



GERAÇÃO SUSTENTÁVEL DE ENERGIA ELÉTRICA VIA HIDROGÊNIO VERDE CONSIDERANDO O DESEMPENHO DA CÉLULA ELETROLISADORA

SUSTAINABLE GENERATION OF ELECTRICITY VIA GREEN HYDROGEN CONSIDERING THE PERFORMANCE OF THE ELECTROLYZER CELL

Denis Carlos Lima Costa¹
Patrícia Raquel do Nascimento Batista²
Jaiza de Souza Soares³
Jhonathan Alexandre Furtado Meninea Serra⁴
Ariane Cristina Fernandes Reis⁵
Adriane Cristina Fernandes Reis⁶
Fernando José Aguirre Ramos da Silva⁷
Nayra Gabryelle Silva Monteiro⁸

Área Temática 05: Meio ambiente, Recursos Florestais
Modalidade: Artigo Científico

Resumo

A substituição dos modelos de geração de energia, a partir de combustíveis fósseis para neutros em carbono, necessita de uma significativa transformação na geração e no consumo de eletricidade. Este trabalho evidencia o Hidrogênio como um imprescindível potencial para intensificar o processo de geração de energia baseado em fontes renováveis. O artigo apresenta dois estudos aos modelos de geração de energia, via Hidrogênio: *Caso (i)*, estudo do comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica influenciada pelas variáveis de controle Corrente elétrica e Temperatura operacional. *Caso (ii)*, estudo do comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica influenciada pelas variáveis de controle Corrente elétrica e Pressão operacional. Para os dois casos, destaca-se um modelo computacional, às células eletrolisadoras de Membrana de Troca de Prótons, indicado à geração de energia renovável, a partir do Hidrogênio.

Palavras-Chave: Sustentabilidade, Meio Ambiente, Energia Limpa, Eletrólise, Modelagem Matemática.

Abstract

Changing power generation models from fossil fuels to carbon neutral ones requires a significant transformation in electricity generation and consumption. This work highlights Hydrogen as an essential potential to intensify the energy generation process based on renewable sources. The article presents two studies of energy generation models via Hydrogen: *Case (i)*, study of the behavior of the Electric Activation Voltage with ohmic loss influenced by the control variables Electric current and Operating temperature. *Case (ii)*, study of the behavior of the Electric Activation Voltage with ohmic loss influenced by the control variables Electric current and Operating pressure. For both cases, a

¹ Instituto Federal do Pará – IFPA Campus Ananindeua – Bacharelado em Ciência e Tecnologia; GM²SC e LICIT; denis.costa@ifpa.edu.br.

² Instituto Federal do Pará – IFPA Campus Ananindeua – Bacharelado em Ciência e Tecnologia; GM²SC; patricia.batista@ifpa.edu.br.

³ Instituto Federal do Pará – IFPA Campus Ananindeua – Bacharelado em Ciência e Tecnologia; GM²SC; jaiza.soares@ifpa.edu.br.

⁴ Instituto Federal do Pará – IFPA Campus Ananindeua – Gradiente de Modelagem Matemática - GM²SC; jhonathan.serra@ifpa.edu.br.

⁵ Instituto Federal do Pará – IFPA Campus Ananindeua – Bacharelado em Ciência e Tecnologia; GM²SC; arianecfr@gmail.com.

⁶ Instituto Federal do Pará – IFPA Campus Ananindeua – Bacharelado em Ciência e Tecnologia; GM²SC; adriane.fr22@gmail.com.

⁷ Instituto Federal do Pará – IFPA Campus Ananindeua – Bacharelado em Ciência e Tecnologia; GM²SC; aguirrefernando.ifpa@gmail.com.

⁸ Instituto Federal do Pará – IFPA Campus Ananindeua – Bacharelado em Ciência da Computação; GM²SC; nayragabryellesm@hotmail.com



computational model stands out, to the Proton Exchange Membrane electrolyzer cells, indicated for the generation of renewable energy, from Hydrogen.

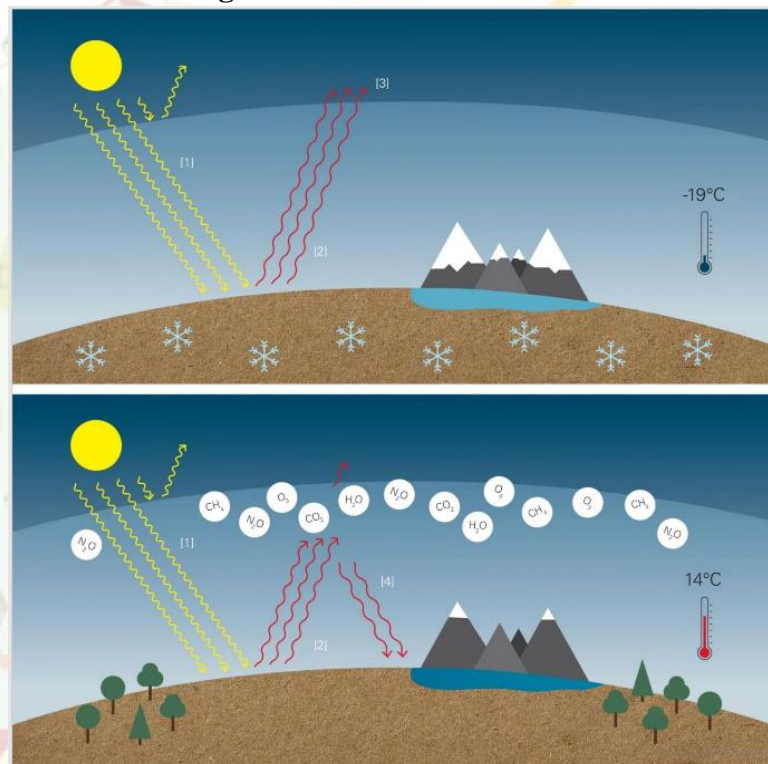
Key words: Sustainability, Environment, Clean Energy, Electrolysis, Mathematical Modeling.

1. Introdução

A produção de energia é o fator de maior predominância das exalações dos Gases de Efeito Estufa (GEE) e CO₂ provocadas pela humanidade, com 75% de participação. Na sequência tem-se a agricultura, com a participação de 18%, contribuindo para as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O das culturas como arroz, e dejetos de gado, assim como o desmatamento. Em seguida tem-se a indústria que emite GEE de processos como a produção de aço ou cimento que são difíceis de evitar. A explicação: a geração de energia está, hegemonicamente, fundamentada em combustíveis fósseis com emissões de CO₂ (Nelles, Serrer, 2021).

Os gases de efeito estufa não são apenas CO₂; também existem CH₄, N₂O, CFC, SF₆. Esses GEE transformam em Potencial de Aquecimento Global o tempo de vida na atmosfera. Muito deles, é importante afirmar, também são disseminados por sistemas da natureza, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1: O natural efeito estufa.



Fonte: Nelles, