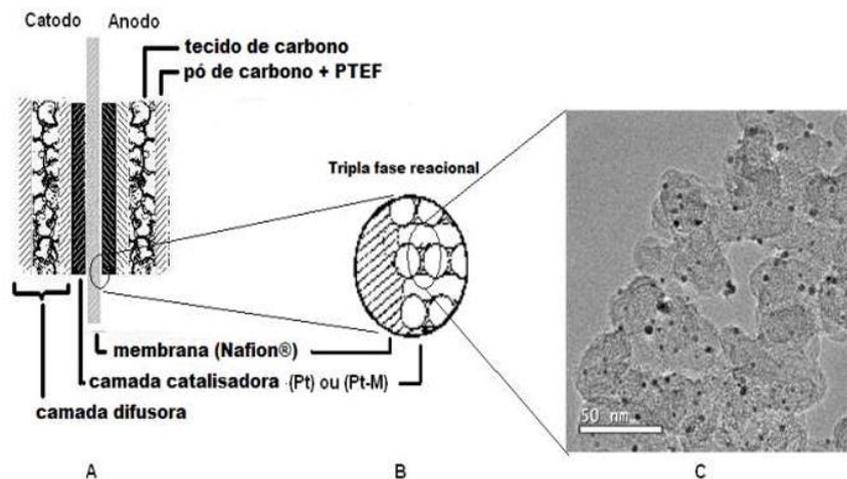
2.3.1 Catalisador da PEMFC

Até o momento, a célula que tem apresentado resultado em testes mais promissor é a *Proton Exchange Membrane* (PEM). A sua temperatura de operação é restringida mediante necessidade de hidratação. Dessa forma, apenas a platina é utilizada com a função de catalisador nos eletrodos. De modo geral, apresenta densidade de potência variando de 300 a 1000 mW/cm² e opera entre a faixa de 0,001 a 1000 kW. A desvantagem quanto à sua aplicação é que essa célula requer a utilização de hidrogênio com pureza elevada (<10 ppm de CO) (HAILE, 2003).

Os catalisadores são substâncias que aceleram as reações químicas, sem sofrerem modificações na reação global. A sua função é diminuir a energia de ativação da reação, oferecendo uma via reacional alternativa que evita a etapa lenta, determinante da velocidade da reação sem catalisador. O catalisador utilizado com maior eficiência na PEMFC é a platina (Pt), a qual faz parte dos chamados metais nobres (SALGADO; GONZALES, 2003).

Baseado em suas propriedades físicas e químicas, para catalisador, é usada a platina. A Pt é um metal de extrema importância para os processos de oxirredução nas PEMFCs. A Pt utilizada como catalisador nas PEMFCs, encontra-se na forma de nanopartículas, a fim de aumentar a área superficial do catalisador e assim reduzir a quantidade de metal utilizado. Essas nanopartículas de Pt podem ser produzidas a partir da redução química de íons de Pt⁺⁴ em solução. A FIGURA 3 mostra um esquema da estrutura do eletrodo de uma PEMFC e o detalhe mostra a localização das nanopartículas de platina (SALGADO; GONZALES, 2003).

Figura 3 – (A) Estrutura da célula a combustível (B) Contato entre o eletrodo e o eletrólito (tripla fase reacional) e (C) distribuição de nanopartículas de platina no eletrodo (esferas escuras, ancoradas no suporte de carbono).



Fonte: COLMATI (2007)

A baixa temperatura de operação das células a combustível do tipo PEMFC é uma característica fundamental, atribuída à presença da membrana polimérica. Em condições de temperatura elevada, aproximando-se de 140 °C, a membrana tende a secar, transformando-se em uma barreira para a passagem de íons. Em outras palavras, para garantir o fluxo de prótons, é imperativo que a membrana permaneça constantemente umedecida.

