

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Jhuan de Sá Maia**

**Modelagem da curva de polarização  
em células à combustíveis: Análise  
de sensibilidade**

**Dissertação de Bacharel em Engenharia  
Mecânica**

Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
Programa de Graduação em Engenharia  
Mecânica

RIO DE JANEIRO  
Junho de 2022

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Florian Alain Yannick Pradelle, pelo incentivo a abordar o estudo das modelagens de células a combustível, que une todo um desenvolvimento a nível mundial de novos meios para a descarbonização com a finalidade de um futuro melhor.

Aos professores que durante minha formação foram também responsáveis por todo o meu desenvolvimento e aprendizado.

À instituição PUC-Rio e todo o seu corpo docente, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica, por estarem sempre dispostos a atender da melhor forma todo o seu corpo discente.

Um agradecimento especial a Atlética de Engenharia PUC-Rio, a qual fiz parte por toda extensão do curso, com exceção do primeiro período, e fui presidente por três anos, onde tive a oportunidade de fazer grandes amigos, ter aprendizados e experiências de um dia a dia de gerir uma equipe disposta a representar a faculdade e o curso, em especial ao Hugo Machado, Ananda Lemos e Bruno Almeida, que foram meus mentores e meus braços direitos durante essa trajetória.

A todos os amigos que fiz durante todo o percurso nas mais variadas matérias, em especial aqueles que estavam comigo no início, Thalita Martins e Vinícius Bernardes, àqueles que tive um caminho cruzado no meio, Catharina Melo, Filipe Veroneze, e àqueles que estão concluindo essa longa jornada junto comigo, José Luiz Brandão, Antônio Lago, Felipe Marsiglia, Alexandre da Matta e Wesley de Castro.

Por fim, agradeço à minha família que sempre esteve do meu lado a cada passo e sempre foi a minha base, meus pais, Marcos e Valéria, e meus avós, Arilda, Joamir, Aricy, Antônio e Ary, minha prima Giulia e à minha namorada Bárbara, quem esteve do meu lado durante esses últimos períodos me dando todo o apoio necessário para fechar com sucesso mais essa etapa.

## Resumo

Maia, Jhuan de Sá; Pradelle, Florian Alain Yannick. Modelagem da curva de polarização em células à combustíveis: Análise de sensibilidade. Rio de Janeiro, 2022. 70p. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O trabalho consiste na análise de sensibilidade da modelagem das perdas na curva de polarização e na eficiência geral nas condições de operação na modelagem termodinâmica aplicada a PEMFC (Célula a combustível de membrana de troca de prótons) e SOFC (Célula a combustível de óxido sólido). Para obter a melhor modelagem dentre os equacionamentos utilizados na literatura, de acordo com a tecnologia e a potência oferecida pela célula, verificando a sensibilidade para os parâmetros utilizados. Através de correlações da literatura, identificar os artigos mais adequados e validar com dados experimentais a modelagem a partir de uma simulação desenvolvida com suas equações. Após as validações, de Trindade (2020), Sharaf (2014) e Azizi (2018), foram variados os parâmetros na simulação para analisar a partir da variação do valor de saída da potência máxima, da tensão e densidade de corrente para potência máxima, quais modelos são mais sensíveis a variações nos respectivos parâmetros. Com os resultados para análise, foi identificado que para cada uma das perdas de potencial, ativação, ôhmica e concentração, existe um parâmetro que sensibiliza mais o modelo. Na perda de ativação, o parâmetro com maior impacto no resultado final é o coeficiente de troca de carga do catodo, que se mostrou o parâmetro que tem maior variação de potência máxima. Para a perda ôhmica, foram os de resistividade dos componentes da célula, quanto maior a resistência dos componentes menor é a potência de saída. Por fim para a perda de concentração, é a densidade de corrente limite, pois impacta no limite de transferência de carga pela célula. Em relação a melhor modelagem, ao comparar os modelos de Trindade (2020) e de Sharaf (2014), foi possível identificar que os modelos com maior quantidade de parâmetros diluem mais a sensibilidade entre eles, e quando comparado entre o de Azizi (2018) e os modelos de PEMFC o modelo com menor sensibilidade ainda se destaca pelo mesmo motivo, mostrando uma sensibilidade para o coeficiente de troca de carga do catodo, as resistividades dos componentes e a densidade limite da célula, demandando maior atenção.

**Palavras-chave:** Curva de polarização; Célula a combustível; PEMFC; SOFC; Modelagem termodinâmica.

## **Abstract**

Maia, Jhuan de Sa; Pradelle, Florian Alain Yannick. Modeling of the polarization curve in fuel cells: Sensitivity analysis. Rio de Janeiro, 2022. 70p. Graduation Project – Department of Mechanical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The work consists of the sensitivity analysis of the modeling of losses in the polarization curve and the general efficiency in the operating conditions in the thermodynamic modeling applied to PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) and SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). To obtain the best modeling among the equations used in the literature, according to the technology and the power offered by the cell, verifying the sensitivity for the parameters used. Through literature correlations, identify the most suitable articles and validate with experimental data the modeling from a simulation developed with its equations. After the validations, by Trindade (2020), Sharaf (2014) and Azizi (2018), the parameters were varied in the simulation to analyze from the variation of the maximum power output value, voltage and current density for maximum power, which models are more sensitive to variations in the respective parameters. With the results for analysis, it was identified that for each of the potential, activation, ohmic and concentration losses, there is a parameter that sensitizes the model more. In the activation loss, the parameter with the greatest impact on the final result is the cathode charge exchange coefficient, which proved to be the parameter with the greatest maximum power variation. For the ohmic loss, it was the resistivity of the cell components, the greater the resistance of the components, the lower the output power. Finally, for the concentration loss, it is the threshold current density, as it impacts the charge transfer threshold through the cell. In relation to better modeling, when comparing the models of Trindade (2020) and Sharaf (2014), it was possible to identify that the models with a greater number of parameters dilute the sensitivity between them more, and when compared between Azizi's (2018) and the PEMFC models, the model with lower sensitivity still stands out for the same reason, showing a sensitivity to the cathode charge exchange coefficient, the component resistivities and the cell limit density, demanding more attention.

**Keywords:** Polarization curve; Fuel Cell; PEMFC; SOFC; Thermodynamic modeling;

## Lista de figuras

Figura 1 - Mix de geração elétrica mundial 1971-2017 .....	11
Figura 2 - Emissões estimadas até 2030, em bilhões de toneladas métricas de CO2 equivalente por ano .....	12
Figura 3 - Emissão de CO2 de combustíveis fósseis, em bilhões de toneladas métricas.....	13
Figura 4 - Principais Rotas de Produção do Hidrogênio. ....	15
Figura 5 - Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio .....	17
Figura 6 - Estimativa de preços de hidrogênio .....	17
Figura 7 – Estrutura da Célula a Combustível (PEMFC) .....	20
Figura 8 - Esboço das relações entre uma célula a combustível princípios de operação, vantagens, características e principais áreas de aplicação.....	21
Figura 9 - Eficiência dos modelos de Células comparados com outros geradores de energia.....	22
Figura 10 - Célula de membrana de troca de prótons (PEMFC) .....	24
Figura 11 – Esquema de “stacks” de células.....	25
Figura 12 – Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC) .....	27
Figura 13 – Exemplos de transportes movidos a Hidrogênio.....	28
Figura 14 - Carro elétrico a partir de Célula a Combustível abastecida com Bioetanol.....	29
Figura 15 - Chevrolet ZH2.....	29
Figura 16 - Geração estacionária de energia através de Célula a Combustível..	30
Figura 17 - Aplicações portáteis para CaC.....	31
Figura 18 - Carregador Upp a CaC da Intelligent Energy .....	31
Figura 19 - Aplicação de CaC nas forças armadas .....	32
Figura 20 - Curva de Polarização .....	35
Figura 21 - Variação da perda de ativação em função da densidade de corrente .....	37
Figura 22 - Variação da perda ôhmica em função da densidade de corrente.....	39
Figura 23 - Transporte de elétrons no metal.....	39
Figura 24 - Transporte iônico em uma membrana polimérica.....	40
Figura 25 - Variação da perda de concentração em função da densidade de corrente .....	42
Figura 26 - Curvas de perdas e de polarização por Trindade.....	48
Figura 27 - Curvas de perdas e de polarização por Sharaf.....	49
Figura 28 - Curvas de perdas e de polarização por Azizi .....	50
Figura 29 - Diagrama spider da variação relativa da potência máxima por Trindade (2020) .....	51
Figura 30 - Diagrama spider da variação relativa da tensão por Trindade (2020) .....	51
Figura 31 - Diagrama spider da variação relativa da densidade de corrente por Trindade.....	52
Figura 32 - Curvas de polarização para variação do Lambda .....	53
Figura 33 - Diagrama spider da variação relativa da potência máxima por Sharaf .....	54
Figura 34 - Diagrama spider da variação relativa da tensão por Sharaf .....	54

Figura 35 - Diagrama spider da variação relativa da densidade de corrente por Sharaf .....	55
Figura 36 - Diagrama spider da variação relativa da potência máxima por Azizi	56
Figura 37 - Diagrama spider da variação relativa da tensão por Azizi .....	56
Figura 38 - Diagrama spider da variação relativa da densidade de corrente por Azizi .....	57

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Características dos tipos de Células .....	19
Tabela 2 - Condições de operação da PEMFC na literatura .....	25
Tabela 3 - Parâmetros de entrada no modelo de Trindade.....	45
Tabela 4 - Parâmetros de entrada no modelo de Sharaf.....	45
Tabela 5 - Parâmetros de entrada no modelo de Azizi .....	46

## Lista de Símbolos

$A$  – Área ativa

$A_a$  – Constante de ativação do anodo

$A_c$  – Constante de ativação do catodo

$\alpha_a$  – Coeficiente de troca do anodo

$\alpha_c$  – Coeficiente de troca do catodo

$B_a$  – Constante empírica do anodo

$B_c$  – Constante empírica do catodo

$D_{a\text{eff}}$  – Difusividade efetiva dos gases pelo anodo

$D_{c\text{eff}}$  – Difusividade efetiva dos gases pelo catodo

$E_{Nernst}$  – Tensão de Nernst

$E_{ativ}$  – Potencial de ativação

$E_{con}$  – Potencial de concentração

$E_{ohm}$  – Potencial ôhmico

$F$  – Constante de Faraday

$I$  – Corrente

$j$  – Densidade de Corrente

$j_{0,a}$  – Densidade de Corrente no anodo

$j_{0,c}$  – Densidade de Corrente no catodo

$j_{lim}$  – Densidade de Corrente limite

$j_{as} = j_{lim,a}$  – Densidade de Corrente limite no anodo

$j_{cs} = j_{lim,c}$  – Densidade de Corrente limite no catodo

$l$  – Espessura da membrana

$\varphi$  – Lambda

$\dot{m}$  – Vazão mássica

$\eta$  – Eficiência

$n$  – Número de elétrons livres

$P$  – Pressão

$p^{H_2}$  – Pressão parcial do hidrogênio

$p^{O_2}$  – Pressão parcial do oxigênio

$p^{H_2O}$  – Pressão parcial da água

$PCI$  – Poder Calorífico Inferior

$\rho$  – Resistividade

$\rho_M$  – Resistividade da membrana

$\rho_a$  – Resistividade do anodo

$\rho_c$  – Resistividade do catodo

$\rho_e$  – Resistividade do eletrólito

$\rho_i$  – Resistividade do interconector

$R$  – Constante dos gases ideais, Resistência

$RC$  – Resistência do conjunto de eletrodos

$RM$  – Resistência da membrana

$R_{ion}$  – Resistência ionica

$R_{ele}$  – Resistência eletrônica

$R_{CR}$  – Resistência de contato da área específica

$R$  – Constante dos gases ideais, Resistência

$T$  – Temperatura

$W$  – Potência

## Lista de abreviaturas

BNEF	Bloomberg New Energy Finance
CCUS	Combinação de Captura, uso, transporte e armazenamento de dióxido de carbono
CHP	Combinação Calor e Potência (Combined Heat and Power)
CNN	Rede de Notícias a Cabo (Cable News Network)
COP26	Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GNL	Gás Natural Liquefeito (Liquefied natural gas)
IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis (The International Renewable Energy Agency)
PEMFC	Célula a combustível de membrana de troca de prótons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
SOFC	Célula a combustível de óxido sólido (Solid Oxide Fuel Cell)
STIG	Turbina a Gás com Injeção de Vapor (Steam Injected Gas Turbine)

## Sumário

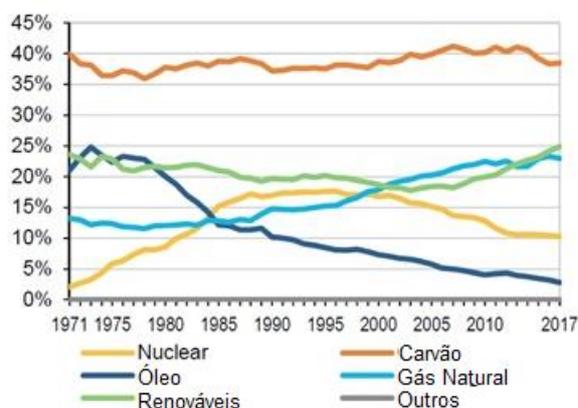
1.	Introdução	11
1.1.	Contextualização geral	11
1.2.	Objetivo	14
2.	Revisão da literatura	15
2.1.	Hidrogênio	15
2.2.	Célula a Combustível	18
2.2.1.	PEMFC	22
2.2.2.	SOFC	25
2.3.	Aplicações e Representatividade no mercado atual	27
3.	Modelagem Matemática	34
3.1.	Perda de Ativação	36
3.2.	Perda Ôhmica	38
3.3.	Perda de Concentração	41
4.	Metodologia	44
5.	Resultados e Discussões	48
5.1.	Validação	48
5.2.	Análise de sensibilidade	50
5.3.	Discussão	57
6.	Conclusão	59
	Referências Bibliográficas	61
	Apêndice A	66
	Apêndice B	69

# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização geral

A energia é hoje o bem mais necessário para o dia-a-dia do mundo, a principal “fonte de alimentação” e é essencial para muitos. Sua produção é feita por diversos processos e fontes, sendo sua maioria aqueles que não são ecologicamente corretos. Historicamente, este fator não era uma preocupação, pois o principal objetivo era o aumento da produção energética visando acompanhar a necessidade da mesma por conta do desenvolvimento da sociedade e das tecnologias no mundo moderno. Porém, isso virou uma questão de nível mundial, se tornando assunto de encontros de líderes das principais nações do mundo e também de grande parte da população que busca um mundo melhor.

Figura 1 - Mix de geração elétrica mundial 1971-2017



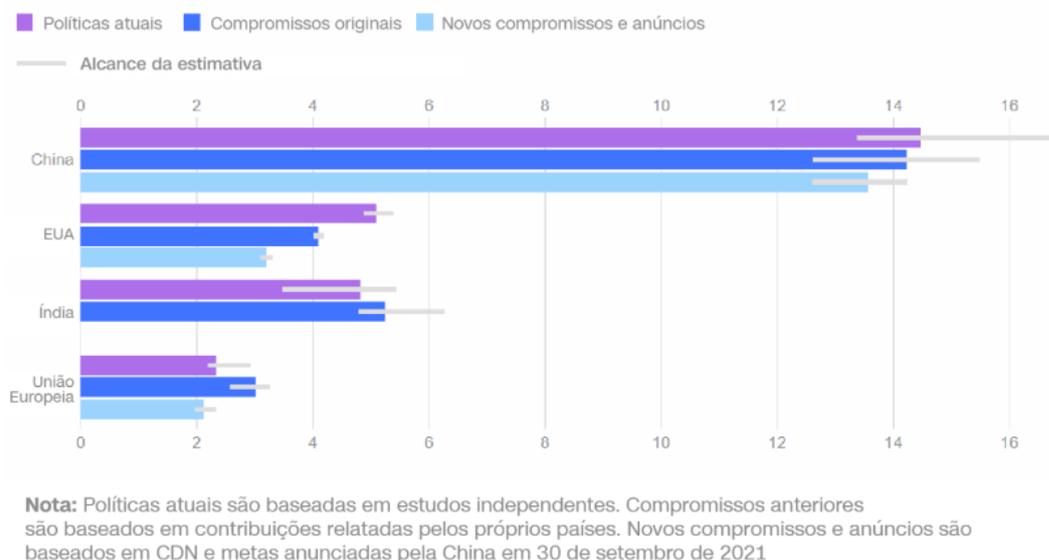
Fonte: Siqueira (2020)

Assim, de acordo com o tratado na COP26, o planejamento é reduzir principalmente as emissões de carbono através dos transportes rodoviários, estima-se que com a descarbonização no setor a redução de dióxido de carbono seria da faixa de 2,6 Gigatons por ano. Nesse contexto, o hidrogênio deve desenvolver um papel significativo no horizonte de 2050 (COP26 The Glasgow Climate Pact. 2021).

Assim como é possível ver na figura (2) uma indicação das políticas, os compromissos atuais e os novos compromissos até 2030. E mesmo assim, segundo relatório feito pela ONU sobre a situação das projeções de conclusão dos

compromissos, que seis dos países que compõem o G20, sequer atingiram as metas indicadas para a data limite anterior, CNN (2021).

Figura 2 - Emissões estimadas até 2030, em bilhões de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente por ano



Fonte: Adaptado por CNN (2021)

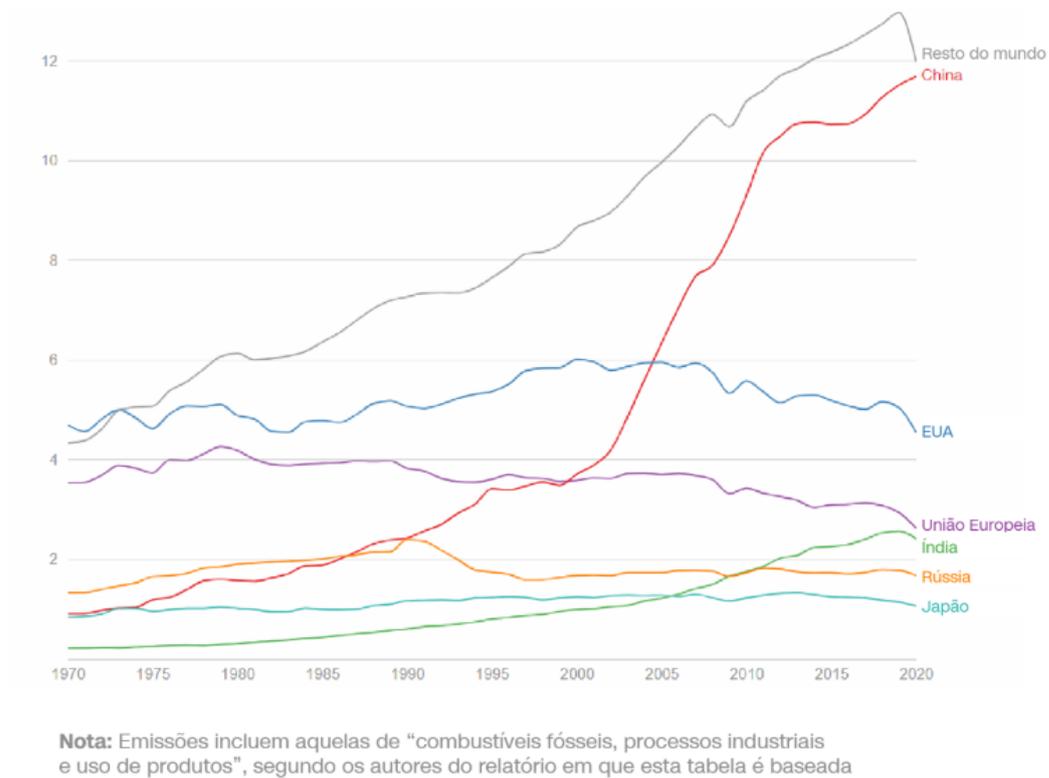
Segundo a diretora executiva do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, Inger Andersen, o cenário ainda se mantém otimista enquanto ao tempo que está disponível para chegar ao objetivo, mas que a janela para isso acontecer está diminuindo cada vez mais, e acredita-se que ainda nessa década, CNN (2021).