Apesar de todas as vantagens, um fator ainda a ser considerado são os rastros, ou "trilhas de condensação" liberados após processamento. Altas altitudes e ambientes frios oferecem condições meteorológicas ideais para a formação natural de rastros devido às temperaturas estáticas e umidade relativa em altitude. Embora a combustão de hidrogênio possa produzir rastros dependendo das condições atmosféricas do ambiente, eles diferem significativamente daqueles produzidos por motores de combustão convencionais. E como a combustão de hidrogênio emite cerca de 2,6 vezes mais água em comparação com o padrão JetA/A1, é necessária uma análise aprofundada para entender seu impacto total nos rastros (AIRBUS, 2022).

Para avaliação prévia, por intermédio do estudo cientométrico, foi realizada uma busca na base de dados Scopus pelo termo "*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*" com o intuito de avaliar os parâmetros de qualidade e quantidade de publicações a respeito do tema tratado.

As células de combustível de hidrogênio podem ser usadas para alimentar uma ampla gama de aplicações, incluindo carros, ônibus, caminhões ou mesmo edifícios. Eles oferecem várias vantagens sobre os combustíveis fósseis tradicionais, incluindo maior eficiência, menores emissões e uma fonte de energia confiável e consistente. No entanto, o alto custo de produção e armazenamento de gás hidrogênio continua sendo um grande desafio para a adoção generalizada de células de combustível.

3 METODOLOGIA

A indústria da aviação tem se empenhado em reduzir seu impacto ambiental e avançar em direção a um futuro mais sustentável. O desenvolvimento de uma série de aeronaves comerciais de emissão zero que seriam alimentadas por hidrogênio é uma das principais estratégias para o alcance dessas metas que cumpram as obrigações ecológicas e resultados de um desenvolvimento sustentável.

Os principais fatores em questão de beneficiamento considerados são:

- Os motores elétricos usam um campo magnético para converter energia elétrica em energia mecânica para alimentar as rodas do veículo. Eles são altamente eficientes, muitas vezes convertendo mais de 90% da energia que consomem em energia mecânica (MOBILIS, 2018).
- Frenagem regenerativa: Os powertrains elétricos podem usar a frenagem regenerativa para capturar energia durante a desaceleração e usá-la para recarregar a bateria. Isso ajuda a ampliar o alcance do veículo e melhorar a eficiência geral (MOBILIS, 2018).
- Alcance e carregamento: Os veículos elétricos normalmente têm um alcance limitado em comparação com os veículos tradicionais movidos a gasolina, mas isso está melhorando com os avanços na tecnologia de baterias.
- Benefícios ambientais: As motorizações elétricas não produzem emissões pelo tubo de escape, o que pode ajudar a reduzir a poluição atmosférica e as emissões de gases com efeito de estufa. Eles também têm o potencial de serem alimentados por fontes de energia renováveis, como energia solar ou eólica, reduzindo ainda mais seu impacto ambiental.

• Experiência de condução: As motorizações elétricas podem proporcionar uma experiência de condução suave e silenciosa, com binário instantâneo e aceleração responsiva. Eles também exigem menos manutenção do que os veículos tradicionais movidos a gasolina, pois têm menos partes móveis e não exigem trocas de óleo (MOBILIS, 2018).