Sendo assim, a descarbonização do processo de produção de hidrogênio é tópico de diversas pesquisas que buscam uma forma inovadora e relativamente barata para que isso possa ser implementado, visto que o processo renovável de produção de hidrogênio sem liberação de gases de efeito estufa é a eletrólise da água (hidrogênio verde) que está atualmente economicamente inviável em larga escala por conta do elevado custo do processo. Levando em consideração a produção de hidrogênio com baixo impacto ambiental, conseguimos realizar a produção de energia através do hidrogênio de forma limpa usando as células à combustível que geram a energia através de reações eletroquímicas entre o hidrogênio e o oxigênio.

Visto que o cenário atual de emissões de carbono através de combustíveis fósseis, ainda é um parâmetro muito alto a combater, por conta do baixo custo em

relação a uma energia “limpa”, como mostra os números de emissão de CO2 por combustíveis fósseis na figura (3), CNN (2021).

Figura 3 - Emissão de CO2 de combustíveis fósseis, em bilhões de toneladas métricas



Fonte: Adaptado por CNN (2021)

## 1.2. Objetivo

O objetivo deste projeto consiste na elaboração de uma análise da sensibilidade das modelagens matemáticas utilizadas para caracterização da curva de polarização em células a combustível, priorizando as tecnologias de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* ou PEMFC) e de óxidos sólidos (*Solid Oxide Fuel Cell* ou SOFC), em que seja possível identificar quais parâmetros de entrada no modelo são influenciadores da sensibilidade do modelo. Análises e resultados obtidos através dos dados experimentais retirados de artigos científicos que utilizam células a combustível em seus sistemas serão usados para validar as modelagens estudadas e definir a melhor abordagem matemática para obter a curva de polarização, dentre eles contamos com, a potência gerada pela célula ou pelo conjunto delas, dimensões das células, coeficientes de difusão, correntes limites, resistências elétricas dos eletrodos e no meio condutor, condições de operação como temperatura e pressão das correntes de entrada e na célula.

Ao final das análises individuais, fazer a comparação de duas modelagens de células do tipo PEMFC, para identificar qual a mais sensível aos parâmetros, e fazer a comparação entre uma célula PEMFC e uma SOFC, verificando a sensibilidade de ambos os modelos.

Para chegar à conclusão de qual deve ser a melhor modelagem entre os modelos analisados, identificar quais modelos são mais sensíveis e porque, além de quais parâmetros são responsáveis pela maior parte dessa sensibilidade, demonstrando a necessidade da confiabilidade dos valores dos mesmos.

## 2. Revisão da Literatura

### 2.1. Hidrogênio

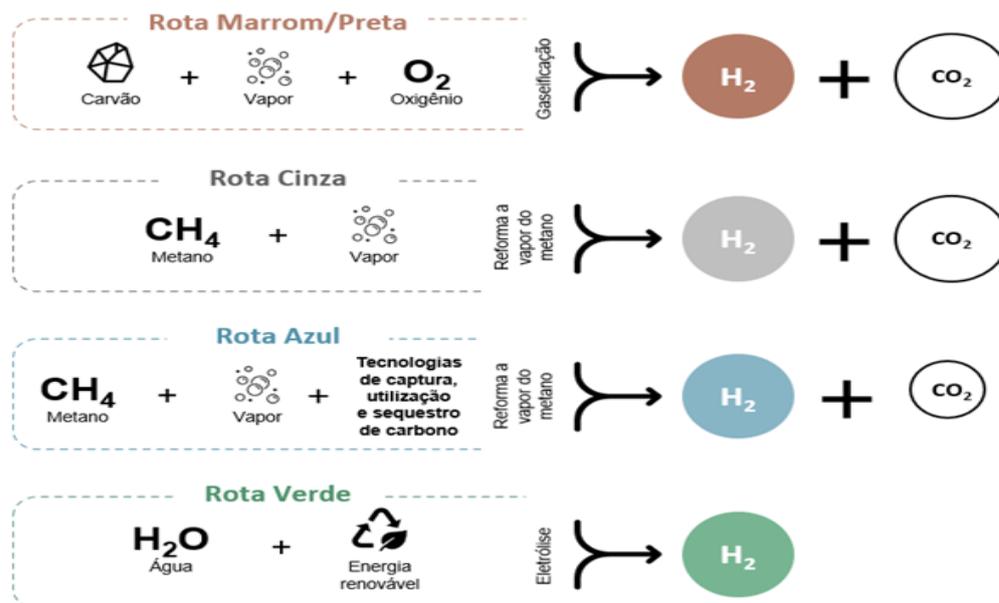
Principal combustível da maior parte das Células a Combustível, o hidrogênio é o elemento químico com maior abundância no universo, mas não é visto como fonte de energia pois não existem fontes naturais conhecidas do mesmo (TRUCHE, BAZARKINA, 2019).

Mas em 2012, segundo EPE (2018), teve a descoberta da existência de um poço de hidrogênio, puro ou consorciado a metano, nitrogênio, hélio e outros gases, no Mali. Com isso os custos de obtenção reduzem significativamente, acelerando os processos de exploração e consumo.

A EPE (2018) também indica que algumas emanações naturais de hidrogênio foram encontradas no Brasil, o que auxilia na produção de energia elétrica sem emissão de carbono.

Existem diversos meios de produção do hidrogênio, e o produto desses processos é denominado através de uma escala de cores de hidrogênio como apresentado na figura (4) a seguir.

Figura 4 - Principais Rotas de Produção do Hidrogênio.



Fonte: Gás Energy.

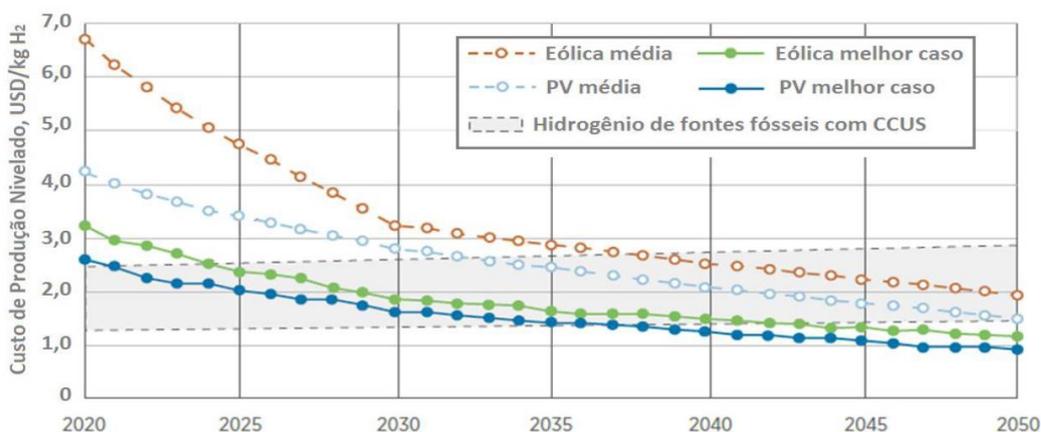
O processo mais comum é a reforma de gás natural ou pela oxidação parcial de combustíveis fósseis, como o carvão. Porém, esse processo libera grandes quantidades de dióxido de carbono, principalmente quando realizado

através do carvão, e o hidrogênio produzido a partir dessas fontes é denominado de hidrogênio preto/marrom para carvão e cinza para gás natural, respectivamente (IEA 2019). O hidrogênio azul é produzido a partir do mesmo processo de produção do hidrogênio cinza, porém, com uma combinação de outros como o de captura, uso, transporte e armazenamento do dióxido de carbono liberado durante todo o processo (CCUS). Uma outra variante de produção de hidrogênio, que não foi representada na figura anterior (4), com baixas emissões de dióxido de carbono a partir do gás natural é a pirólise, que precipita o carbono na sua forma elementar, considerado carbono neutro, através desse processo é denominado hidrogênio turquesa (Gás Energy).

Além dessas abordagens, que combinamos processos tradicionais de produção através da captura e do sequestro geológico do dióxido de carbono gerado, a produção do denominado hidrogênio verde a partir da eletrólise da água utilizando eletricidade renovável, ou seja, sem a produção de dióxido de carbono, é a solução a longo prazo no cenário internacional, segundo Santos e Ohara (2021).

O principal desafio da Rota Verde está relacionado com o alto custo de produção atual, em que os custos a curto-prazo estão situados no intervalo entre 2,5 e 6 USD/kg, estando mais caros que os hidrogênios Azul e Cinza, segundo Fernandes (2022), porém acredita-se na queda dos preços a longo prazo, segundo a figura (5) que indica a projeção dos custos de produção do hidrogênio. Recentemente, a (IEA, 2021) apresentou histórico de preços por rota de produção do hidrogênio para 2020 e suas projeções de perspectivas de preços para a próxima década. Para o ano de 2020, foi diferenciado os custos de produção do hidrogênio verde a partir da tecnologia utilizada, já demonstrando diminuição dos preços-teto.

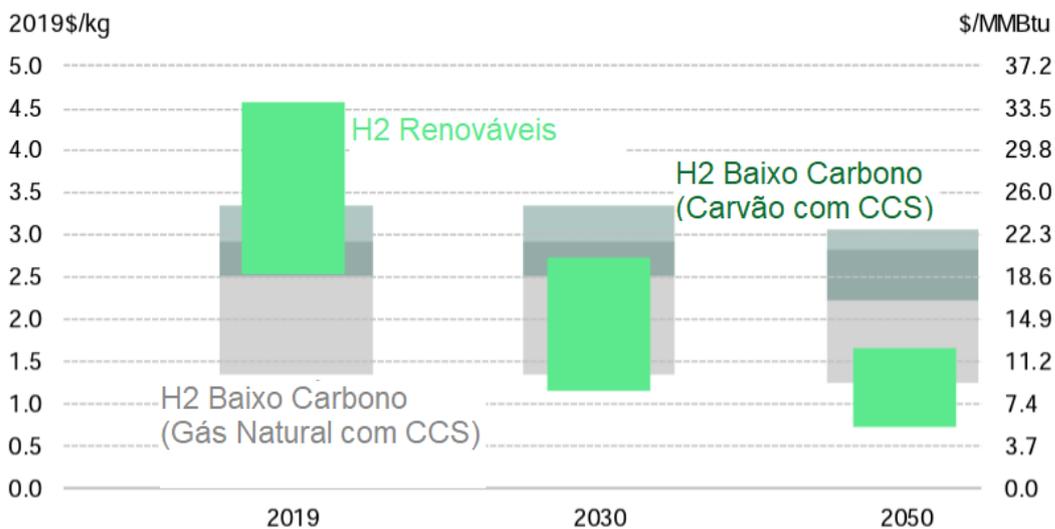
Figura 5 - Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio



Fonte: Adaptado do EPE, baseado em IRENA, 2019.

Um estudo realizado pela IRENA (2020) mostra uma possível redução de até 85% dos custos de produção do hidrogênio verde no longo prazo, como resultado de uma combinação de eletricidade mais barata e redução no custo de produção, além de maior eficiência e operação otimizada.

Figura 6 - Estimativa de preços de hidrogênio



Fonte: BLOOMBERGNEF, 2020.

A BNEF (Bloomberg New Energy Finance) (BLOOMBERGNEF, 2020) divulgou seu estudo com projeção da faixa global de custo nivelado de produção de projetos em larga escala e comparou com o preço do gás natural, (Figura 6). Em outro estudo o aumento da produção de eletrólitos e a redução de custos até

2050 na maior parte do mundo foi utilizado como premissa principal. Projeta-se que o hidrogênio verde se equivalerá a um preço de gás entre 6-12 US\$/MMBtu, tornando-o competitivo em diferentes locais do mundo (Gás Energy) (TEIXEIRA, 2021).

Segundo Waterworth (2022), quando se trata de hidrogênio verde, o Brasil tem competitividade para ter o menor custo de produção em 2030, algo em torno de 1 a 1,5 USD/kg, mesmo quando comparado com os hidrogênios Cinza e Azul, respectivamente com as projeções de 1,5 e de 2 a 2,5 USD/kg.

## 2.2. Célula a combustível

Cada vez mais inseridas no mercado, as células combustíveis tem como objetivo suprir a necessidade energética juntamente com uma eficiência alta e uma baixa agressão ecológica. Segundo Linardi (2000) o conceito e o princípio da célula combustível surgiram em 1835, descoberto por Sir Grove, físico britânico, e no final do século passado, Wilhelm Ostwald e Walther Nernst, químico e físico-químico alemães respectivamente, abordaram a vantagem de uma combustão eletroquímica a frio em relação a uma máquina de Carnot, que o princípio se baseia em uma máquina de calor mecânica.

A primeira célula a combustível foi desenvolvida na década de 30 por Bacon, e funcionava sob pressão e a uma temperatura de 200 graus Celsius por meio de um eletrólito alcalino, com o tempo foram sendo desenvolvidos outros modelos de células com outros materiais, porém mantendo o princípio estrutural desde os primórdios, até os modelos mais modernos utilizados e estudados na atualidade, de acordo com Linardi (2000).

Com isso, alguns modelos dos apresentados, como os de Linardi (2000) por exemplo, que não evoluíram ou não se adaptaram a novas condições foram sendo utilizados onde essas condições não eram tão influentes como o custo, como a própria célula com membrana alcalina que acabou sendo foco para projetos espaciais e não se voltaram ao desenvolvimento para utilização terrestre.

Dentre os principais tipos de células vamos abordar principalmente a célula de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* ou PEMFC) e de óxidos sólidos (*Solid Oxide Fuel Cell* ou SOFC), em que ambas têm

como principal combustível o hidrogênio e seu desenvolvimento é focado na utilização no dia a dia.

As células a combustível têm a capacidade de gerar potência em fração de Watts até centenas de kilowatts, mostrando que sua flexibilidade de produção permite que esse modelo possa ser implementado em diversas áreas onde é necessária a geração de energia (BARBIR, 2013). Já foram implementadas aplicações de células a combustível no setor de transporte como em carros, ônibus, caminhões, motocicletas, bicicletas, trens e até navios e submarinos, mas também vêm sendo desenvolvidos e implementados sistemas de geração de energia residencial, comercial, de forma que mais opções de fornecedores de energia entrem no mercado, para essas diversas aplicações existem diferentes células com características distintas, que se adequam melhor a cada necessidade como mostra a tabela (1).

Tabela 1 - Características dos tipos de Células

TIPO DE CÉLULA COMBUSTÍVEL	ELETRÓLITO COMUM	TEMPERATURA	TAMANHO TÍPICO DO STACK	EFICIÊNCIA ELÉTRICA	APLICAÇÕES	VANTAGENS	DESAFIOS
MEMBRANA ELETRÓLITICA DE POLÍMERO	ÁCIDO PERFLUORO SULFÔNICO	<120 °C	<1kW - 100kW	60% direto H2 40% combustível reformado	<ul style="list-style-type: none"> <li>ENERGIA RESERVA</li> <li>ENERGIA PORTÁTIL</li> <li>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</li> <li>TRANSPORTE</li> <li>VEÍCULOS ESPECIAIS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O ELETRÓLITO SÓLIDO REDUZ A CORROÇÃO E PROBLEMAS DE GERENCIAMENTO DE ELETRÓLITOS</li> <li>TEMPERATURA BAIXA</li> <li>INICIALIZAÇÃO RÁPIDA E ACOMPANHAMENTO DE CARGA ENERGIA RESERVA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CATALISADORES CAROS</li> <li>SENSÍVEL ÀS IMPUREZAS DO COMBUSTÍVEL</li> </ul>
ALCALINA	HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO AQUOSO EMBEBIDO EM UMA MATRIZ POROSA OU MEMBRANA DE POLÍMERO ALCALINO	<100 °C	1 - 100 kW	60%	<ul style="list-style-type: none"> <li>MILITAR</li> <li>ESPACIAL</li> <li>ENERGIA RESERVA</li> <li>TRANSPORTE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>UMA GAMA MAIS AMPLA DE MATERIAIS ESTÁVEIS PERMITE COMPONENTES DE MENOR CUSTO</li> <li>TEMPERATURA BAIXA</li> <li>INÍCIO RÁPIDO-UD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SENSÍVEL AO CO, NO COMBUSTÍVEL E NO AR</li> <li>GERENCIAMENTO DE ELETRÓLITOS (AQUOSO)</li> <li>CONDUTIVIDADE DO ELETRÓLITO (POLÍMERO)</li> </ul>
ÁCIDO FOSFÓRICO	ÁCIDO FOSFÓRICO EMBEBIDO EM UMA MATRIZ POROSA OU EMBEBIDO EM UMA MEMBRANA DE POLÍMERO	150 - 200 °C	5 - 400 kW 100kW módulo (PAFC líquido); <10 kW (membrana de polímero)	40%	<ul style="list-style-type: none"> <li>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ADEQUADO PARA CHP</li> <li>MAIOR TOLERÂNCIA ÀS IMPUREZAS DO COMBUSTÍVEL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CATALISADORES CAROS</li> <li>LONGO TEMPO DE INICIALIZAÇÃO</li> <li>SENSIBILIDADE AO ENXOFRE</li> </ul>
CARBONATO FUNDIDO	CARBONATOS DE LÍCIO, SÓDIO E/OU POTÁSSIO FUNDIDOS EMBEBIDOS EM UMA MATRIZ POROSA	600-700 °C	300 kW - 3MW 300 kW módulo	50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>UTILIDADE ELÉTRICA</li> <li>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ALTA EFICIÊNCIA</li> <li>FLEXIBILIDADE DE COMBUSTÍVEL</li> <li>ELETRÓLITO SÓLIDO</li> <li>ADEQUADO PARA CHP</li> <li>CICLO DE TURBINA HÍBRIDA/GÁS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CORROÇÃO DE ALTA TEMPERATURA E QUEBRA DE COMPONENTES CELULARES</li> <li>LONGO TEMPO DE INICIALIZAÇÃO</li> <li>DENSIDADE DE BAIXA POTÊNCIA</li> </ul>
ÓXIDO SÓLIDO	ZIRCÓNIA ESTABILIZADA COM ÍTRIA	500 - 1000 °C	1 kW - 2 MW	60%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ENERGIA AUXILIAR</li> <li>UTILIDADE ELÉTRICA</li> <li>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ALTA EFICIÊNCIA</li> <li>FLEXIBILIDADE DE COMBUSTÍVEL</li> <li>ELETRÓLITO SÓLIDO</li> <li>ADEQUADO PARA CHP</li> <li>CICLO DE TURBINA HÍBRIDA/GÁS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CORROÇÃO DE ALTA TEMPERATURA E QUEBRA DE COMPONENTES CELULARES</li> <li>LONGO TEMPO DE INICIALIZAÇÃO</li> <li>NÚMERO LIMITADO DE DESGASTOS</li> </ul>

<sup>1</sup> NREL Composite Data Product 8, "Fuel Cell System Efficiency," [http://www.nrel.gov/hydrogen/docs/tdp/cdp\\_8.jpg](http://www.nrel.gov/hydrogen/docs/tdp/cdp_8.jpg)

<sup>2</sup> Panasonic, "Hydrogen Fuel Cells News Release," "Launch of New 'Ene-Famer' Home Fuel Cell Product: More Affordable and Easier to Install," [http://www.panasonic.com/usa/energy/official\\_data/data/2012/01/16/120115-1613019-5.html](http://www.panasonic.com/usa/energy/official_data/data/2012/01/16/120115-1613019-5.html)

<sup>3</sup> S. Mulder et al., "Market-ready stationary 6 kW generator with alkaline fuel cells," ECS Transactions 12 (2008) 743-758

<sup>4</sup> Doosan FuelCell Model 400 Datasheet, [http://www.doosanfuelcell.com/attach\\_files/tek\\_PureCell%20Model%20400%20datasheet.pdf](http://www.doosanfuelcell.com/attach_files/tek_PureCell%20Model%20400%20datasheet.pdf)

<sup>5</sup> FuelCell Energy DF-C300 Product Specifications, <http://www.fuelcellenergy.com/assets/DFC300-product-specifications.pdf>

<sup>6</sup> Ceramic Fuel Cells Genlex Product Specifications, <http://www.bloomenenergy.com/fuel-cell-400-data-sheet/>

For More Information

More information on the Fuel Cell Technologies Office is available at <http://www.hydrogenandfuelcells.energy.gov>.