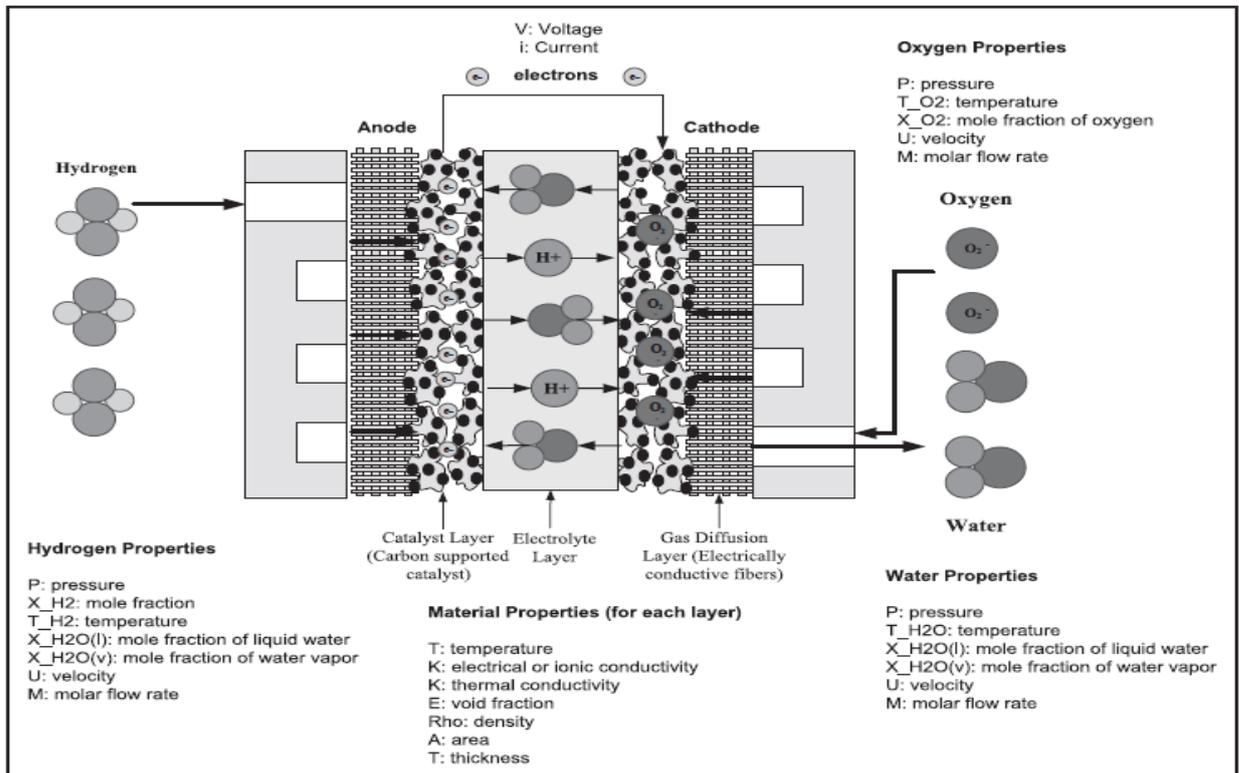
Considera-se reaplicar os benefícios com a mesma eficácia em aeronaves, mantendo o desempenho e garantindo segurança para os usuários. Como trata-se de um tema com pesquisas ainda recentes para aplicação em larga escala, a relevância desse contexto se torna evidente, unindo a possibilidade de diferentes integrações de um sistema limpo e ampla eficácia para diferentes setores e aplicações.

Apesar dos desafios, as células de combustível de hidrogênio estão sendo exploradas como uma fonte potencial de energia limpa para transporte, geração de energia e outras aplicações.

Este estudo envolve a verificação de equações que representam os fenômenos físicos e químicos que ocorrem dentro de uma célula de combustível a hidrogênio. Isso inclui equações que descrevem a cinética da reação eletroquímica, a transferência de massa de hidrogênio e oxigênio, além das características termodinâmicas do sistema. A integração de parâmetros fundamentais, como a taxa de reação, a condutividade iônica e os coeficientes de transferência de massa, são essenciais para a precisão dos resultados da célula.

Para assegurar a confiabilidade do modelo, são comparados os resultados da simulação numérica com dados experimentais disponíveis na literatura. Os parâmetros necessários para solução matemática, conforme figura 4 definida por Colleen Spiegel, foram ajustados para otimizar a concordância com os resultados experimentais, validando assim a representação computacional da célula de combustível (SPIEGEL, 2011).

Figura 4 – Parâmetros necessários na resolução por modelo matemático.



Fonte: SPIEGEL (2011)

Para isso, foram realizadas diversas etapas, incluindo a seleção dos componentes necessários para a montagem do sistema, o projeto e construção do circuito elétrico, a preparação da solução eletrolítica e a realização dos testes de desempenho. As premissas utilizadas para a modelagem de células de combustível são, como alinhado por Spiegel (2011):

- Entalpia e entropia da água;
- Calor específico;
- Variação de energia livre de uma reação química;
- Uma queda de potencial ôhmica negligenciável nos componentes;
- O transporte de massa e por equações de conservação médias por volume.