Fonte: Adaptado de Energy.

A tabela (1) mostra o material do principal componente da célula, o eletrólito, para cada tipo, além das temperaturas de operação, que depende de quais condições de operação o sistema onde a célula vai ser inserida está, projeção de produção energética, aplicações, vantagens e desafios (ENERGY).

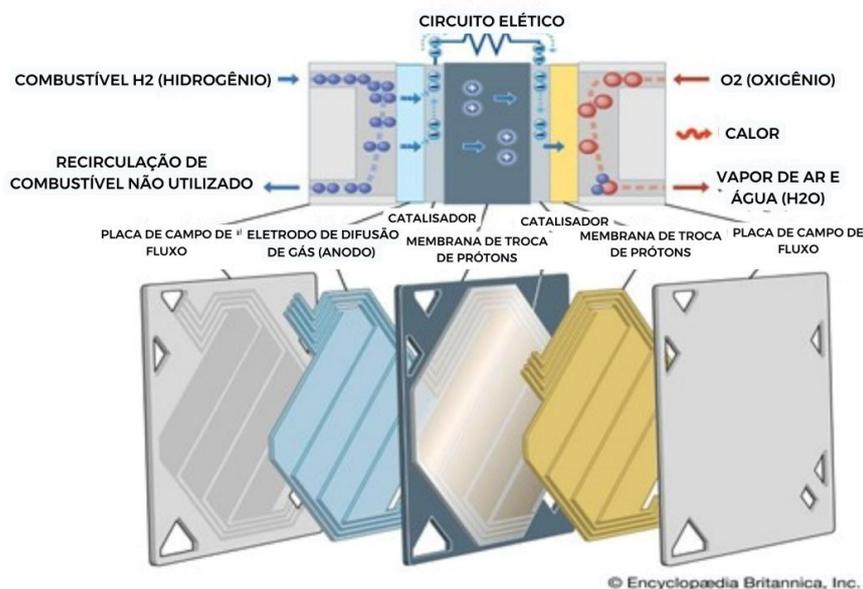
O conceito da célula a combustível consiste em um equipamento que produz energia através de uma reação eletroquímica de oxido-redução de um combustível com um oxidante. Sua estrutura consiste basicamente em todos os

modelos em dois eletrodos (catodo e anodo) e um eletrólito, que pode ser um líquido, uma membrana polimérica ou um sólido (SPIEGEL, 2008)..

Seu funcionamento se baseia em duas reações químicas que ocorrem em seus eletrodos, em que o combustível dessa célula, é oxidado no anodo e no processo libera elétrons, e enquanto isso, no eletrodo do lado oposto, do catodo, o oxidante é reduzido carregando o eletrodo negativamente. Com essas reações temos um eletrodo carregado negativamente e um positivamente, isso ocorre com o eletrólito no meio dos dois eletrodos, sendo assim os portadores de carga positiva, os prótons no caso da PEMFC, figura (7), ou negativa, os íons oxigênio no caso da SOFC, liberados na reação são transportados do anodo para o catodo através do eletrólito enquanto os elétrons são transportados por um sistema externo que capta a energia gerada na reação (SPIEGEL, 2008).

Lembrando que no processo que ocorre no catodo, ainda temos a liberação de calor e água, e com isso conseguimos ainda aproveitar a energia em forma de calor em sistemas CHP (Combinação Calor e Potência), melhorando ainda mais a eficiência do projeto.

Figura 7 – Estrutura da Célula a Combustível (PEMFC)



Fonte: SCHUMM, 2021.

Considerando a breve introdução do conceito de uma célula a combustível, podemos pontuar algumas vantagens em relação à implementação das mesmas, levando em consideração, custo-benefício, eficiência, logística dentre outros. Começando com o principal ponto do desenvolvimento das células, temos a eficiência, está entre as eficiências no quesito produção de energia, pois o

processo nos permite reduzir consideravelmente as perdas do processo, temos diversos modelos com diferentes combustíveis, o que permite uma flexibilidade no projeto, não tem um projeto complexo, tornando fácil a adaptação da mesma de acordo com a necessidade, são consideradas produtoras de energia “limpas”, pois não produzem poluentes, baixo custo de manutenção pois o desgaste da mesma é ínfimo por conta de não possuir partes móveis, já que seu processo é químico em sua maior parte, além de que funciona à medida que entra combustível, esses pontos são estruturados no esquema representado na figura (8) que cita os princípios, recursos e aplicações da célula, Schumm (2021).

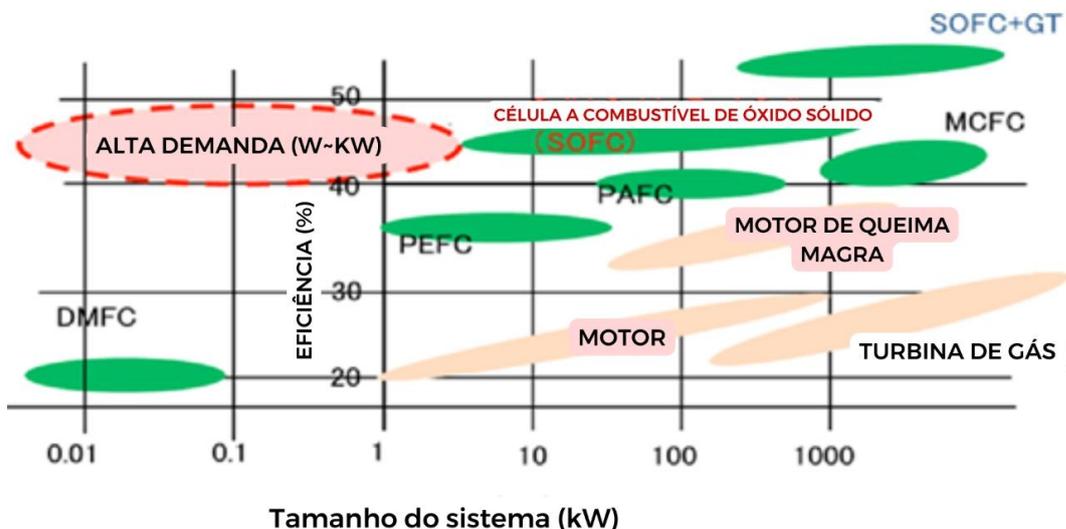
Figura 8 - Esboço das relações entre uma célula a combustível princípios de operação, vantagens, características e principais áreas de aplicação



Fonte: Adaptado de Sharaf (2014)

Além dos recursos apresentados na figura anterior (8) a figura a seguir (9), mostra uma comparação da eficiência dos variados modelos de células com outras fontes de energia, pela necessidade.

Figura 9 - Eficiência dos modelos de Células comparados com outros geradores de energia



Fonte: Fujishiro, 2009.

Na figura (9), é possível entender a comparação das células com as demais fontes de energia como motores e turbinas, mostrando que na grande parte das necessidades de energia há um tipo de célula que possui uma eficiência maior que os demais meios de geração de energia, de acordo com Fujishiro (2009).

Porém, ao mesmo tempo que possui essas vantagens, os projetos esbarram em algumas limitações como, o custo dos materiais de produção, geralmente materiais raros ou muito escassos tornam o custo de produção elevado, a primeiro momento ainda não há uma forma de produzir o combustível de forma viável e ecologicamente correta, e das substâncias que são poluentes a célula, dependendo de qual eletrólito a mesma utiliza, Spiegel (2008).

Com isso, é possível observar que existem vários motivos para optarmos pela célula a combustível no lugar de outras fontes de energia, maior eficiência, menor poluição, menor risco de processo, mas as limitações que encontramos hoje como o custo com a principal precisam ser desenvolvidas para podermos viabilizar a implementação em uma escala maior, Sharaf (2014).

### 2.2.1. PEMFC

Este modelo é o de célula de membrana de troca de prótons, ou como diz a sigla em inglês, Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). Este modelo é

estudado desde o início das pesquisas espaciais, mas somente teve uma evolução no seu desenvolvimento quando adotaram a membrana de Nafion, tendo um resultado em relação a desempenho a longo prazo, segundo Linardi (1999).

Em cada célula temos as reações acontecendo no anodo e no catodo, e elas são representadas pelas equações a seguir, anodo, catodo e a reação global.

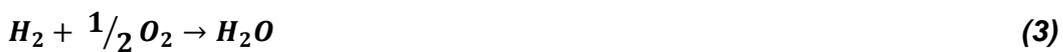
Anodo



Catodo



Reação Global



Segundo Spiegel and Colleen (2008), uma PEMFC é constituída principalmente pelos componentes a seguir: membrana de troca de próton, catalisadores, difusores gasosos, placas de campos de fluxo, juntas e as placas de extremidades.

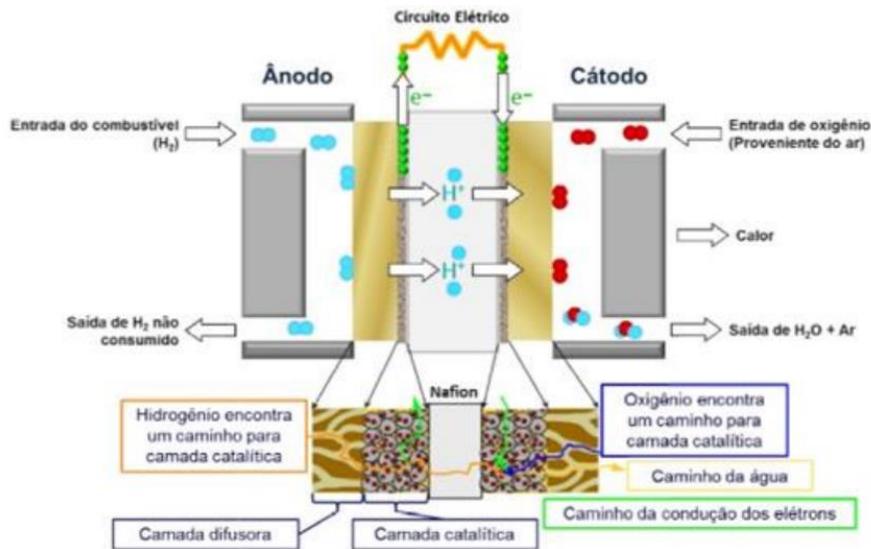
A PEMFC tem como único combustível o hidrogênio puro, o que mostra que a célula é sensível a impurezas no combustível, o que ocasionaria no desgaste e o não funcionamento da célula. Impurezas são também chamadas de veneno para a célula pois prejudicam ou inviabilizam o processo, temos como as mais comuns, monóxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, amônia, e compostos orgânicos contendo enxofre e hidrogênio no caso do combustível, e para o oxidante temos óxidos de enxofre e nitrogênio (Chen, 2015).

Para Trindade (2020), a membrana, como mostra a figura (10) é responsável por fazer o transporte dos prótons de hidrogênio do anodo para o catodo, e para Villullas; Ticianelli e González (2001), entende-se que uma membrana polimérica deste material era quimicamente inerte a ambas as reações que ocorriam, de redução e oxidação, enquanto os catalisadores fazem as quebras dos combustíveis em elétrons e prótons, em que os prótons formam água (H<sub>2</sub>O) com o oxidante.

O oxidante, no caso o oxigênio que entra no sistema como ar atmosférico, no catodo, e os elétrons passam pelo circuito externo, já os difusores permitem que o combustível e o oxidante passem por sua camada para coletar os elétrons liberados, enquanto as placas de campo de fluxo distribuem o combustível e o oxidante pelos difusores, Trindade (2020).

Por fim, as juntas mantêm a pressão distribuída igualmente na célula e evitam vazamentos e as placas de extremidade estabilizam todas as células da série, ou “stack”, Trindade, (2020).

Figura 10 - Célula de membrana de troca de prótons (PEMFC)



Fonte: Robalinho, 2021.

Um dos motivos que os estudos indicam a PEMFC como o modelo de célula mais indicada a vir a substituir o motor a combustão são as suas condições e características de operação. As PEMFC's geralmente operam em condições facilmente alcançáveis, sua temperatura fica entre 20 a 100 °C, pressão atmosférica para o ar com oxidante como mostra o artigo Chen (2015). Segundo o mesmo autor, tem-se a temperatura entre 358-368 K, a pressão entre 1-3 atm e é abastecido por hidrogênio puro, pois no caso da PEMFC, a sua sensibilidade a impurezas no combustível ou no oxidante é muito alta. As condições de umidade são importantes pelo fato de a condutividade da membrana polimérica ter relação com a mesma, já que quanto mais úmida a membrana maior a condutividade, porém devem ser controlados para evitar encharcamentos nos eletrodos ou molhar o catalisador (Chen, 2015).

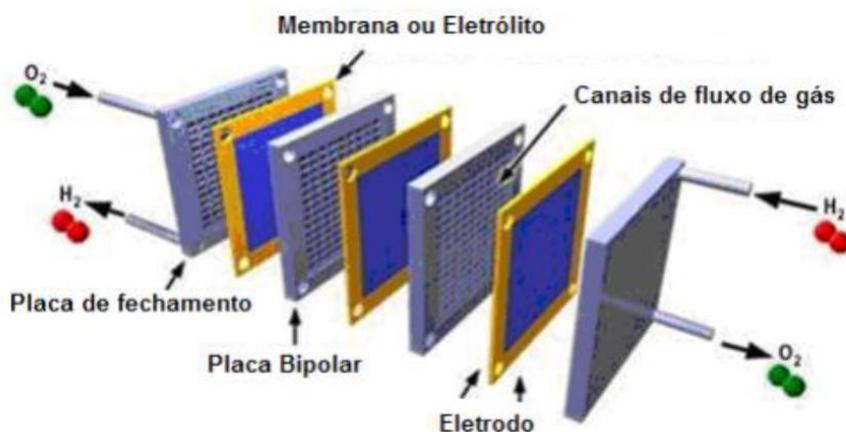
Tabela 2 - Condições de operação da PEMFC na literatura  
*Operating conditions of PEMFCs in literature*

Operating Parameter	Range of Conditions	Optimal Conditions
Temperature	20°– 90 °C	60°– 80°C
Pressure	1 – 3 atm	2 – 3 atm
Humidity	50 – 100 % RH	100 % RH
Oxidant	Air or O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>

Fonte: SPIEGEL, 2008.

Em relação ao seu tamanho, uma célula é consideravelmente menor que um motor por exemplo, mas para obter a produção necessária para substituir um motor devemos adotar um sistema de células em série, chamados de “stacks”, figura (11), como apresentado por Spiegel (2008), e além disso suas condições de operações tem que se adequar aos de um motor, como mostra a tabela 2.

Figura 11 – Esquema de “stacks” de células



Fonte: TRINDADE, 2020.

Esses “stacks” ocupam um volume quase similar ao de um motor, porém a sua produção energética é muito maior já que a densidade de potência em uma célula gira em torno de 1 kW/Litro, temos um consumo muito menor para um retorno maior, Spiegel (2008).

## 2.2.2. SOFC

Este modelo é o de Célula a Combustível de Óxido Sólido, figura (12), ou como diz a sigla, Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), é um equipamento que permite a

conversão direta de energia química em energia elétrica em alta temperatura, utilizando materiais cerâmicos (COMPENDIUM, 2016). A estrutura é similar a PEMFC, consistem em três componentes principais, um eletrólito denso é posicionado entre dois eletrodos porosos, o anodo e o catodo. Apesar dessa semelhança, seu funcionamento é um pouco diferente. Primeiro, o combustível alimentado ao anodo, onde ocorre a reação de oxidação, liberando os elétrons para o circuito externo. O oxigênio por outro lado, reage no catodo, aceitando os elétrons do circuito externo, causando a ocorrência da reação de redução (COMPENDIUM, 2016).

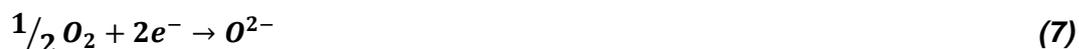
A energia elétrica é produzida através do fluxo de elétrons que se movimenta através do circuito externo, em que o número de cargas transportadas externamente é balanceado com a quantidade de íons de oxigênio que migram pelo eletrólito no sentido contrário, sentido do anodo (COMPENDIUM, 2016).

Em cada célula temos as reações acontecendo no anodo e no catodo, e elas são representadas pelas equações a seguir, anodo, catodo e a reação global, a partir das equações a seguir é possível identificar a diversidade de combustíveis que podem ser utilizados nesse tipo de célula, como o hidrogênio, principal do estudo, monóxido de carbono e gás metano.

Anodo



Catodo



Reação Global

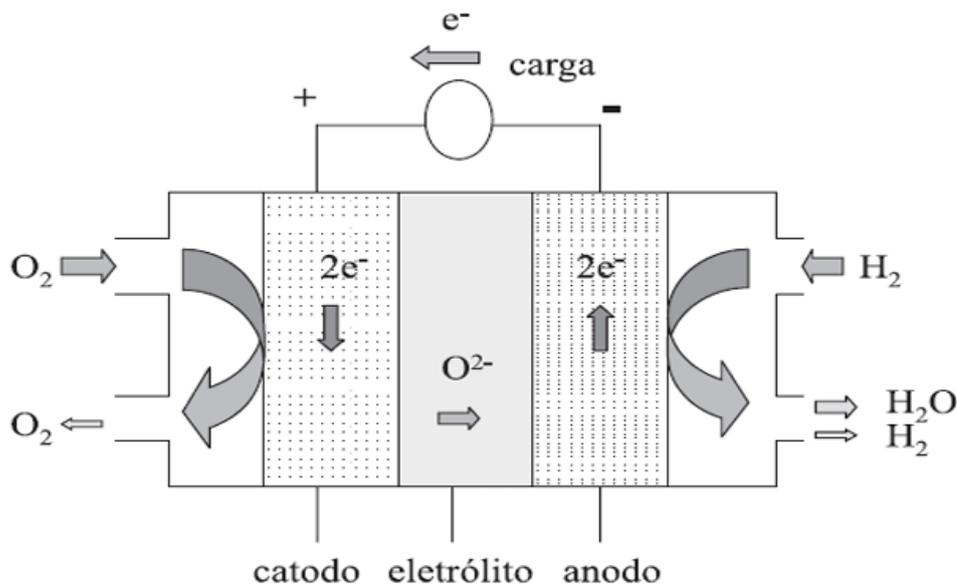


Diferentemente das PEMFC, para Dincer and Rosen (2013), a reforma dos combustíveis contendo hidrocarbonetos podem ser realizados dentro do gerador, eliminando assim a necessidade de um reformador.

Enquanto isso, por conta de suas condições de operações, a alta temperatura de reação não requer catalisadores caros e permite o processamento

direto do combustível nas células, Dincer and Rosen (2013), essas condições de operação são responsáveis por tornar o eletrólito em um condutor de íons oxidados.

Figura 12 – Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC)



Fonte: Santos, 2018.

Diferente da PEMFC, a SOFC tem uma variedade maior de combustíveis possíveis como o gás natural por exemplo, isso faz esse modelo mais atrativo em aplicações principalmente industriais, por ser atrativo a sistemas de aplicação de cogeração, e por ter um eletrólito sólido, é mais estável, diferentemente dos com eletrólito líquidos, pois evita problemas associados a encharcamento de eletrodos e molhar o catalisador. Esse modelo tem como característica por conta dessas características, uma maior tolerância a contaminantes no combustível (DINCER, 2013).

### 2.3 Aplicações e representatividade no mercado atual

As células a combustível têm a capacidade de gerar potência em fração de Watts até centenas de kilowatts, mostrando que sua flexibilidade de produção permite que esse modelo possa ser implementado em diversas áreas onde é necessária a geração de energia. O setor mais desenvolvido e estabelecido com a tecnologia das células a combustível é o setor aeroespacial, que foi onde a tecnologia começou a tomar impulso, desta forma utilizam o hidrogênio e as

células para suprir a necessidade de energia dos equipamentos a bordo, além de outras funções como a produção de água.

Figura 13 – Exemplos de transportes movidos a Hidrogênio



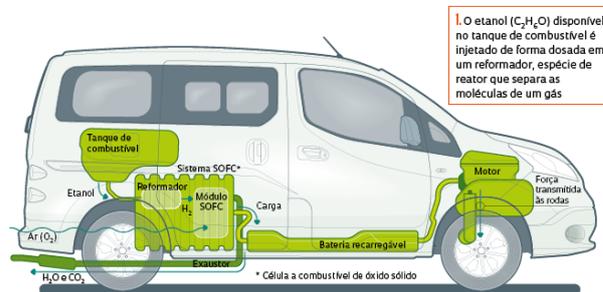
Fonte: ABH2.

Já foram implementadas aplicações de células a combustível no setor de transporte como em carros, ônibus, caminhões, motocicletas, bicicletas, trens e até navios e submarinos, como nas figuras (13 e 14).

Figura 14 - Carro elétrico a partir de Célula a Combustível abastecida com Bioetanol

## SISTEMA ALTERNATIVO

Saiba como o hidrogênio é separado do etanol e gera energia para mover o veículo



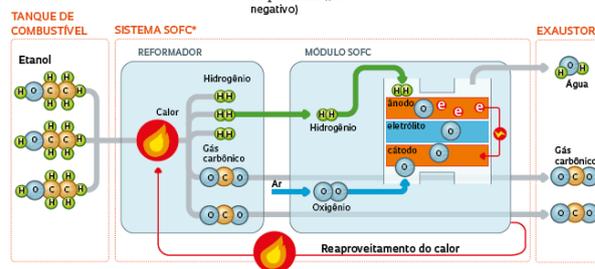
2. Nesse dispositivo, sob alta temperatura, o etanol é transformado em um gás rico em hidrogênio ( $H_2$ )

3. O hidrogênio e o oxigênio ( $O_2$ ) do ar são injetados em uma célula a combustível de óxido sólido (SOFC). O  $CO_2$  gerado no reformador é eliminado pelo escapamento

4. O princípio de funcionamento de uma célula a combustível é parecido ao de uma pilha comum. O  $O_2$  do ar recebe os elétrons no cátodo (polo positivo) e se torna um íon de oxigênio, que migra pelo eletrólito e reage com o  $H_2$  no ânodo (polo negativo)

5. O resultado é a geração de energia elétrica que abastecerá a bateria recarregável do veículo e moverá seu motor

6. O vapor d'água resultante do processo é eliminado pelo cano de escape. O processo também gera calor, que é reutilizado para aquecer o reformador



FONTE: IPEN E NISSAN

Fonte: <https://www.defesaemfoco.com.br/pesquisadores-investem-em-carros-eletricos-movidos-a-etanol/>

Mas as aplicações no setor militar não se limitam a eletroportáteis e pequenos geradores, recentemente o exército americano desenvolveu em conjunto com a GM (General Motors) uma caminhonete movida a hidrogênio, a Chevrolet ZH2, figura (15).

Figura 15 - Chevrolet ZH2



Fonte: Quatro Rodas, 2017.

O carro é abastecido com combustível militar JP8, e converte o mesmo para hidrogênio, porém o hidrogênio também poderá ser obtido através de qualquer fonte disponível. De acordo com a montadora com 5, 6 quilos de hidrogênio a autonomia desse veículo chega em torno de 200 a 300 milhas. E mesmo que não fosse o principal objetivo, por conta da baixa produção de calor, o veículo ainda emite menos radiação, o que ajuda na ocultação de sensores térmicos e noturnos para o setor militar, Quatro Rodas (2017).

Mas também vêm sendo desenvolvidos e implementados sistemas de geração de energia residencial, comercial, de forma que mais opções de fornecedores de energia entrem no mercado, no Japão a meta é instalar as células em 5,3 milhões de casas até 2030, cerca de 10% das moradias, com o objetivo de melhorar a eficiência energética, a implantação das células estacionárias residenciais, figura (16), vai economizar energia, lidar com questões ambientais e aumentar a segurança energética, segundo Watanabe (2014).

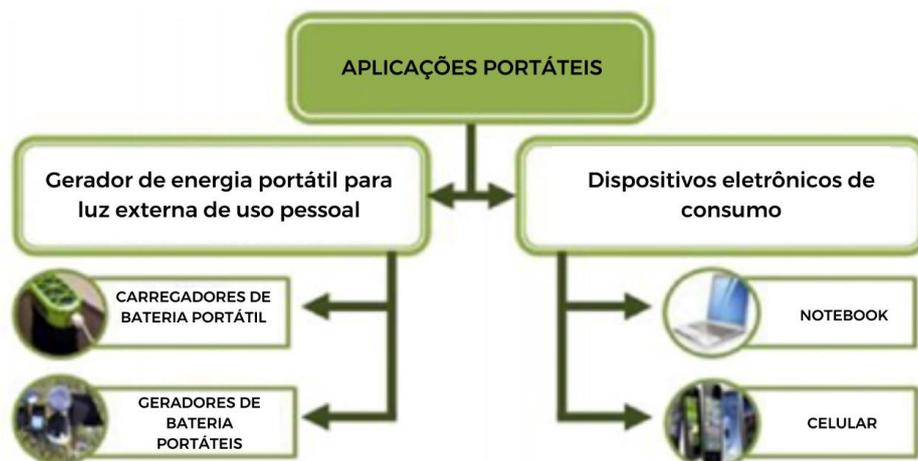
Figura 16 - Geração estacionária de energia através de Célula a Combustível



Fonte: <https://enefield.eu/>

Os geradores a hidrogênio que também entram no setor emergencial têm como vantagens em comparação aos geradores a combustão, a diminuição do barulho já que não há parte móvel na produção de energia não são gerados ruídos, a não emissão de gases nocivos, ter um período de armazenamento muito maior e a baixa manutenção também por conta de não ter partes móveis.

Figura 17 - Aplicações portáteis para CaC



Fonte: Adaptado de <http://www.open-access.bcu.ac.uk/3693/1/3693.pdf>

Podemos ver também as células entrando no setor de eletroportáteis, figuras (17 e 18), como substitutos das tradicionais baterias por conta de terem uma produção constante de energia, uma produção mais rápida, além do que baterias ocupam espaço e aumentam o peso do aparelho, mas também como pequenos geradores de energia móveis.

Figura 18 - Carregador Upp a CaC da Intelligent Energy



Fonte: <https://m.folha.uol.com.br/tec/2013/11/1370877-empresa-aposta-em-carregador-de-hidrogenio-para-driblar-escassez-de-energia-na-africa.shtml>

Atualmente para esta área de geradores móveis ainda estão sendo mais voltadas e desenvolvidas voltadas para os militares, que por conta de missões acabam por necessitar de geração de energia para comunicação e equipamento, de maneira prática, em quantidade e preferencialmente pequena e leve, figura (19).

Figura 19 - Aplicação de CaC nas forças armadas



Fonte: <https://fuelcellworks.com/knowledge/applications/portable/>

Dentre todas as aplicações em que as mais variadas células estão sendo introduzidas, grande parte dos estudos que abordam a utilização das mesmas, trazem as células em algum tipo de projeto híbrido dependente de outros processos e equipamentos, procurando aumentar a eficiência do sistema com os benefícios de cada processo combinado como nos estudos comentados a seguir.

Nesses casos de geração estacionária, ainda pode-se ver diversos sistemas híbridos que ainda aproveitam a geração de calor pela célula além da energia, de forma a aumentar ainda mais a já alta eficiência do sistema provida pela célula a combustível.

No estudo realizado por YANG & ZHAO (2019) sobre performance termodinâmica do sistema de energia SOFC-STIG (Solid Oxide Fuel Cell/ Célula a Combustível de Óxido Sólido - Steam-Injected Gas Turbine/Turbina a Gás com Injeção de Vapor) abastecido com GNL (Liquefied natural gas/gás natural liquefeito) com recuperação de dióxido de carbono, fala a respeito da implementação desse sistema “híbrido” como um tópico significativo no campo da tecnologia de energia. Nesse novo sistema, o GNL não somente fornece energia fria, mas o mesmo também esfria o ar que entra no compressor, reduzindo o consumo do mesmo e ainda recupera o dióxido de carbono. As simulações desenvolvidas usando a equação de estado de Peng-Robinson em regime estacionário, trouxeram resultados que as eficiências térmica e de potência do

sistema de distribuição de energia são 72,77% e 57,08% enquanto a eficiência exergética gira em torno de 61,9%.

Nele, é também indicado a melhoria da eficiência no sistema como um todo na implementação de um sistema com diversos propósitos para o mesmo equipamento, independente da análise da eficiência energética e exergética da célula de acordo com as condições de aplicação do stack de células, formado por 11512 células com um total de 960,1 m<sup>2</sup> de área do stack, em que as reações ocorrem.

Por fim, após a simulação são extraídas as eficiências, e ao mesmo tempo buscando melhorar a performance do ponto principal do sistema SOFC-STIG, através do estudo das condições e características do sistema e das células, é necessária uma análise mais crítica e aprofundada a respeito dessas variáveis como fluxo de combustível, frequência de injeção de vapor e os fatores de utilização dos combustíveis, Yang & Zhao (2019).

Já no artigo de Hosseini (2013), a aplicação através de uma CHP remota, em que o sistema conta com um gerador solar de energia combinado com um conjunto de SOFCs para suprir a necessidade energética da residência.

No decorrer do dia, o gerador solar pode produzir energia além da demanda, com isso, esse excesso de energia é utilizado para a produção de hidrogênio através da eletrólise de água, e esse hidrogênio é armazenado em tanques, Hosseini (2013).

As células então são alimentadas pelo hidrogênio produzido para os momentos de não geração solar, e as mesmas estão implantadas em uma unidade de recuperação térmica, que fornece energia térmica para a residência melhorando a utilização de energia, que consiste em um gerador de vapor de recuperação de calor e um resfriador de absorção utilizando a energia térmica do gás de combustão da SOFC para fins de aquecimento e resfriamento, Hosseini (2013).

Com isso, para o sistema apresentado por Hosseini (2013), o sistema de cogeração residencial é avaliado com base em energia e exergia, onde o mesmo traz que a SOFC atende a demanda de energia da casa durante a indisponibilidade de energia solar e que as eficiências máximas de energia e exergia do sistema solar é de 17% e 18,3%, enquanto a eficiência total do sistema de cogeração com a célula a combustível está relacionada com o padrão de demanda de energia e a disponibilidade solar.

### 3. Modelagem Matemática

A modelagem matemática consiste em uma das etapas do nosso caso de otimização da célula a combustível, a partir do equacionamento obtido através do levantamento da literatura dos modelos, inserindo as informações das perdas na tabela de levantamento da literatura que está no Apêndice A, com o objetivo de verificar as configurações que serão implementadas nas células a fim de obter os resultados desejados, de forma a poder simular os mesmos sem necessidade de uma análise experimental no início do projeto, evitando custos desnecessários.

Essa etapa nos permite testar diversos modelos, conhecer o comportamento da célula, entender o impacto de cada variação no desempenho do sistema e como as perdas afetam o desempenho do sistema.

De acordo com Dincer (2007), muitos entendem a voltagem da célula como dois tipos, a voltagem reversível e a voltagem de operação, em que a voltagem final é a subtração de uma pela outra. A primeira consiste na máxima voltagem que a célula pode produzir, e é calculada através das mais variadas formas da equação de Nernst (11), que é uma função da temperatura ambiente, pressão do sistema e as pressões parciais do combustível e do oxidante.

$$E_{Nernst} = E_{rev}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{1/2}}{P_{H_2O}} \right] \quad (11)$$

É possível observar que todos os modelos fazem uso da equação de Nernst, desenvolvida de formas diferentes, mas neste caso traz a relação da voltagem reversível ( $E_{rev}^0$ ), a constante dos gases ( $R$ ), a constante de Faraday ( $F$ ) e as pressões parciais do hidrogênio ( $P_{H_2}$ ), oxigênio ( $P_{O_2}$ ) e da água ( $P_{H_2O}$ ), enquanto as perdas de polarização possuem algumas variações nas equações utilizadas para obter os resultados, gerando diversos caminhos diferentes de equacionamento.

Já a voltagem de operação consiste no motivo da queda de voltagem a respeito da densidade de corrente, que é justificada pelas perdas de polarização, que ocorrem na célula durante o processo. De acordo com Barbir e Frano (2013), existem três tipos de perdas. A perda por ativação está relacionada com a densidade de corrente gerada pela diferença de voltagem necessária para que a reação eletroquímica ocorra, e é associada a cinética de eletrodos lenta. A segunda é a perda ôhmica, que é relacionada à resistência do fluxo dos íons pelo

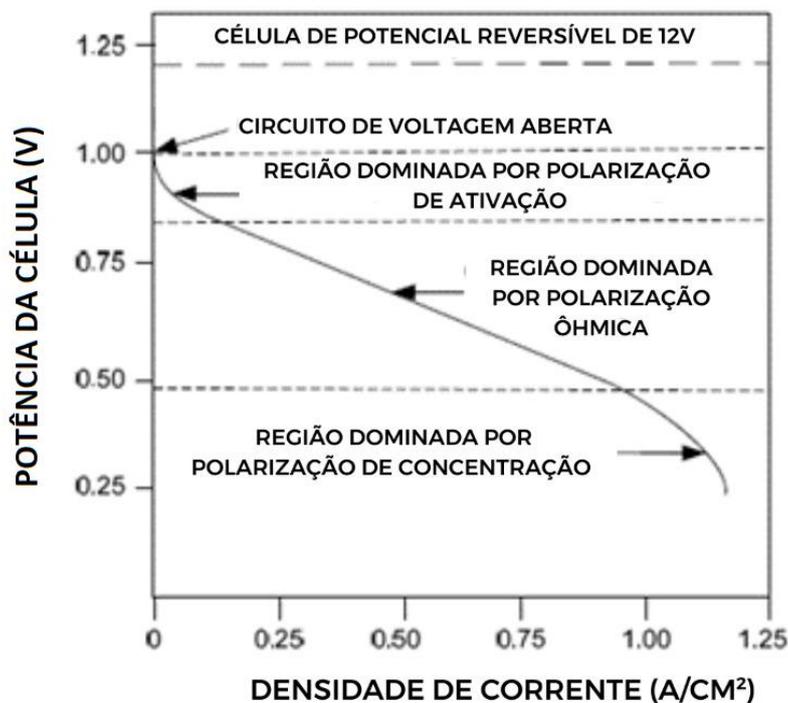
eletrólito e dos elétrons pelos componentes condutores da célula. Por fim, tem-se a perda por concentração, que se relaciona com a velocidade que um reagente é consumido pela reação eletroquímica, em que o reagente de concentração no catalisador é consumido na mesma velocidade que atinge a superfície. Sendo assim temos a voltagem de operação de acordo com a equação (12) apresentada por Abdin (2016).

$$E = E_{Nernst} - E_{ativ} - E_{con} - E_{ohm} \quad (12)$$

Nela, pode-se ver a representação da equação de Nernst ( $E_{Nernst}$ ) (11) sendo subtraído pelas perdas de polarização, perdas de ativação ( $E_{ativ}$ ), perdas de concentração ( $E_{con}$ ) e perdas ôhmicas ( $E_{ohm}$ ), obtendo a voltagem de operação da célula.

Com esse entendimento, é possível então relacionar a potência da célula à combustível e a curva de polarização, já que a potência está diretamente relacionada à voltagem e a densidade da corrente e a curva de polarização com as perdas, como representado na curva a seguir (Figura 20).

Figura 20 - Curva de Polarização



Fonte: Adaptado de SPIEGEL (2008)

A figura anterior (20) mostra como a voltagem da célula varia com a densidade de corrente mostrando então a forma característica da curva de polarização.

Após a obtenção da curva de polarização e conhecendo a área de troca da célula (**A**) e a densidade de corrente (**j**) pode-se obter a potência da célula através da equação a seguir (13).

$$W = E \cdot j \cdot A \quad (13)$$

Esse valor de potência é referente a uma única célula, sendo assim, para o sistema inteiro basta multiplicar pela quantidade de células no sistema.

Com o intuito de obter a eficiência apresentada pelo modelo da célula, podemos a partir do valor da potência (**W**), calcular a mesma através da relação da potência com o fluxo de combustível ( **$\dot{m}$** ) consumido na célula, no caso desse estudo foi considerado somente o hidrogênio puro, e o poder calorífico inferior (**PCI**) pela equação a seguir (14).

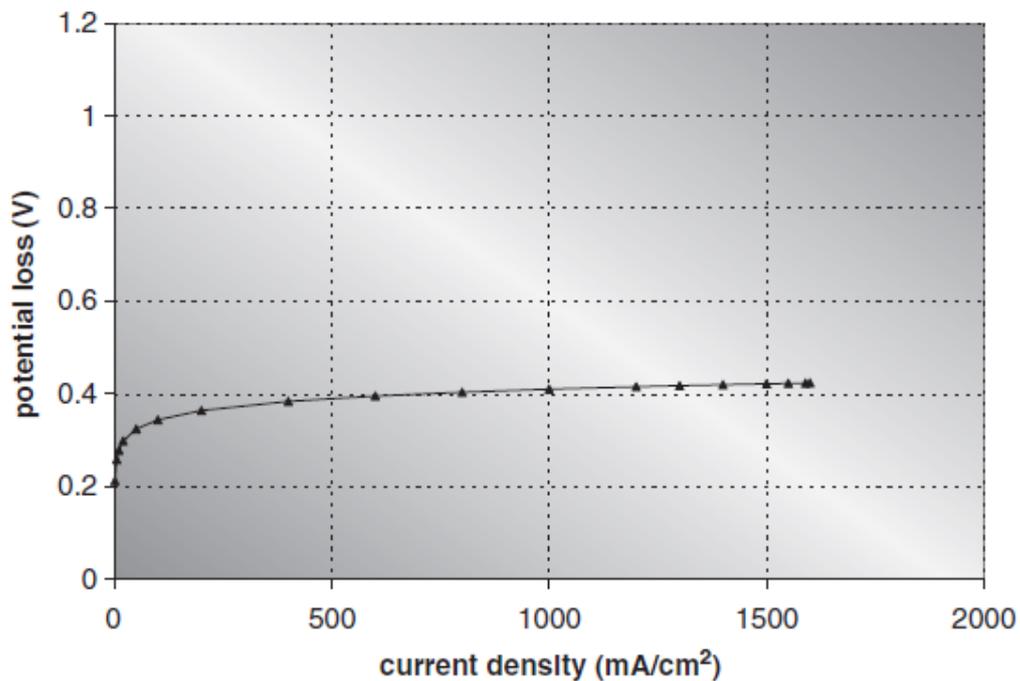
$$\eta = \frac{P}{\dot{m} \cdot PCI} \quad (14)$$

### 3.1. Perdas de Ativação

Para a reação eletroquímica dar início, é necessária uma diferença de potencial no equilíbrio gerando uma corrente, essa partida é conhecida como polarização por ativação, que é relacionada a cinética de eletrodos lenta. Quanto maior a densidade da corrente trocada, menor será a perda pela polarização de ativação (BARBIR, 2013).

As perdas ocorrem tanto no catodo como no anodo, mas como no caso das PEMFC, a redução do oxigênio necessita de um potencial muito maior, com isso, é uma reação muito mais lenta que a oxidação do hidrogênio (BARBIR, 2013). Sendo assim a polarização de ativação da reação de oxidação é muito menor que a da reação de redução do oxigênio.