Com esses dados, é possível avaliar questões como: tempo de usabilidade, potência e consumo conforme necessidade do motor supercondutor sendo fonte de energia direta do sistema de uma aeronave comercial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Explorando a sensibilidade do modelo, foi possível identificar os parâmetros críticos que mais impactam o desempenho da célula. Essa análise é crucial para compreender como pequenas variações em determinados parâmetros podem influenciar significativamente a eficiência e a estabilidade do sistema.

A modelagem e teste de uma célula a combustível com membrana trocadora de prótons (PEMFC, do inglês Proton Exchange Membrane Fuel Cell) requer uma compreensão aprofundada de diversos parâmetros termodinâmicos e elétricos. Esses parâmetros são essenciais para prever o desempenho e otimizar a eficiência da célula a combustível. Abaixo estão alguns dos parâmetros críticos necessários para modelar e testar uma PEMFC:

- Entalpia:

A entalpia é a quantidade total de energia em um sistema, incluindo a energia térmica e a energia liberada ou absorvida durante uma reação química. Para uma PEMFC, compreender a entalpia é crucial para avaliar a quantidade de calor envolvida nas reações e nos processos termoquímicos que ocorrem na célula (HEINZEL).

Inicialmente, a água está com uma pressão de 1 psi e uma temperatura de 100 °C. Em seguida, é realizado o cálculo da entalpia quando a água é aquecida a 80 °C com uma energia interna específica de 400 kJ/kg. Este código primeiro calcula a entalpia para o estado 1 usando as condições fornecidas e, em seguida, calcula a entalpia para o estado 2 quando a água é aquecida a 80 °C com a energia interna específica especificada. Os resultados são exibidos em J/kg (HEINZEL).

- Calor específico:

Os calores específicos referem-se à quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em uma unidade de temperatura. Conhecer os calores específicos dos diferentes componentes da célula a combustível, como o eletrólito e os gases de entrada (hidrogênio e oxigênio), é essencial para modelar as mudanças de temperatura durante o funcionamento da PEMFC (DIAS, *et al*).

Este código calcula a entalpia do hidrogênio e do oxigênio em diferentes temperaturas e, em seguida, plota os resultados. Foi observado que as capacidades caloríficas específicas para H₂ e O₂ são aproximadas usando funções lineares de temperatura.

- Perda de tensão ôhmica:

Para estimar a perda de sobretensão ohmica através da membrana, é necessário considerar a resistência iônica (R_{ionic}) com base nas propriedades e condições da membrana fornecidas. A fórmula para a perda de sobretensão ohmica pode ser expressa como:

$$\eta_{ohmic} = I \cdot R_{ionic} \quad (5)$$

onde:

I é a densidade de corrente (0,8 A/cm²),

$R_{iônico}$ é a resistência iônica da membrana.

A resistência iônica é determinada usando o perfil de espessura da membrana e conteúdo de água de acordo com a equação fornecida $l(z) = 5 + 2 \exp(100z)$ (YOU; LIU, 2006). O cálculo envolve a integração do inverso da condutividade da membrana através de sua espessura:

$$R_{iônico} = \int_0^d \frac{1}{\sigma(z)} dz \quad (6)$$

onde:

- $\sigma(z)$ é a condutividade da membrana na posição,

- d é a espessura total da membrana.

Essa integral representa a contribuição da resistência iônica ao longo da espessura da membrana, considerando a variação da condutividade (YOU; LIU, 2006).

- Taxa de fluxo de água injetada:

Para calcular a taxa de fluxo de água injetada em uma célula de combustível PEM de hidrogênio-ar, precisamos considerar o equilíbrio de água dentro da célula de combustível. A equação de balanço de água é dada por:

$$Q_{in} + W_{in} = W_{out} + Q_{out} \quad (7)$$

onde:

Q_{in} é energia da água no ar de entrada,

W_{in} o trabalho da água injetada no sistema,

Q_{out} é energia de água no ar de saída,

W_{out} é o trabalho produzido na célula de combustível.