Figura 21 - Variação da perda de ativação em função da densidade de corrente



Fonte: BARBIR, 2013

Pode-se notar que por definição, na eletroquímica o potencial reverso da reação de oxidação do hidrogênio é zero para todas as temperaturas. Por isso o eletrodo de hidrogênio padrão é usado como eletrodo de referência (BARBIR, 2013).

Tem-se as demais formulações que descrevem o cálculo da perda de ativação.

A equações a seguir (15 e 16) representam como a perda é expressada por Trindade (2020) na modelagem de uma PEMFC, expressa a partir da equação de Butler-Volmer, relacionando a densidade de corrente atual da célula, a temperatura de operação, as densidades de corrente em cada um dos eletrodos juntamente com os coeficientes de troca de carga de cada um.

$$E_{ativ} = \frac{RT}{\alpha_a F n} \ln\left(\frac{j}{j_{0,a}}\right) + \frac{RT}{\alpha_c F n} \ln\left(\frac{j}{j_{0,c}}\right) = A_a \ln\left(\frac{j}{j_{0,a}}\right) + A_c \ln\left(\frac{j}{j_{0,a}}\right) \quad (15)$$

Como para Trindade (2020) a densidade da corrente de troca no anodo é muito maior que no catodo e devido a isso o potencial de ativação no anodo é muito menor que no catodo podemos simplificar a equação (15) desconsiderando a parte do anodo e trabalhar direto com a equação a seguir (16).

$$E_{ativ} = \frac{RT}{\alpha F n} \ln\left(\frac{j}{j_0}\right) \quad (16)$$

Assim como em Azizi (2018) um modelo que se refere a uma SOFC, apenas o coeficiente de troca ( $\alpha_c$ ) e a densidade de corrente ( $j_{0,c}$ ) do catodo são levados em consideração para obter a perda de ativação, por ele expressa a partir da equação de Tafel.

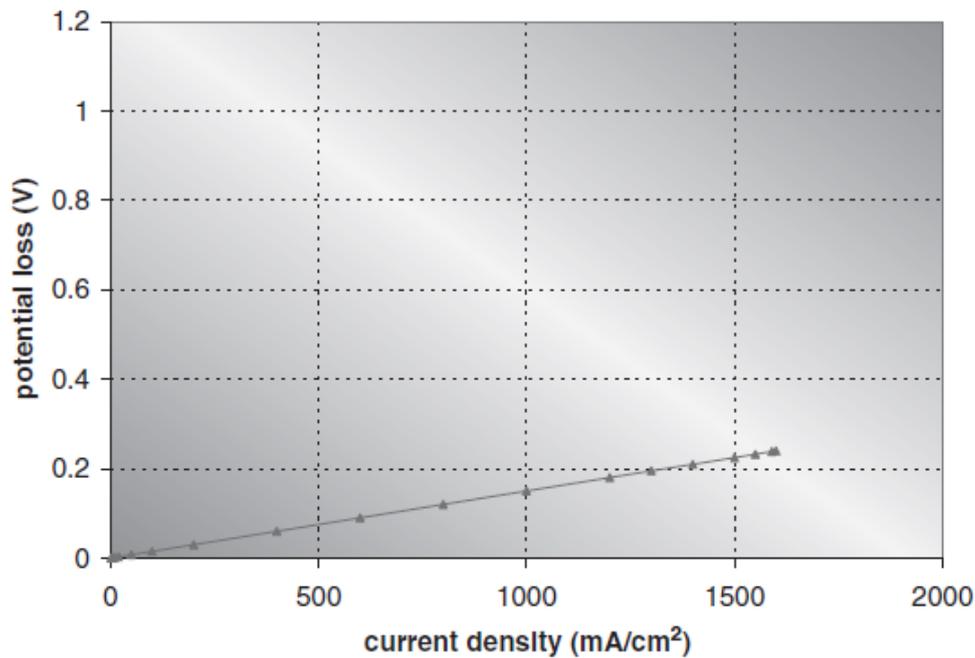
Em um outro modelo de PEMFC apresentado por Sharaf (2014), a equação principal de referência é a mesma (15), porém, para ele a equação era simplificada com uma constante de ativação para os eletrodos ( $A_{a/c}$ ).

Com isso para Sharaf (2014) a equação considerada é a segunda parte da equação (15).

### 3.2. Perdas Ôhmicas

A perda ôhmica surge da resistência do fluxo de íons no eletrólito e da resistência do fluxo de elétrons através do circuito elétrico condutor da célula. A mesma pode ser representada através da Lei de Ohm, em que a variação vai consistir no produto da densidade da corrente com a resistência total interna da célula, considerando iônica, elétrica e de contato. A resistência elétrica geralmente tem valor quase insignificante, independente do componente usado no eletrólito, já as resistências iônicas e de contato tem a mesma ordem de magnitude. Com isso, a resistência da célula varia entre 0,1 e 0,2  $\Omega/\text{cm}^2$  (BARBIR, 2013).

Figura 22 - Variação da perda ôhmica em função da densidade de corrente



Fonte: BARBIR, 2013

A performance da célula a combustível aumentará se a resistência da mesma diminuir, e a resistência varia com a área, então é válido ao estudar perdas ôhmicas considerar uma comparação entre a resistência pelas áreas com a corrente utilizada (SPIEGEL, 2008).

A condução do elétron livre da reação, se difere pelo material onde está acontecendo, no caso de um material metálico os elétrons, eles transitam livremente por entre as moléculas metálicas enquanto na iônica a condição é condicional de moléculas com disponibilidade de conexão com o mesmo. Como é visto na representação das seguintes imagens (Figura 23 e 24) (SPIEGEL, 2008).

Figura 23 - Transporte de elétrons no metal

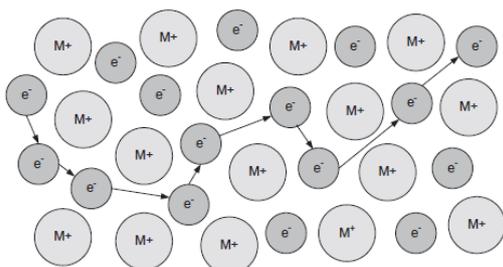


FIGURE 4-1. Electron transport in a metal.

Fonte: Spiegel, 2008

Figura 24 - Transporte iônico em uma membrana polimérica

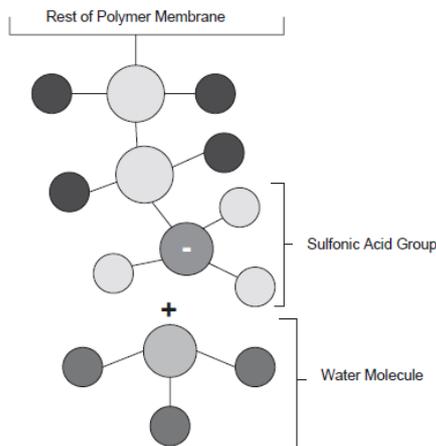


FIGURE 4-2. Ionic transport in a polymer membrane.

Fonte: Spiegel, 2008

Sendo assim, uma das melhores formas para se melhorar a perda ôhmica seria ou um condutor iônico melhor para a camada do eletrólito ou uma camada mais fina do eletrólito (SPIEGEL, 2008).

De acordo com os estudos, a perda ôhmica pode ser calculada através de algumas formulações, onde a densidade de corrente e a resistência das partes da célula são frequentemente utilizadas.

Um modelo de equacionamento das perdas ôhmicas é o seguinte (19), segundo Trindade (2020).

$$E_{ohm} = I \cdot (RM + RC) \quad (19)$$

Neste, a perda é calculada a partir da relação da corrente ( $I$ ) com as resistências do conjunto de eletrodos e do Eletrólito (membrana) ( $RC$  e  $RM$ ).

$$RM = \frac{\rho M \cdot l}{A} \quad (20)$$

A resistência da membrana (20) está em função da resistividade específica ( $\rho M$ ) da membrana para o fluxo de elétrons com a espessura da membrana ( $l$ ) e a área de troca da membrana ( $A$ ).

$$\rho M = \frac{181,6 \cdot \left[ 0,03 \cdot (I/A) + 0,062 \cdot (T/303)^2 \cdot (I/A)^{2,5} \right]}{\varphi - 0,634 - 3 \cdot (I/A) \cdot e^{4,18 \cdot (T-303)/T}} \quad (21)$$

Enquanto isso a resistividade específica ( $\rho M$ ) da membrana para o fluxo de elétrons é calculada com a fórmula (21) que relaciona a corrente, a área da membrana, onde a divisão da corrente ( $I$ ) pela área ( $A$ ) representa a densidade de corrente ( $j$ ) com a temperatura de atuação e um parâmetro ajustável ( $\varphi$ ). Já a resistência do conjunto de eletrodos ( $RC$ ) depende do material dos eletrodos usados na célula.

Outro modelo é o utilizado por Sharaf (2014) em que a perda é obtida através da equação (22), em que relaciona a densidade de corrente com as resistências iônicas, eletrônicas e de contato da área específica.

$$E_{ohm} = (R_{ion} + R_{ele} + R_{CR}) \cdot j \quad (22)$$

Com isso vemos dois modelos para um mesmo tipo de célula que variam sua complexidade em que um modelo é voltado para a membrana e um mais simplificado com relação as resistências da célula.

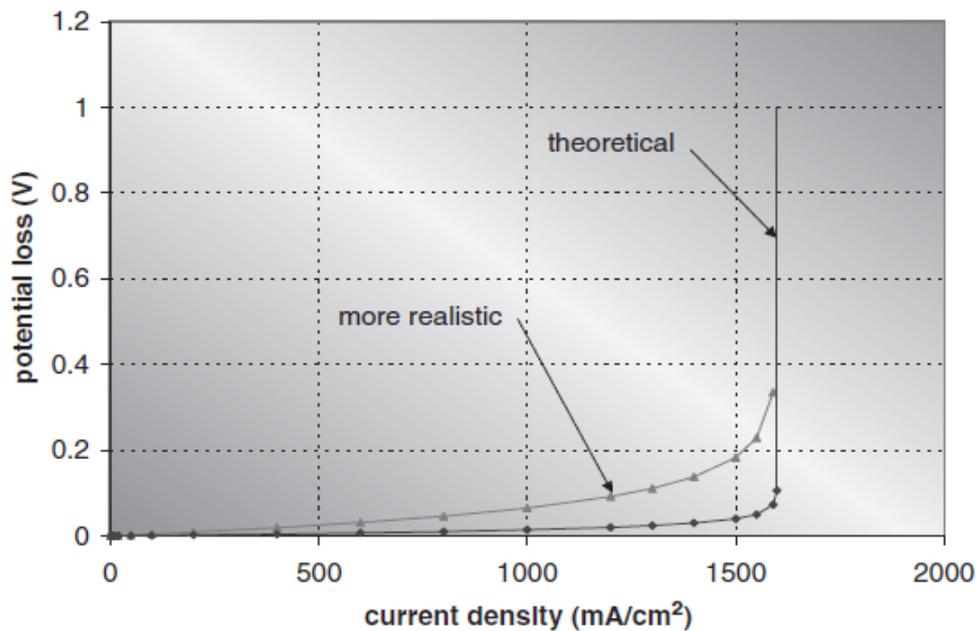
Já no modelo apresentado por Azizi (2018) para uma SOFC, vemos uma modelagem que traz a resistividade de cada componente, são eles o anodo, eletrólito, catodo e interconectores, do percurso da troca na célula, as espessuras dos respectivos componentes e a densidade de corrente (23).

$$E_{ohm} = (\rho_a \cdot l_a + \rho_e \cdot l_e + \rho_c \cdot l_c + \rho_i \cdot l_i) \cdot j \quad (23)$$

### 3.3. Perdas de Concentração

As perdas por concentração são associadas às limitações de transferência de massa em maiores densidades de corrente, pelos potenciais no catodo e no anodo (DINCER & ROSEN, 2013). A polarização por concentração ocorre quando o reagente é rapidamente consumido no eletrodo pela reação eletroquímica e com isso os gradientes são estabelecidos (BARBIR, 2013).

Figura 25 - Variação da perda de concentração em função da densidade de corrente



Fonte: BARBIR, 2013

O reagente de concentração na superfície do catalisador depende da densidade de corrente. Maior a densidade de corrente, menor a concentração da superfície, com isso a concentração da superfície chega a zero quando a taxa de consumo chega a mesma que a taxa de difusão (BARBIR, 2013). Basicamente, o reagente é consumido a mesma taxa que chega na superfície, com isso a concentração do reagente e a superfície do catalisador são iguais a zero. A densidade de corrente em que isso ocorre é conhecida como densidade de corrente limite, pois a célula não pode produzir mais que o seu limite de reagente na superfície do catalisador (BARBIR, 2013).

De acordo com os estudos, a perda de concentração pode ser calculada através de algumas formulações, onde a densidade de corrente e a resistência das partes da célula são frequentemente utilizadas.

Segundo Trindade (2020), as perdas por concentração são perdas de transporte de massa, resultado da variação de concentração efetiva dos gases da superfície de reação, por isso são associadas a área do eletrodo que não é porosa de forma uniforme e a densidade de corrente que também não é uniforme. Portanto, a equação (24) representa a forma de cálculo da perda de tensão por concentração, com a densidade de corrente atual da CaC ( $j$ ) e a densidade de corrente limite ( $j_{lim}$ ) para início da queda da tensão terminal da célula (TRINDADE, 2020).

$$E_{conc} = -\frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{lim}}\right) \quad (24)$$

Já para Azizi (AZIZI, 2018), a equação a seguir (25), mostra a perda por concentração causada pela resistência do transporte de massa, mas pelos eletrodos e pela interface.

$$E_{conc} = E_{conc}^a + E_{conc}^c$$

$$= \left[ -\frac{R \cdot T_z}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{as}}\right) + \frac{R \cdot T_z}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(1 + \frac{P_{f4}^{H_2} \cdot j}{P_{f4}^{H_2O} \cdot j_{as}}\right) \right] + \left[ -\frac{R \cdot T_z}{4 \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{cs}}\right) \right] \quad (25)$$

Na equação, podemos ver a relação da densidade de corrente da célula, com as pressões parciais do hidrogênio e da água e com as densidades de corrente limites do anodo e do catodo ( $j_{as}$  e  $j_{cs}$ ) calculadas a partir das equações (26 e 27), que utiliza as pressões parciais dos reagentes ( $P_{f4}^{H_2}$  e  $P_{a2}^{O_2}$ ), as difusividades efetivas dos gases pelos eletrodos ( $D_{aeff}$  e  $D_{ceff}$ ) e a espessura do mesmo.

$$j_{as} = \frac{2 \cdot F \cdot P_{f4}^{H_2} \cdot D_{aeff}}{R \cdot T_z \cdot l_a} \quad (26)$$

$$j_{cs} = \frac{4 \cdot F \cdot P_{a2}^{O_2} \cdot D_{ceff}}{(P - P_{a2}^{O_2}/P) R \cdot T_z \cdot l_c} \quad (27)$$

Já para Sharaf (2014), assim como na perda de ativação modelada para a PEMFC, a equação da perda de concentração tem as suas equações principais como uma adaptação da equação (24), representada com as duas equações para cada um dos eletrodos (28 e 29).

$$E_{c,a} = -\frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{lim,a}}\right) = -B_a \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{lim,a}}\right) \quad (28)$$

$$E_{c,c} = -\frac{R \cdot T}{4 \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{lim,c}}\right) = -B_c \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{lim,c}}\right) \quad (29)$$

A partir dessas equações (28 e 29) e através da constante ( $B$ ) representada como a segunda parte das equações temos uma equação para a perda de concentração simplificada.

## 4. Metodologia

O estudo iniciou com um levantamento da literatura dos equacionamentos apresentados nos mais variados artigos, relatórios e pesquisas sobre células a combustível ou com alguma relação com as mesmas através de algum sistema híbrido.

Para organizar esse levantamento foi utilizado uma planilha do Excel e um Power Point para armazenar e estruturar os dados fornecidos pelos artigos de forma organizada com o intuito de uma melhor visualização dos padrões de comportamento da modelagem por conta do equacionamento.

Esse levantamento tinha como objetivo identificar qual a frequência dos diferentes modelos dentre os diversos artigos analisados no estudo, além de mostrar quais os modelos eram os mais indicados para as futuras etapas de análises do estudo, indicando quais apresentavam as informações detalhadas do modelo.

Dentre os artigos considerados no estudo, mais de 50% não definia a modelagem da célula, pois tratava de uma citação ou alguma definição superficial da célula, dos restantes ainda foram extraídas informações do modelo da célula utilizada para o Excel, visto que o estudo é especificamente em cima da PEMFC e da SOFC, os quais são modelo da célula, autor e ano de publicação do artigo, com o intuito de melhor identificação futura, se o artigo apresentou a potência fornecida pela célula, se o artigo possui curvas experimentais, dados experimentais, como os parâmetros de entrada, e qual a modelagem oferecida.

Para uma melhor identificação de qual a modelagem apresentada por cada artigo, no Power Point foi montada uma “base de dados” com os equacionamentos para a equação de Nernst e para cada uma das perdas em modelos principais unitários e aqueles subdivididos entre os componentes da célula, numerados por classificação para facilitar visualização de quais as equações já foram apresentadas, e nesta mesma “base de dados” foram descritos os termos utilizados em cada artigo, visto que em muitos modelos os termos são definidos por abreviaturas diferentes.

O levantamento permitiu também o reconhecimento da quantidade de artigos mal definidos e com informações não desenvolvidas ou faltantes, que impactou na dificuldade para obter modelos completos, entre equacionamentos e parâmetros confiáveis, para prosseguir com o estudo em cima da análise das sensibilidades, o levantamento se encontra disponível no Anexo A.

Com isso, a partir do levantamento da literatura a respeito dos mais variados modelos de equacionamento de células a combustível, entre PEMFC e SOFC, foram escolhidos para essa análise três artigos, por Trindade (2020), Sharaf (2014) e Azizi (2018), que estão melhor estruturados, desenvolvidos e coesos com as informações e resultados apresentados.

Cada artigo cita como seu modelo foi desenvolvido com as equações de Nerst e de perdas por ativação, ôhmica e de concentração, além dos parâmetros de entrada, retornando as curvas de polarização, perdas e de potência. Através dessas curvas, foram obtidos os pontos das curvas modelo que serão utilizadas para a validação.

Os parâmetros obtidos a partir dos artigos selecionados para o estudo estão apresentados nas tabelas (3, 4 e 5) a seguir.

Tabela 3 - Parâmetros de entrada no modelo de Trindade

<b>Parâmetros</b>	<b>Variável</b>		<b>Unidade</b>
Temperatura	<b>T</b>	343,15	K
Constante universal dos gases nobres	<b>R</b>	8,314	J/mol.K
Constante de Faraday	<b>F</b>	96485	C/mol
Número de elétrons	<b>n</b>	2	-
Coefficiente de Transferência de carga	<b><math>\alpha</math></b>	0,5	-
Corrente de troca	<b>j_o</b>	$5 \cdot 10^{-4}$	A/cm <sup>2</sup>
Área da célula	<b>A</b>	50,6	cm <sup>2</sup>
Espessura da Membrana	<b>l</b>	0,0178	cm
Coefficiente da membrana	<b><math>\varphi</math></b>	23	-
Resistencia do conjunto de eletrodos	<b>Rc</b>	0,0003	ohm
Densidade de corrente limite	<b>j_lim</b>	1,6	A/cm <sup>2</sup>
Pressão parcial do Oxigênio	<b>p_o2</b>	0,21	atm
Pressão parcial do Hidrogênio	<b>p_h2</b>	1,5	atm

Fonte: TRINDADE, 2020.

Tabela 4 - Parâmetros de entrada no modelo de Sharaf

<b>Parâmetros</b>	<b>Variável</b>		<b>Unidade</b>
Temperatura	<b>T</b>	353	K
Constante universal dos gases nobres	<b>R</b>	8,314	J/mol.K
Constante de Faraday	<b>F</b>	96485	C/mol
Número de elétrons	<b>n</b>	2	-
Corrente de troca no anodo	<b>j_o_a</b>	0,15	A/cm <sup>2</sup>
Corrente de troca no catodo	<b>j_o_c</b>	$1,5 \cdot 10^{-4}$	A/cm <sup>2</sup>

Área da célula	<b>A</b>	50,6 cm <sup>2</sup>
Espessura da Membrana	<b>L</b>	0,0254 cm
Resistencia do conjunto de eletrodos	<b>Rele</b>	0 ohm.cm <sup>2</sup>
Resistencia do conjunto de eletrodos	<b>Rion</b>	0,1 ohm.cm <sup>2</sup>
Resistencia do conjunto de eletrodos	<b>Rcr</b>	0,03 ohm.cm <sup>2</sup>
Corrente máxima no anodo	<b>j_o_a</b>	15 A/cm <sup>2</sup>
Corrente máxima no catodo	<b>j_o_c</b>	2,5 A/cm <sup>2</sup>
Constante de ativação do anodo	<b>Aa</b>	0,0304 -
Constante de ativação do catodo	<b>Ac</b>	0,0507 -
Constante empirica do anodo	<b>Ba</b>	0,045 V
Constante empirica do catodo	<b>Bc</b>	0,045 V
Pressão parcial do Oxigênio	<b>p_o2</b>	0,21 atm
Pressão parcial do Hidrogênio	<b>p_h2</b>	1 atm

Fonte: SHARAF, 2014.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada no modelo de Azizi

<b>Parâmetros</b>	<b>Variável</b>	<b>Unidade</b>
Temperatura	<b>T</b>	353 K
Constante universal dos gases nobres	<b>R</b>	8,314 J/mol.K
Constante de Faraday	<b>F</b>	96485 C/mol
Número de elétrons	<b>n</b>	2 -
Coeficiente de Transferência de carga do anodo	<b>α_c</b>	0,5 -
Corrente de troca no catodo	<b>j_c</b>	9,80E-04 A/cm <sup>2</sup>
Área da célula	<b>A</b>	100 cm <sup>2</sup>
Espessura do anodo	<b>la</b>	0,0001 m
Espessura do eletrólito	<b>le</b>	0,0001 m
Espessura do catodo	<b>lc</b>	0,0019 m
Espessura dos interconectores	<b>li</b>	0,00004 m
Resistividade do anodo	<b>pa</b>	3,30E-05 ohm.m
Resistividade do eletrólito	<b>pe</b>	0,44 ohm.m
Resistividade do catodo	<b>pc</b>	7,80E-05 ohm.m
Resistividade dos interconectores	<b>pi</b>	3,20E-03 ohm.m
Corrente limítrofe no catodo	<b>j_lim_c</b>	0,9 A/cm <sup>2</sup>

Fonte: AZIZI, 2018.

Através do equacionamento proposto em cada artigo, foi possível o desenvolvimento de um simulador através do software matemático Matlab, que possibilita o estudo dos modelos a partir da variação dos parâmetros com o intuito de obter a sensibilidade do modelo. Os códigos necessários para os simuladores estão no Anexo B.

A partir dos simuladores, para obter a validação dos mesmos, foram plotadas as curvas resultantes do trabalho de simulação a partir dos parâmetros apresentados dos artigos e seus equacionamentos juntamente com os pontos

obtidos pelas curvas apresentadas nos mesmos artigos, pontos obtidos através do software Pega Ponto 1.0 desenvolvido pelo professor Luiz Antônio Farani de Souza pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Com os simuladores validados, é possível começar as simulações variando os parâmetros de entrada e coletando os resultados de saída. Para a análise de sensibilidade será coletado os valores de saída da potência máxima, da tensão para potência máxima e da densidade de corrente para potência máxima a partir de uma variação de mais ou menos 20% dos valores dos parâmetros da literatura.

A escolha dos parâmetros para serem variados foi focada naqueles que não facilmente mensuráveis, os que foram obtidos através de equações secundárias não desenvolvidas no mesmo artigo, aqueles que apresentavam valores incoerentes ou estavam mal identificados no artigo, foram considerados como conhecidos e fixos as temperaturas de operação da célula, temperaturas do combustível e do oxidante, as constantes de Faraday e dos Gases, número de elétrons soltos por reação química, as dimensões dos componente , dentre as áreas e espessuras e as pressões de entrada e saída.

Com o auxílio de uma planilha no Excel, foi possível montar uma tabela para cada saída em função dos parâmetros e das variações de mais ou menos 20% e da literatura, com esses valores foi calculado a variação relativa das saídas a partir dos valores obtidos com os parâmetros da literatura, visando comparar os diferentes modelos independentemente de valores absolutos das saídas. Foi plotado um diagrama de tipo spider com as variações relativas as saídas. A partir dos diagramas, será possível comparar os comportamentos dos dois modelos da PEMFC e das PEMFC com a SOFC, verificando a amplitude da variação, e os principais parâmetros que mostram impactar na sensibilidade da modelagem da célula. Com isso é pode-se obter uma melhor configuração para dadas condições de operação, e quais devem ser os parâmetros que irão demandar mais atenção e dedicação para os futuros estudos.

## 5. Resultados e Discussões

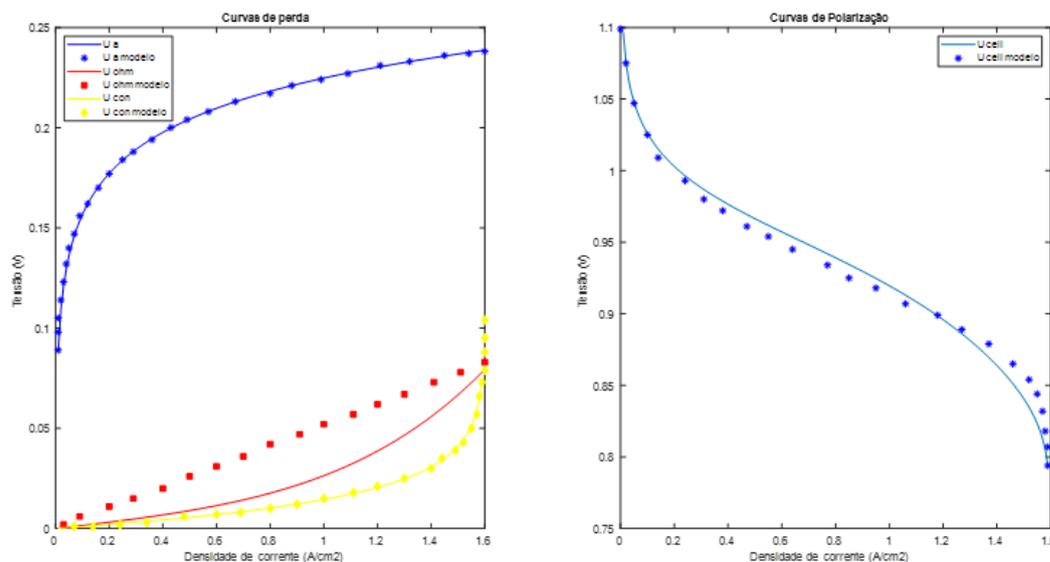
### 5.1. Validação

A curvas de perdas e a curva de polarização (Figura 26) obtidas com a modelagem do equacionamento proposto por Trindade (TRINDADE, 2020) em comparação com os pontos experimentais das curvas apresentadas pelo mesmo.

Os parâmetros de entrada para as curvas (Figura 26) são os descritos na tabela (3).

Para o desenvolvimento das curvas a seguir foram utilizadas as equações de Nernst (11), de ativação (16), ôhmica (19) e concentração (24).

Figura 26 - Curvas de perdas e de polarização por Trindade



Fonte: Autoria própria

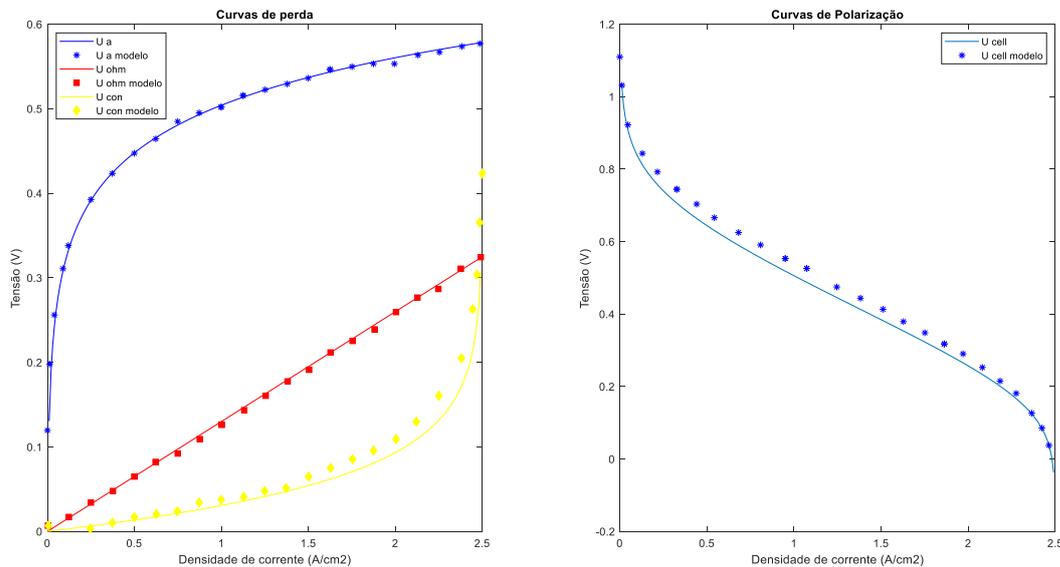
A partir dos modelos de Trindade (2020) implementados na simulação e dos dados experimentais obtidos, foi possível fazer essa validação confirmando a teoria do modelo apresentado, apesar de uma leve diferença na perda ôhmica que está com uma característica quadrática e deveria ter uma resposta linear, essa diferença que impacta na curva de polarização, visto que a aproximação das curvas é suficiente para validar o modelo.

A curvas de perdas e a curva de polarização (Figura 27) obtidas com a modelagem do equacionamento proposto por Sharaf (2014) em comparação com os pontos experimentais das curvas apresentadas pelo mesmo.

Os parâmetros de entrada para as curvas (Figura 27) são os descritos na tabela (4).

Para o desenvolvimento das curvas a seguir foram utilizadas as equações de Nernst (11), de ativação (18), ôhmica (22) e concentração (28 e 29).

Figura 27 - Curvas de perdas e de polarização por Sharaf



Fonte: Autoria própria

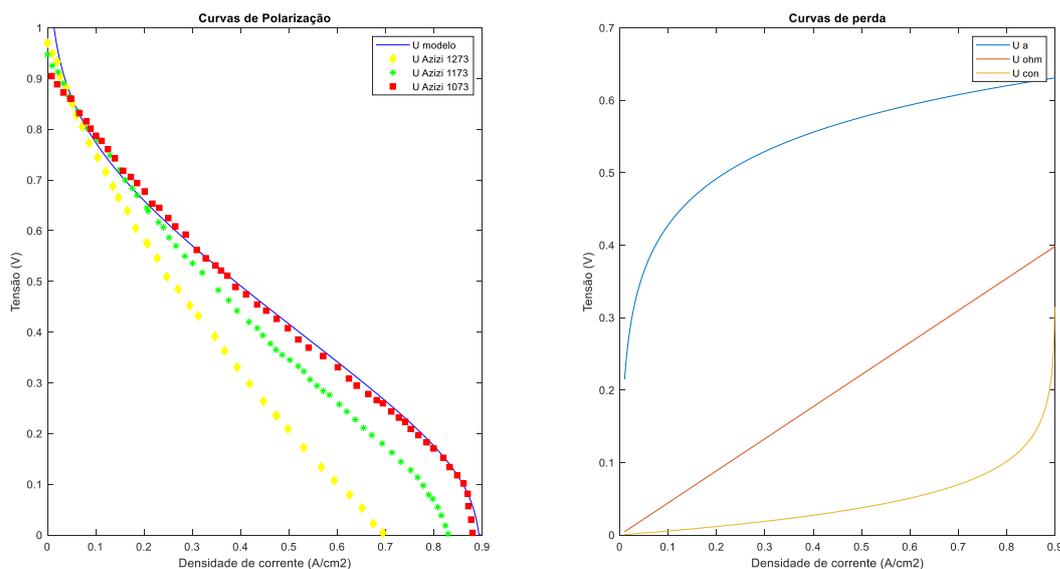
A partir dos modelos de Sharaf (2014) implementados na simulação e dos dados experimentais obtidos, foi possível fazer essa validação confirmando a teoria do modelo apresentado, apesar de uma leve diferença na perda de concentração que está com um valor um pouco a cima do esperado, tendo uma resposta mais rápida em relação ao modelo variando a densidade de corrente, essa diferença que impacta na curva de polarização, visto que a aproximação das curvas é suficiente para validar o modelo.

A curvas de perdas e a curva de polarização (Figura 28) obtidas com a modelagem do equacionamento proposto por Azizi (2018) em comparação com os pontos experimentais das curvas apresentadas pelo mesmo.

Os parâmetros de entrada para as curvas (Figura 28) são os descritos na tabela (5).

Para o desenvolvimento das curvas a seguir foram utilizadas as equações de Nernst (11), de ativação (16), ôhmica (23) e concentração (25).

Figura 28 - Curvas de perdas e de polarização por Azizi



Fonte: Autoria própria

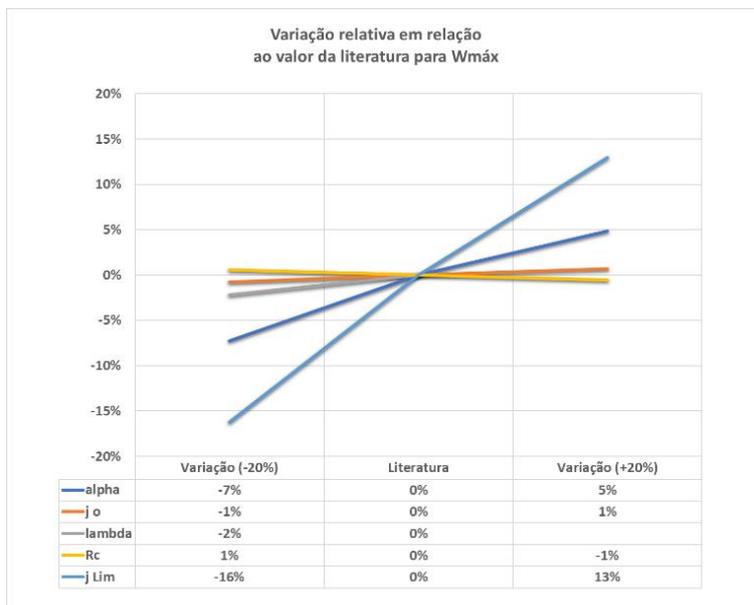
A partir dos modelos de Azizi (2018) implementados na simulação e dos dados experimentais obtidos, foi possível fazer essa validação confirmando a teoria do modelo apresentado, a partir da curva de polarização para a temperatura de 1073 K, visto que a aproximação das curvas é suficiente para validar o modelo.

## 5.2. Análise de sensibilidade

A partir dos modelos validados, foi possível então trabalhar com a variação de mais ou menos vinte por cento do valor dos parâmetros de entrada com o intuito de estudar e analisar a sensibilidade da modelagem observando os valores de saída de potência máxima, a tensão da célula e a densidade de corrente para essa potência máxima. Foram plotados diagramas do modelo spider com a variação relativa dos valores de saída da célula para cada alteração de parâmetros para cada um dos três modelos aqui analisados.

A partir das figuras (29, 30 e 31), é possível chegar a uma análise mais detalhada do quão sensível é a modelagem apresentada por Trindade (2020), definitivamente o modelo é mais sensível a variação do coeficiente de transferência de carga ( $\alpha$ ) e da corrente limite ( $j_{lim}$ ), com uma variação relativa de aproximadamente 30% e 10% respectivamente, impactando respectivamente as perdas de ativação e concentração.

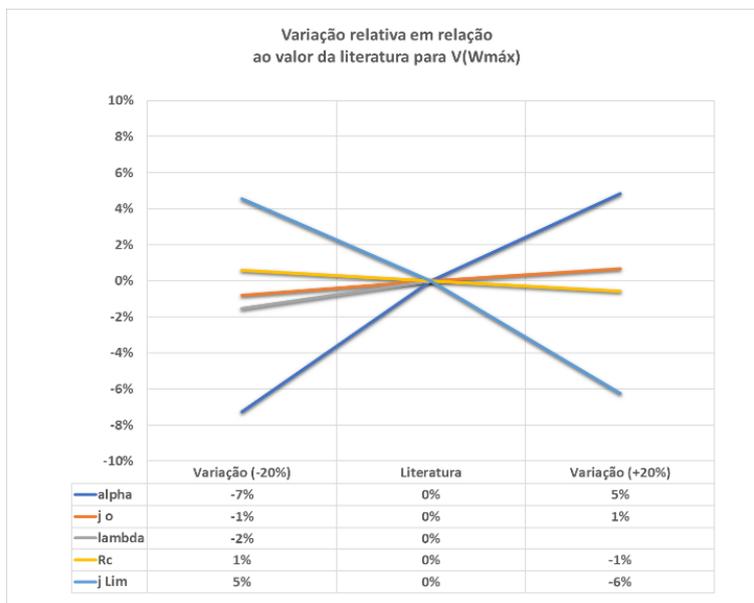
Figura 29 - Diagrama spider da variação relativa da potência máxima por Trindade (2020)



Fonte: Autoria própria

Ao analisar as saídas individualmente quando se trata da potência máxima na figura (29) podemos ver uma sensibilidade, principalmente com a corrente limite e o coeficiente de troca, à medida que eles aumentam, a potência aumenta.

Figura 30 - Diagrama spider da variação relativa da tensão por Trindade (2020)

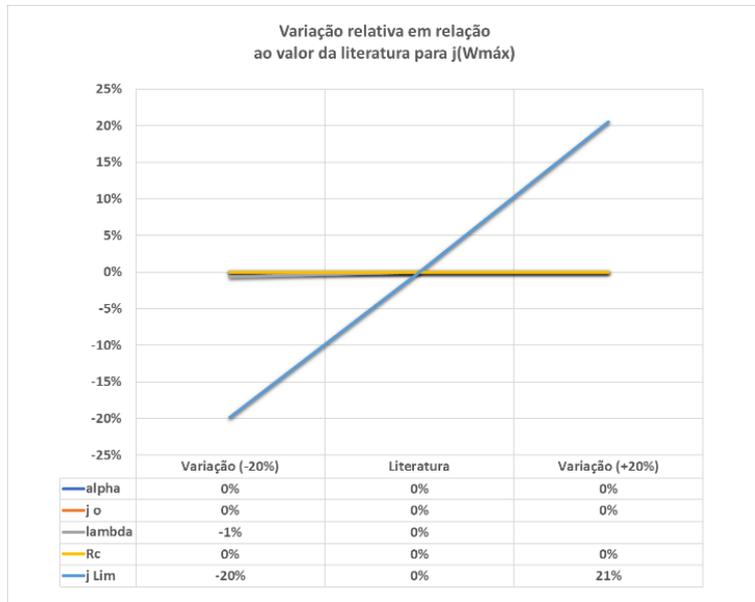


Fonte: Autoria própria

Já para a saída de tensão na figura (30) a relação com o coeficiente de transferência de carga ( $\alpha$ ) continua direta com uma variação de 10% enquanto a

relação com a corrente limite (**j\_lim**) agora é inversa, mas mantendo uma variação de 10%.