A equação de balanço de água pode ser rearranjada para resolver W_{in} :

$$W_{in} = - Q_{in} + W_{out} + Q_{out} \quad (8)$$

Dado que o ar está 100% saturado na saída, Q_{out} é igual ao valor de saturação na temperatura e pressão de saída (YOU, LIU).

- Voltagem reversível:

A voltagem reversível é a voltagem teoricamente possível para uma célula a combustível em condições ideais, enquanto a voltagem líquida é a voltagem real considerando perdas e ineficiências. Modelar e testar uma PEMFC envolve entender essas voltagens para avaliar o desempenho real em comparação com o potencial teórico (HIRSCHENHOFER, *et al*).

- Eficiência teórica da célula a combustível:

A eficiência teórica representa a eficiência máxima teoricamente alcançável de uma célula a combustível. Leva em consideração fatores como a voltagem reversível e as temperaturas envolvidas. Compreender e modelar essa eficiência é crucial para avaliar quão eficiente a célula a combustível pode ser em converter energia química em eletricidade (DYER, 2002).

A eficiência teórica de uma célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC) pode ser calculada usando a Equação de Nernst, que relaciona o potencial da célula com os potenciais padrão de eletrodo, a temperatura e as atividades dos reagentes. A eficiência teórica é dada pela razão entre o potencial elétrico disponível e o potencial termodinâmico (DYER, 2002).

A eficiência de conversão eletroquímica é um dos aspectos fundamentais para avaliar a performance das PEMFC. É importante levar em consideração as características cinéticas das reações eletroquímicas envolvidas na produção de eletricidade a partir do hidrogênio, considerando diferentes temperaturas e pressões.

A densidade de potência é outro fator primordial para a aplicação em aeronaves, onde o espaço e o peso são limitados. A capacidade das PEMFC de fornecer uma alta densidade de potência, essencial para o desempenho eficaz do sistema propulsor, varia conforme condições externas do ambiente e demanda operacional. Além disso, a relação potência-peso avaliada para determinar a viabilidade prática dessas células em aplicações aeroespaciais é um ponto variável conforme carga e tempo de voo.

Ao integrar e analisar esses parâmetros, possibilita-se desenvolver modelos mais precisos para prever e otimizar o desempenho de uma PEMFC.

Para garantir a reprodutibilidade da pesquisa, o código-fonte MATLAB está documentado no apêndice, incluindo detalhes sobre a implementação do modelo, permitindo a validação independente para possíveis aplicações futuras com simulações integradas aos componentes físicos do conjunto propulsor.

Ao seguir essa metodologia abrangente, é concebível não apenas obter uma compreensão ainda mais aprofundada do comportamento das células de combustível a

hidrogênio, mas também contribuir significativamente para o avanço contínuo da pesquisa nesse campo crucial para a sustentabilidade e a inovação tecnológica.

5 CONCLUSÕES

Os testes realizados abrangem aspectos cruciais para o desempenho e eficiência de células a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC). A consideração de parâmetros como entalpia, capacidades térmicas, entropia, potencial de célula reversível, e eficiência teórica é essencial para entender e otimizar o funcionamento da PEMFC. Uma análise crítica é realizada, destacando tendências e insights importantes derivados das simulações.

A análise da perda de tensão, por exemplo, destaca a importância de dimensionar adequadamente os componentes da célula para minimizar as perdas durante a operação, e essencial para prever o desempenho sob diferentes condições e identificar áreas de melhoria.

A relação entre os parâmetros da célula de combustível e a eficiência do sistema é central nesse contexto. Parâmetros como eficiência da célula, temperatura de operação, pressão do hidrogênio e taxa de fluxo desempenham papéis de importância significativa. A eficiência da célula, que representa a capacidade de converter o hidrogênio em eletricidade de forma limpa e eficaz, é diretamente proporcional à eficiência global do sistema de propulsão. Ajustar esses parâmetros de maneira otimizada é essencial para maximizar o desempenho e, conseqüentemente, minimizar a dependência do querosene de aviação.