Figura 31 - Diagrama spider da variação relativa da densidade de corrente por Trindade

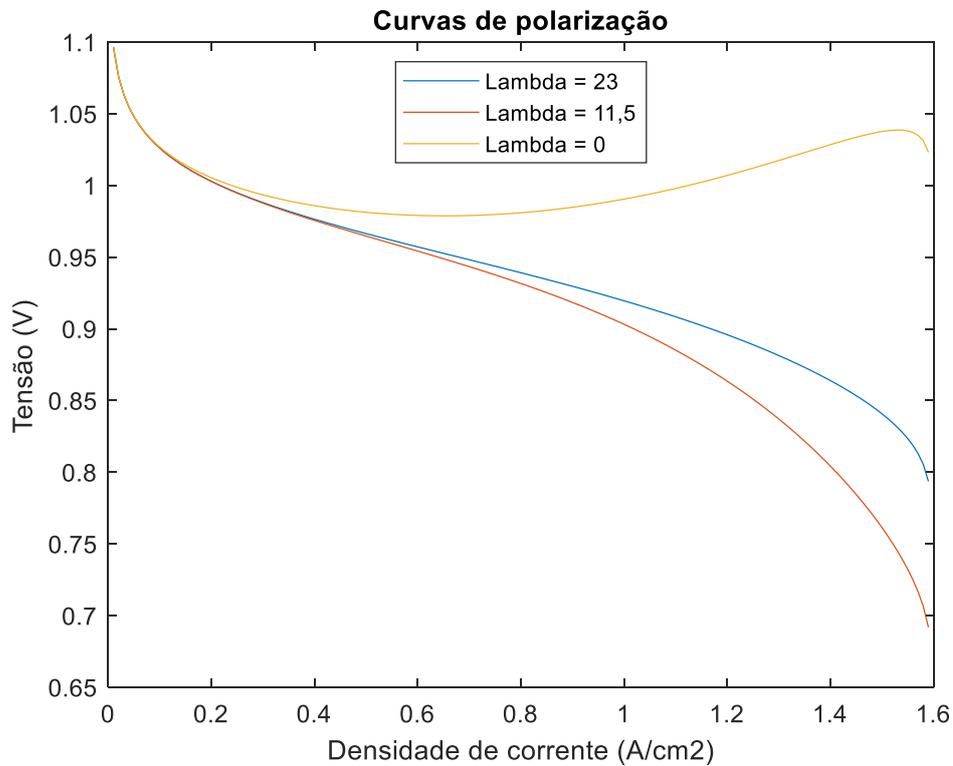


Fonte: Autoria própria

Para a densidade de corrente, o único parâmetro que mostra uma sensibilidade no modelo é a corrente limite (**j\_lim**) que mostra novamente uma relação direta a variação.

Um dos parâmetros analisados no modelo de Trindade (TRINDADE, 2020) é o lambda ( $\varphi$ ), um parâmetro ajustável influenciado pela preparação da membrana de valor máximo 23, como na literatura é utilizado o valor máximo para esse parâmetro, a possibilidade de análise seria variar para baixo o valor, mostrando que essa pequena variação não é tão significativa para a sensibilidade do modelo, a não ser que tenha uma variação maior a partir de 50% onde é possível ver uma variação nas saídas de potência máxima e tensão, nesse caso estava sendo considerado os valores limites do lambda para análise, é possível ver na figura (32) a seguir como o valor de lambda influencia na curva de polarização se considerarmos os valores de 0, 11.5 e 23 para sua variação.

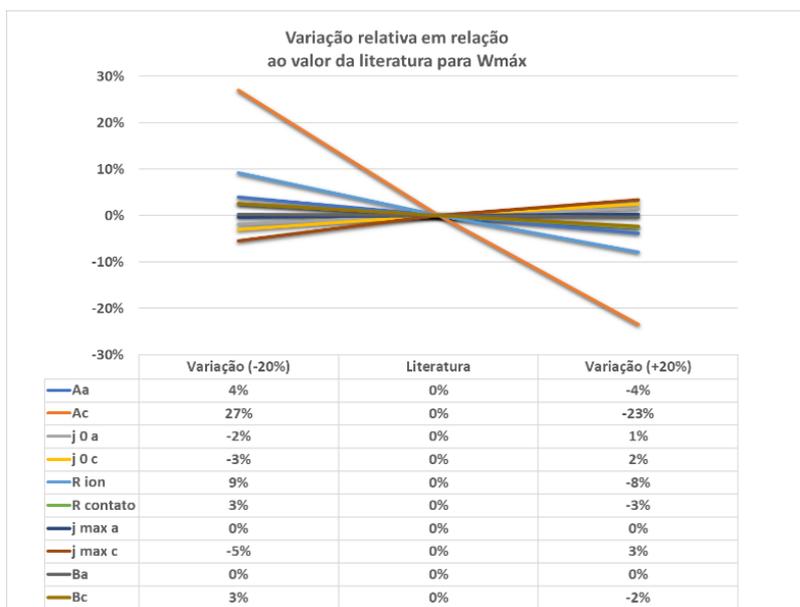
Figura 32 - Curvas de polarização para variação do Lambda



Fonte: Autoria própria

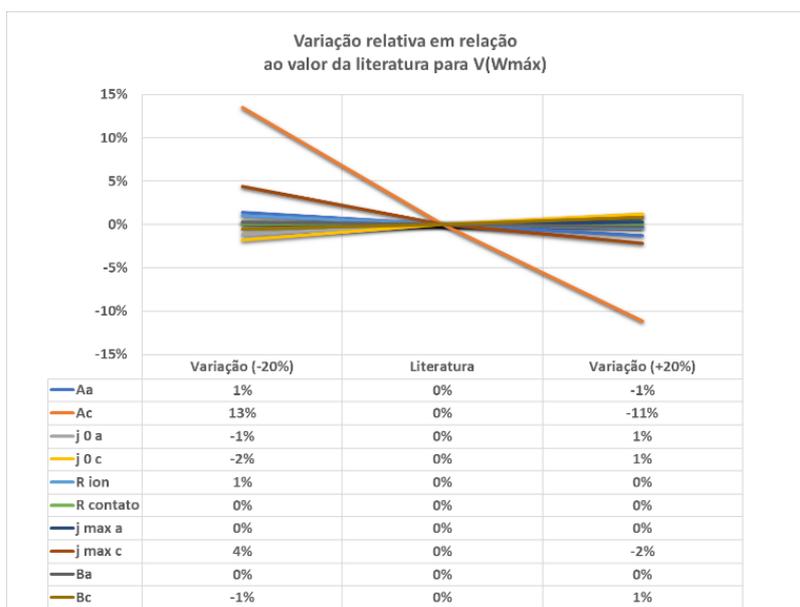
Ao tratar da modelagem apresentada por Sharaf (2014), foi possível ver nas figuras (33, 34 e 35) um comportamento padrão e uma maior sensibilidade do modelo a partir da variação da constante de ativação do cátodo (**Ac**), mostrando uma relação inversa, à medida que aumenta a variação relativa da constante é identificado uma queda nas três saídas de resultados, com uma variação de aproximadamente 50% para a potência máxima e de 25% para tensão e densidade de corrente para a potência máxima.

Figura 33 - Diagrama spider da variação relativa da potência máxima por Sharaf



Fonte: Autoria própria

Figura 34 - Diagrama spider da variação relativa da tensão por Sharaf

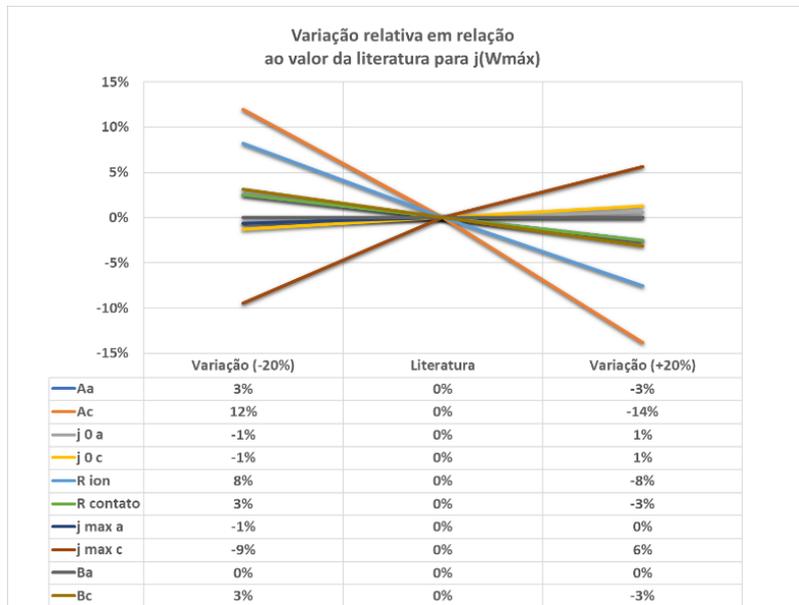


Fonte: Autoria própria

Enquanto a constante de ativação do catodo tem essa sensibilidade nas três saídas, os demais parâmetros quase não influenciam na sensibilidade da modelagem e mostram uma variação menor que 10% ao analisar a potência máxima (figura 33) e a tensão (figura 34) porém, ao analisar a densidade de corrente (figura 35) para a potência máxima, foi possível ver uma sensibilidade um pouco maior nos demais parâmetros com um destaque maior para a constante de

ativação do anodo, tendo um comportamento parecido com a do catodo e para a densidade de corrente máxima no catodo, apresentando uma relação direta aumentando o valor dessa saída com a variação positiva da literatura.

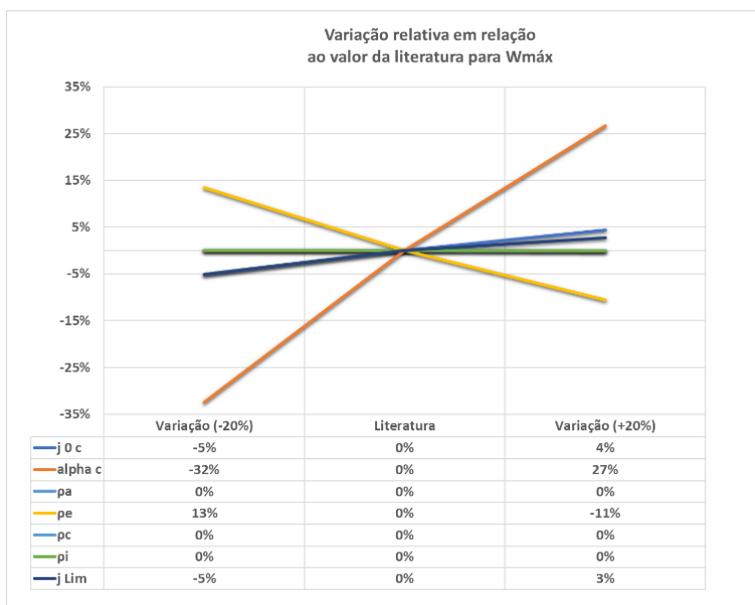
Figura 35 - Diagrama spider da variação relativa da densidade de corrente por Sharaf



Fonte: Autoria própria

Por fim, o último modelo apresentado é o de Azizi (2018) que traz uma SOFC, que assim como no modelo da PEMFC de Sharaf (2014) apresenta uma sensibilidade mais significativa por um dos parâmetros analisados, o coeficiente de troca de carga do catodo ( $\alpha_c$ ) mostra uma variação das saídas de potência máxima (figura 36) em torno de 60% enquanto o segundo parâmetro mais sensível, no caso a resistividade do eletrólito tem uma variação em torno de 30%.

Figura 36 - Diagrama spider da variação relativa da potência máxima por Azizi

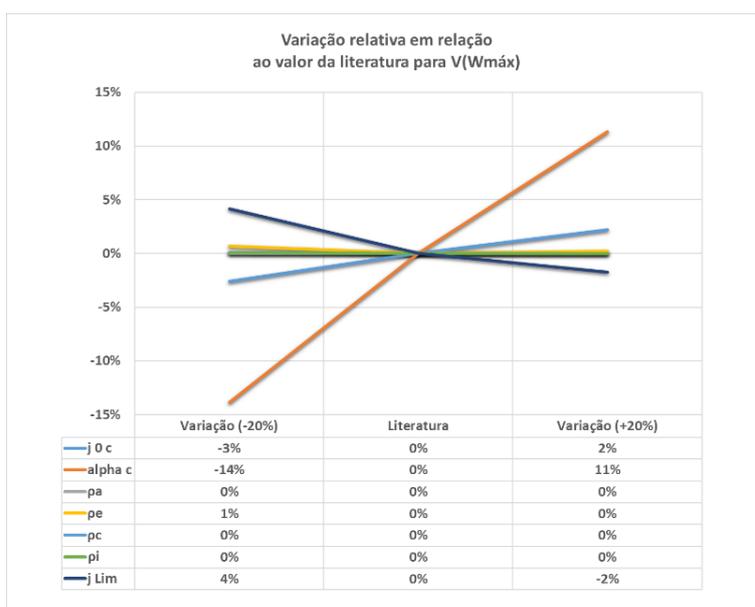


Fonte: Autoria própria

Já para a tensão de saída na figura (37) o modelo tem sensibilidade pela variação do coeficiente de troca de carga do catodo ( $\alpha c$ ) e tem relação direta com a variação relativa analisada, variação essa por volta de 25%.

O modelo também se mostra pouco sensível a variação de outros dois parâmetros, a corrente limite e a corrente de troca do catodo com uma variação relativa em ambos os casos em torno de 5%.

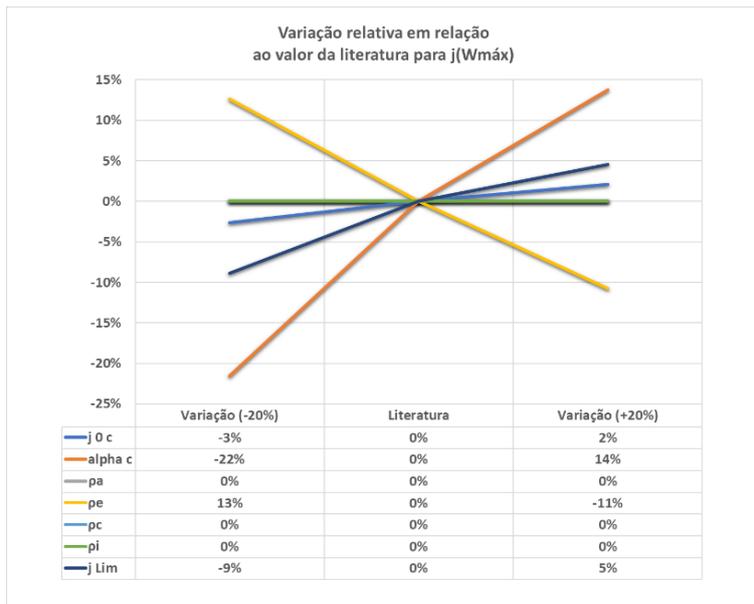
Figura 37 - Diagrama spider da variação relativa da tensão por Azizi



Fonte: Autoria própria

Agora após analisar a variação relativa da densidade de corrente para a potência máxima, o modelo se mostra sensível novamente a variação da resistividade do eletrólito mostrando uma relação inversa e uma relação direta com as variações do coeficiente de troca no catodo, a densidade de corrente limite e levemente com a resistividade do catodo.

Figura 38 - Diagrama spider da variação relativa da densidade de corrente por Azizi



Fonte: Autoria própria

### 5.3. Discussão

Após analisar individualmente cada um dos modelos propostos, foi possível identificar os parâmetros que mais impactam a sensibilidade dos mesmos, a partir disto, foi possível comparar os resultados das análises entre si de acordo com a complexidade e proximidade dos modelos para diferentes parâmetros de entrada e simulação.

Ao comparar os dois modelos que trouxeram equacionamentos para células PEMFC, um apresentado por Trindade e um por Sharaf, foi possível ver através dos diagramas mostrados nas figuras (29 e 33) o diferente número de parâmetros que impactam a sensibilidade do modelo, sendo o modelo com maior número de parâmetros aquele que teoricamente é o mais complexo e menos sensível a variação dos parâmetros de entrada, visto que a sensibilidade se dilui entre os parâmetros.

Com isso, por conta do menor número de parâmetros variáveis no modelo de Trindade (2020) é possível ver nas figuras (29 e 30) que a variação das saídas, de aproximadamente 30% é concentrada nos parâmetros do coeficiente de transferência de carga ( $\alpha$ ) e da densidade de corrente limite, enquanto no modelo apresentado por Sharaf (2014) por contar com mais parâmetros variáveis é possível ver que nove dos dez parâmetros tem uma variação muito pequena ao analisar tanto a potência máxima, uma variação para a maioria dos parâmetros que não passa de 20%, como a tensão para potência máxima como nas figuras (33 e 34), ou seja, não impactam na sensibilidade do modelo, com exceção da constante de ativação do catodo (**A<sub>c</sub>**) que mostra uma variação de 60%.

Já para comparar o modelo apresentado por Azizi (2018), foi levado em consideração não o comportamento de todos os parâmetros de forma conjunta, mas da sensibilidade por parâmetros específicos no modelo da SOFC com os demais modelos de PEMFC apresentados por Trindade (2020) e Sharaf (2014).

Esses parâmetros são o coeficiente de troca de carga do catodo (**α<sub>c</sub>**), a densidade de corrente de troca no catodo (**i<sub>o\_c</sub>**), a resistividade no eletrólito (**ρ**) e a densidade de corrente limítrofe (**j<sub>lim</sub>**), eles mostram uma sensibilidade muito maior na maioria dos casos na modelagem da SOFC em comparação da PEMFC, mas é possível ver algumas semelhanças de sensibilidade com o modelo de Sharaf para os parâmetros de densidade de corrente limítrofe (**j<sub>lim</sub>**) e para o coeficiente de troca de carga do catodo (**α<sub>c</sub>**) mesmo quando comparado com a constante de ativação do catodo (**A<sub>c</sub>**) que depende do coeficiente (**α<sub>c</sub>**), mostrando o quão mais sensível é o modelo da SOFC, em que a SOFC tem uma variação de acordo com os parâmetros de 60%, 10%, 30% e 10%, enquanto na PEMFC temos uma variação de 10%, 5%, 20% e 30% , mas foi possível também identificar que os parâmetros que mais tem influência estão mais relacionados com as perdas de ativação e concentração, que são as perdas responsáveis pela característica das concavidades da curva de polarização de acordo com as regiões onde cada uma “atua”, como na figura (20).

## 6. Conclusão

Com base nos resultados e análises apresentadas neste estudo a partir do levantamento de dados da literatura, a escolha dos artigos a serem validados, longo levantamento dos parâmetros de entrada, desenvolvimento do simulador, validação dos modelos através dos resultados dos artigos, simulações das variações dos parâmetros, obtenção dos valores de saída e cálculos das variações relativas permitindo uma comparação entre os diferentes modelos através dos diagramas spider para cada um dos três modelos.

A partir da análise individual da sensibilidade de cada um dos modelos nesse estudo foi possível concluir que a sensibilidade do modelo tem relação inversa com a quantidade de parâmetros de entrada necessários em seu equacionamento normalmente, mostrando que dos modelos apresentados o de Sharaf seria o menos sensível, por conta de a sensibilidade ser diluída entre os variados parâmetros.

Quando comparados entre os modelos, apesar da sensibilidade ser diferente é possível identificar um padrão nos parâmetros que mais impactam a sensibilidade, já que em ambos os três modelos apresentam uma sensibilidade maior quanto tratam das propriedades do catodo, que impacta principalmente na perda de ativação, levando a uma variação do resultado final de potência máxima de 15%, 30% e 25% respectivamente com os resultados apresentados.

Outros parâmetros que apresentam alguma sensibilidade considerável para com os modelos também tratam de propriedades dos materiais de produção dos componentes utilizados nas células, este já impacta mais na perda ôhmica pois influencia na resistividade do material do componente, ou a densidade de corrente limite que apresente sensibilidade quando tratamos da saída de densidade de corrente para a potência máxima, que no caso impacta na perda de concentração já que a perda remete a limitação de transferência de massa em maiores densidades de corrente.

Foi concluído, portanto, que dentre os modelos estudados o modelo mais indicado para padronização das células a combustível é o modelo apresentado por Sharaf (2014), por se tratar de um modelo que depende de uma maior quantidade de parâmetros reduzindo a sensibilidade final do modelo a uma imprecisão sobre a característica física.

Em adição a conclusão, por conta da grande incerteza dos valores, das fontes e caminhos de obtenção dos parâmetros de entrada durante maior parte da revisão da literatura, foi possível chegar à conclusão que dentro dos

parâmetros que demandam uma maior confiabilidade e precisão dos valores para uma melhor eficiência nos resultados, os coeficientes de troca de carga do catodo, as densidades de corrente limítrofes e máximas e de troca e as propriedades do eletrólito devem demandar uma maior atenção.

Para trabalhos futuros, pode-se testar mais modelos baseados nos artigos do levantamento do Apêndice A, considerando outros parâmetros como as condições de operação das células, como temperatura, pressões ou estequiometria, buscando considerar um modelo geral que dependesse de equações auxiliares e é recomendado também o estudo do desenvolvimento dos componentes das células buscando melhorar o custo de produção através de diferentes materiais que não impactem na eficiência da célula.

## Referências Bibliográficas

ABDIN, Z.; WEBB, C.J.; GRAY, E.MAC A. PEM fuel cell model and simulation in Matlab-Simulink based on physical parameters. **Energy**, v. 116, p. 1131-1144, 2016.

AHMADI, S.; GHAEBI, H.; SHOKRI, A. **A comprehensive thermodynamic analysis of a novel CHP system based on SOFC and APC cycles.** *Energy*, v. 186, p. 115899. 2019.

AZIZI, M. A.; BROUWER, J. Progress in solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power systems: System design and analysis, transient operation, controls and optimization. **Applied Energy**, v. 215, p. 237-289, 2018.

BANIASADI, E.; TOGHYANI, S.; AFSHARI, E. **Exergetic and exergoeconomic evaluation of a trigeneration system based on natural gas-PEM fuel cell.** *Internacional Journal of Hydrogen Energy*. v. 42, p. 5327-5339. 2017.

BARBIR, F. **PEM Fuel Cells Theory and Practice.** 2ª ed. Cambridge: Theory and Practice, 2013.

BARBIR, F; BASILE, A; VEZIROGLU, **Compendium of Hydrogen Energy.** Volume 3: Hydrogen Energy Conversion. Edição de Frano Barbir, Angelo Basile, T. Nejat Veziroglu. Woodhead Publishing: 2015.

BLOOMBERGNEF. **Hydrogen Economy Outlook, Key Messages.** 30 mar. 2020. Disponível em: <<https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2021.

CHEN, X.; GONG, G.; WAN, Z.; LUO, L.; WAN, J. **Performance analysis of 5 kW PEMFC-based residential micro-CCHP with absorption chiller.** *International Journal of hydrogen energy*, v. 40, n. 33, p. 10647-10657, 2015.

CNN. **Mundo prometeu reduzir emissão de poluentes, mas nem todos estão cumprindo meta.** 2021. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/mundo-prometeu-reduzir-emissao-de-poluente-mas-nem-todos-estao-cumprindo-meta/>> Acessado em: 12 de jun. 2022.

COLPAN, C.; DINCER, I.; HAMDULLAHPUR, F. **Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v.32, p.787 – 795, 2007.

COP26. **The-Glasgow-Climate.** Pact. 2021. United Nations, Climate Change. Glasgow, 2021. Disponível em: <<https://unfccc.int/conference/glasgow-climate-change-conference-october-november-2021>>. Acesso em: 09 de set. 2021.

CORREA, J. **An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 51, p. 1103. 2004.

Defesa em foco. Disponível em: <<https://www.defesa.tv.br/celula-de-combustivel-de-hidrogenio-em-empregos-militares/>>. Acesso em: 30 mar. 2022.

DINCER, R.; ROSEN, M.A. **Exergy: energy, environment, and sustainable development**. 1ª Ed. CRC Press: 2013.

DOHERTY, W.; REYNOLDS, A.; KENNEDY, D. **Computer simulation of a biomass gasification-solid oxide fuel cell power system using Aspen Plus**. Energy, v. 35, p. 4545-4555. 2010.

ENERGY. **Comparison of Fuel Cell Technologies**. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>> Acessado em: 12 de jun. 2022.

EPE. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. 2018. Disponível em: <[chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/03.%20Potencial%20de%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20no%20Horizonte%202050%20\(NT%20PR%2004-18\).pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/03.%20Potencial%20de%20Recursos%20Energ%C3%A9ticos%20no%20Horizonte%202050%20(NT%20PR%2004-18).pdf)> Acessado em 12 de jun. 2022.

FERNANDES, F. **Os custos de produção do Hidrogénio Verde**. Disponível em: <<https://eco.sapo.pt/opiniao/os-custos-de-producao-do-hidrogenio-verde/#:~:text=No%20curto%20prazo%2C%20os%20custos,natural%20como%20fonte%20energ%C3%A9tica%2C%20sendo>> Acesso em: 10 de jun. 2022

FUJISHIRO, Y. **Micro-tubular Solid Oxide Fuel Cell Integrated Compact Modules Operable at Low Temperatures**. 2009. Disponível em: <[https://www.aist.go.jp/aist\\_e/list/latest\\_research/2009/20091204/20091204.html](https://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2009/20091204/20091204.html)> Acessado em: 12 de jun. 2022.

GÁS ENERGY. **Custos de Hidrogênio: Perspectivas no longo prazo**. Disponível em: <<https://gasenergy.com.br/custos-de-hidrogenio-perspectivas-no-longo-prazo/>> Acessado em: 12 de jun. 2022.

HOSSEINI, M.; DINCER, I.; ROSEN, M. Hybrid solar-fuel cell combined heat and power systems for residential applications: Energy and exergy analyses. **Journal of Power Sources**, v. 221, p. 372-380, 2013.

IEA (2021). **Hydrogen in Latin America**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-latin-america>>. Acesso em: 20 de jan. 2022

INAC, S.; UNVERDI, S.; Midilli, A. **A parametric study on thermodynamic performance of a SOFC oriented hybrid energy system**. International Journal of Hydrogen Energy, v.44, p.10043 – 10058, 2019.

IRENA. **Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal**. 2020. Disponível em: <[https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_cost\\_2020.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf)>. Acesso: 11 de set. 2021.

JAFARI, M.; ARMAGHAN, D.; MAHMOUDI, S.M.; CHITSAZ, A. **Thermoeconomic analysis of a standalone solar hydrogen system with hybrid energy storage**. International Journal of Hydrogen Energy, v.44, p.19614 – 19627, 2019.

LINARDI, M. **Tecnologia de células a combustível**. Química Nova. 23(4), 2000.

MEHRPOOYA, M. **Conceptual design and energy analysis of novel integrated liquefied natural gas and fuel cell electrochemical power plant processes**. Energy, v. 111, p. 468-483. 2016.

MEHRPOOYA, M.; SADEGHZADEH, M.; RAHIMI, A.; POURIMAN, M. **Technical performance analysis of a combined cooling heating and power (CCHP) system based on solid oxide fuel cell (SOFC) technology – A building application**. Energy Conversion and Management, v 198, p. 111767. 2019.

MERT, S.O.; DINCER, I.; OZCELIK, Z. Exergoeconomic analysis of a vehicular PEM fuel cell system. **Journal of Power Sources**, v. 165, n. 1, p. 244-252, 2007.

MILEWSKI, J.; MILLER, A. **Mathematical Model of SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) for power plant simulations**. Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2004-53787. 2004.

MOTAHAR, S; ALEMRAJABI, A. **Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system**. International journal of hydrogen energy, n. 34, p. 2396–2407, 2009.

PIEGAS, J.D. **Custos de hidrogênio: perspectivas no longo prazo**. Gas Energy, 2021. Disponível em: <<https://gasenergy.com.br/custos-de-hidrogenio-perspectivas-no-longo-prazo/>>. Acesso em: 07 de mar. 2022.

QUATRO RODAS. **Chevrolet Colorado ZH2: uma S10 a hidrogênio pronta para a guerra**. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/chevrolet-colorado-zh2-uma-s10-a-hidrogenio-pronta-para-a-guerra/>>. Acesso em: 10 de jun. 2022.

REIS, P. **Vantagens e desvantagens das células de combustível**. Portal Energia, 21 dez. 2021. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-vantagens-e-desvantagens/>>. Acesso: 29 jan. 2022.

ROBALINHO, E.; SANTOS, K. **Célula a combustível tipo PEMFC: Energia renovável e eficiente**. Revista de Engenharia e Tecnologia, ISSN, p, 2176-7270, 2021.

ROKNI, M. **Thermodynamic analysis of SOFC (solid oxide fuel cell)-Stirling hybrid plants using alternative fuels**. Energy, n. 61, p. 87-97, 2013.

SANTOS, L. **Propriedades Estruturais e Texturais de Catalisadores Anódicos Alternativos para Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC)**. Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Química da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Química, 2018.

SANTOS, V.; OHARA, A. **Desafios e oportunidades para o Brasil com o hidrogênio verde.** 2021.

SCHUMM, B. **Fuel Cell.** 2021 Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/fuel-cell>> Acessado em: 12 de jun. 2022.

SIQUEIRA, H. **Panorama mundial da produção e consumo de energia elétrica e a participação do setor florestal brasileiro.** Disponível em: <<https://sif.org.br/2020/05/panorama-mundial-da-producao-e-consumo-de-energia-eletrica-e-a-participacao-do-setor-florestal-brasileiro/#:~:text=A%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20el%C3%A9trica,%2C%2038%25%20do%20total%20gerado.>> Acessado em: 12 de jun. 2022.

SHARAF, O. Z.; ORHAN, M.F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 32, p. 810-853, 2014.

SPIEGEL, C. **Mathematical modeling of polymer exchange membrane fuel cells.** Florida, 2008, 379p. Dissertação (Doutorado em Filosofia). University of South Florida. Disponível em: <<https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1509&context=etd>>. Acesso em: 13 de jul. 2022.

SOUZA, L. A. **Software Pega Ponto 1.0.** Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/lasouza/analise-nao-linear-de-estruturas/Pega%20Ponto%201.0.exe/view>> Acesso em: 10 de jun. 2022.

TEIXEIRA, P.A. BNEF: **Brasil deve desapontar como mercado global de hidrogênio verde.** Canal Energia, nov. 2021. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53193704/bnef-brasil-deve-desapontar-como-mercado-global-de-hidrogenio-verde>>. Acesso em: 02 de abr. 2022.

Terra. **Quanto combustível é necessário para lançar um ônibus espacial?** Terra, 2020. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/educacao/infograficos/onibus-espaciais/onibus-espaciais-06.htm>>. Acesso em: 20 de fev. 2022.

TRINDADE, E. D. dos S. **Estudo das Células a Combustível tipo Membrana de Troca de Prótons (PEMFC), modelagem e simulação computacional.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul- UNIJUÍ, Ijuí, 2020.

WATANABE, C. **Japão estimula o uso de células de combustível como fonte residencial de energia.** 2014. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/noticias/bloomberg/2014/12/09/japao-estimula-o-uso-de-celulas-de-combustivel-como-fonte-residencial-de-energia.htm?cmpid=copiaecola>> Acessado em: 12 de jun. 2022.

WATERWORTH, D. **Bloomberg Predicts Massive Fall In Green Hydrogen Prices.** Disponível em: <<https://cleantechnica.com/2022/01/30/bloomberg-predicts-massive-fall-in-green-hydrogen-prices/>> Acesso em: 10 de jun. 2022.

WENDT, H.; GOTZ, M.; LINARDI, M. **Tecnologia de células a combustível.** Quim. Nova, 23 (4), ago. 2000. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/NYnZ6bbM7TY6RKRGGTJTmqr/?lang=pt>>. Acesso em: 02 de fev. 2022.

WU, Z; NI, M; ZHU, P; ZHANG, Z. **Dynamic modeling of a NG-fueled SOFC-PEMFC hybrid system coupled with TSA process for fuel cell vehicle.** Energy Procedia, n. 158, p. 2215–2224, 2019.

YANG, X.; ZHAO, H. Thermodynamic performance study of the SOFC-STIG distributed energy system fueled by LNG with CO<sub>2</sub> recovery. **Energy**, v. 186, p. 115860, 2019.

YONOFF, R; CAMBRONE, D; CHARRY, S; MONTENEGRO, A; PORTNOY, I. **Performance assessment and economic perspectives of integrated PEM fuel cell and PEM electrolyzer for electric power generation.** Heliyon, v. 7, p. E06506, 2021.

ZHANG, X.; NI, M.; WANG, J.; YANG, L.; MAO, X.; SU, S.; YANG, Z.; CHEN, J. **Configuration design and parametric optimum selection of a self-supporting PEMFC.** Energy Conversion and Management, ed. 225, p. 113391, 2020.

ZHUANG, Q.; GEDDIS, P.; RUNSTEDTLER, A.; CLEMENTS, B. An integrated natural gas power cycle using hydrogen and carbon fuel cells. **Fuel**, v. 209, p.76-84, 2017.

## Apêndice A

Tabela de levantamento da literatura de artigos em referências a estudos e análises de células dos tipos PEMFC e SOFC

Autor	Ano	Tipo CaC	Potência	Dados experimentais	Curva experimental
Santos Trindade	2020	PEMFC	n	n	s
Baniasadi	2017	PEMFC	3kw	s	s
Chen, X Gong, G, Wan, Z, Luo, L, & Wan, J	2015	PEMFC	n	s	s
Colpan	2007	SOFC	n	n	s
Yang, X., & Zhao, H.	2019	SOFC	1,68289 kw	s	n
Meehrpooya	2019	SOFC	120kw	s	n
Abdin	2016	PEMFC	n	s	s
Ahmadi	2019	SOFC	845,4kw	s	s
Azizi	2018	SOFC	1084kw	s	s
Correa	2004	PEMFC	1,53kw	s	s
Mert	2007	PEMFC	n	s	s
Doherty, W., Reynolds, A., & Kennedy, D.	2010	SOFC	120/127,4kw	s	s
Hosseini	2013	SOFC	n	s	n
Inac	2019	SOFC	100kw	s	s
Jafari	2019	PEMFC	n	n	s
Meehrpooya	2016	SOFC	21,676kw	n	s
Milewski, J., & Miller, A.	2004	SOFC	24,68	n	n
Motahar	2009	SOFC	n	s	s
Rokni, M	2013	SOFC	10kw	s	n
Sharaf	2014	PEMFC	10-300kw	s	s
Wu	2019	SOFC	248kw	s	s
Wu	2019	PEMFC	26kw	s	s
Yang, X., & Zhao, H.	2019	SOFC	120,06kw	s	n
Yonoff	2021	PEMFC	10kw	n	s
Zhang	2020	PEMFC	n	n	n
Zhuang	2017	SOFC	n	s	n

Potencial de Nernst		Perdas ohmicas					
Equação	Comentário	Equação global	Equação anodo	Equação catodo	Equação eletrólito	Equação interconector	Comentário
1	-	1	-	-	-	-	-
1	-	1	-	-	-	-	Desconsiderando RC
1	-	1	-	-	-	-	-
1	-	2	-	-	-	-	-
1	-	-	1	1	-	-	-
1	-	-	2	2	1	1	-
1	-	4	3	3	2	2	-
1	-	2	-	-	-	-	-
1	-	1	-	-	-	-	-
1	-	1	-	-	-	-	-
1	-	4	-	-	-	-	-
1	-	-	2	2	1	1	-
1	-	-	-	-	-	-	Não são desenvolvidas
1	-	2	-	-	-	-	-
1	-	1	-	-	-	-	-
1	-	5	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	Considerado valor constante
1	-	-	2	2	1	1	-
1	-	4	-	-	-	-	-
1	-	4	-	-	-	-	-
1	-	6	-	-	-	-	-
1	-	1	-	-	-	-	-
1	-	2	-	-	-	-	-
1	-	4	-	-	-	-	-
1	-	4	-	-	-	-	-
1	-	7	-	-	-	-	-

Perdas por concentração				Perdas por activação			
Equação global	Equação anodo	Equação catodo	Comentário	Equação global	Equação anodo	Equação catodo	Comentário
1	-	-	-	1	-	-	-
1	-	-	-	-	1	1	Considerara global 1
1	-	-	-	2	-	-	-
2	-	-	-	3	-	-	-
-	-	-	Desconsiderar por ser pequena	-	2	2	-
-	1	1	-	-	3	3	-
3	2	2	-	-	1	1	Considerara global 1
-	3	3	-	-	4	4	-
1	-	-	-	1	-	-	-
1	-	-	-	2	-	-	-
4	-	-	-	-	1	1	Considerara global 1
-	1	1	-	-	3	3	-
-	-	-	Não são desenvolvidas	-	-	-	Não são desenvolvidas
-	3	3	-	-	4	4	-
1	-	-	-	4	-	-	-
5	-	-	-	3	-	-	-
			Considerado valor constante	-	-	-	Considerado valor constante
-	4	4	-	-	-	-	Considerado valor constante
-	3		Desconsiderou catodo	-	4		Desconsiderou catodo
-	3	3	-	-	1	1	Considerara global 1
2	-	-	-	-	2	2	-
1	-	-	-	2	-	-	-
	-	-	Desconsiderado por ser pequene nesse modelo	-	2	2	-
1	-	-	-	1	-	-	-
4	-	-	-	1	-	-	-
6	-	-	-	3	-	-	-

## Apêndice B

% Códigos utilizados para as simulações

% Nerst

```
function open_circuit_voltage = Nerst(T,p_h2,p_o2)
```

```
open_circuit_voltage = 1.229 - 0.85 * (10 ^ -3) * (T - 298.15) + 4.31 * (10 ^ -5) * T  
* (log(p_h2) + 0.5 * log(p_o2));
```

```
end
```

% Ohmica Trindade

```
function ohmic_overpotential = ohmic(T,I,A,mem_thickness,lambda,R_c)
```

```
rho_m = (181.6 .* (1+0.03 .* (I./A) + 0.062 .* ((T./303).^2) .*  
((I./A).^2.5)))/((lambda - 0.634 - 3 .* (I./A)).*(exp(4.18.*(T - 303)./T))));
```

```
R_m = (rho_m .* mem_thickness) ./ A;
```

```
ohmic_overpotential = I .* (R_m + R_c);
```

```
end
```

% Ativação Trindade

```
function activation_overpotential = activation(R,T,F,n,alpha_c,I,I_0)
```

```
activation_overpotential = (R .* T)/(alpha_c * n * F) .* log(I/I_0);
```

```
end
```

% Concentração Trindade

```
function concentration_overpotential = concentrationGlobal1(R,T,n,F,I,I_lim)
```

```
concentration_overpotential = -(R .* T)/(n * F) .* log((1-I./I_lim));
```

```
end
```

```
% Ativação Sharaf
```

```
U_a1 = (A_catodo*log(i./i_0))+(A_anodo*log(i./0.15));
```

```
% Ohmica Sharaf
```

```
U_ohm1Sharaf = i.*(R_ele+R_ion+R_cr);
```

```
% Concentração Sharaf
```

```
U_conC3 = concentrationCatodo3(B_catodo,i,i_maxC);
```

```
U_conA3 = concentrationAnodo3(B_anodo,i,i_maxA);
```

```
U_con3 = (U_conC3+U_conA3);
```

```
% Ativação Azizi
```

```
Vativ_c1 = ((R*Tcac)/(alpha_c*n*(F)))*log(i_sofc./ic);
```

```
% Ohmica Azizi
```

```
Vohm2 = (pa*La + pe*Le + pc*Lc + pi*Li)*i_sofc*1e4;
```

```
% Concentração Azizi
```

```
Vconc1 = ((-R*Tcac)/(n*F))*log(1-(i_sofc./ilim_c));
```