Quando abordamos a questão dos custos, é vital considerar os valores de mercado para comparação. Atualmente, os custos associados à produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio, juntamente com os custos intrínsecos às células de combustível, apresentam desafios. No entanto, observa-se uma tendência de queda nos custos dessas tecnologias, impulsionada por avanços na produção em larga escala, otimização de processos e investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento.

Em comparação direta com os sistemas de propulsão tradicionais, os custos iniciais associados às células de combustível podem ser mais elevados. Para proporcionar uma visão mais específica, vale mencionar que, em média, os custos das células de combustível PEMFC para aplicações aeronáuticas variam de \$500 a \$1.500 por quilowatt (kW), sendo entre \$50 e \$80 o valor unitário por célula. Estes valores estão sujeitos a variações devido a fatores como avanços tecnológicos, escala de produção e fornecedores específicos.

Adicionalmente, ao considerar a viabilidade econômica, é essencial avaliar o custo total de propriedade (TCO). Isso inclui não apenas os custos iniciais de aquisição e instalação, mas também os custos operacionais, de manutenção e os benefícios associados à redução do consumo de querosene e às possíveis compensações de emissões de carbono. Além disso, vale a pena considerar que diversos programas e iniciativas governamentais ao redor do mundo oferecem incentivos fiscais e subsídios para promover a adoção de tecnologias mais limpas, o que pode reduzir significativamente os custos de implementação das células de combustível.

Em síntese, as células de combustível a hidrogênio PEMFC em sistemas propulsores de aeronaves oferecem uma perspectiva empolgante para o futuro da aviação sustentável. A interação complexa entre os parâmetros da célula, a eficiência do conjunto e a redução do consumo de querosene representa um equilíbrio delicado, onde a otimização requer abordagens multidisciplinares. Embora os desafios econômicos ainda persistam, a constante evolução tecnológica e o compromisso com a inovação sugerem um potencial significativo para a integração bem-sucedida dessas tecnologias no cenário da aviação global.

Para possíveis trabalhos futuros, pode-se considerar uma compreensão mais profunda dos mecanismos de degradação ao longo do tempo, visando prolongar a vida útil da célula, continuação do aprimoramento do design da célula para maximizar a eficiência, reduzir custos e facilitar a produção em larga escala, além de investigações para aumentar ainda mais a eficiência global do sistema, incluindo estratégias de recuperação de calor e integração com fontes renováveis.

Além disso, avaliar a durabilidade das PEMFC e a resposta dinâmica das células é uma consideração crítica, especialmente em operações de longa duração, como voos intercontinentais e para lidar com variações rápidas na demanda de energia, como acelerações e desacelerações durante o voo. Serão analisadas as características de resposta dinâmica das células, considerando diferentes perfis de carga e descarga. Estudos poderão abordar a estabilidade e a vida útil das células de combustível, identificando potenciais desafios e propondo soluções para garantir uma operação confiável ao longo do tempo.

Essas sugestões apontam para uma direção mais abrangente em pesquisas futuras relacionadas à PEMFC, reconhecendo a importância contínua de avanços em materiais, design e aplicações práticas.

REFERÊNCIAS

Airbus revela motor de emissão zero movido a hidrogênio | Airbus, disponível em: <<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-reveals-hydrogen-powered-zero-emission-engine>>. acesso em: mar. 2023.

BARBIR, F. 2005. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Burlington, MA: Elsevier Academic Press.

COLMATI, F. **Estudo de catalisadores de Pt-Sn para o ânodo da célula a combustível de membrana trocadora de prótons alimentada com etanol direto**. 2007. 4f. Tese (Doutorado em Físico-Química) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DIAS, F., SOTELO, G., JÚNIOR, R. **Análise do Desempenho de uma Máquina Supercondutora em Comparação com um motor de indução**. Sociedade Brasileira de Automática (SBA) XXIV Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2022.

DYER, C. *Fuel cells for portable applications*. *J. Power Sources*. Vol. 106, 2002, pp. 31–34.

Fuel Cell Handbook. 5th ed. October 2000. EG&G Services, Parsons Incorporated, Science Applications International Corporation, U.S. Department of Energy.

GRAF, C; VATH, A; NICOLOSOS, N. **Modeling of heat transfer in a portable PEFC system within MATLAB-Simulink**. *J. Power Sources*. Vol. 155, 2006, pp. 52–59.

HEINZEL, A., HEBLING, C., MULLER, M., et al. *Fuel cells for low power applications*. *J. Power Sources*. Vol. 105, 2002, pp. 250–255.

HIRSCHENHOFER, J. H.; STAUFFER D. B.; ENGELMAN, R.R.; KLETT, M. G. *Fuel Cell Handbook*, 4th edn. Parsons Corp., for U.S. Dept. of Energy Report No. DOE/FETC-99/1076; 1998.

KOZAKIEWICZ, A.; GRZEGORCZYK, T. **Electric aircraft propulsion**, *Journal of KONBiN*, v. 51, n. 4, p. 49–66, 2021.

LARMINE, J.; ANDREWS, D. **Fuel cell systems explained**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2000.

MOBILIS. **Análise Powertrain**. 2018.

OSTERMANN, F., PUREUR, P. **Supercondutividade**. 1ª ed. São Paulo. Editora Livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

SALGADO, J. R. C.; GONZALES, E. R. **Correlação entre a atividade catalítica e o tamanho de partículas de Pt/C preparados por diferentes métodos**. *Eclética Química*. São Paulo, Brasil, v.28 (2), p. 77-86, 2003.

SPIEGEL, C. **PEM fuel cell modeling and simulation using Matlab** / Colleen Spiegel.

p. cm. ISBN 978-0-12-374259-9, Elsevier Inc. United Kingdom, 2011.

S. HAILE. **Fuel cell materials and components**. The Golden Jubilee Issue: Selected topics in Materials Science and Engineering: Past, Present and Future, edited by S. Suresh., Acta Materialia, v.51, n.19, p.5981-6000, 2003. ISSN 1359-6454.

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. Eletroquímica, 2.ed., São Paulo: Edusp, 2005.

U.S. Patent 5,234,777. *Membrane Catalyst Layer for Fuel Cells*. Wilson, M. The Regents of the University of California. August 10, 1993.

YBANEZ, L. et al. **ASCEND: The first step towards cryogenic electric propulsion**. IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 2022.

YOU, L., LIU, H. *A two-phase flow and transport model for PEM fuel cells*. *J. Power Sources*. Vol. 155, 2006, pp. 219–230.

WENDT, H.; GOTZ, M.; LINARDI, M. Fuel cell technology, Química Nova, v.23, p.538-546, 2000.

WILBERFORCE, T. et al. Development of Bi-polar plate design of PEM fuel cell using CFD techniques, International Journal of Hydrogen Energy, v.42, p.25663-25685, 2017.

APÊNDICE

Código compatível com a versão MATLAB R2022a:

- Eficiência teórica da célula de combustível

% Dados de entrada

T = 298; % Temperatura em Kelvin (25 °C)

P = 1; % Pressão em atm

% Potenciais padrão de eletrodo a 25 °C e 1 atm (V)

E0_H2 = 0;

E0_O2 = 1.23; % Potencial padrão para a reação $O_2 + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

% Potenciais das reações anódica e catódica

E_anodo = E0_H2;

E_catodo = E0_O2;

% Potencial da célula (V)

E_celula = E_anodo - E_catodo;

% Constante dos gases em J/(mol*K)

R = 8.314;

% Potencial termodinâmico (V)

U_termodinamico = R * T / (4 * 96485) * log(P);

% Eficiência teórica

efficiency_theoretical = E_celula / U_termodinamico;

% Exibição dos resultados

fprintf('Potencial da célula: %.4f V\n', E_celula);

fprintf('Potencial termodinâmico: %.4f V\n', U_termodinamico);

fprintf('Eficiência teórica: %.2f%%\n', efficiency_theoretical * 100);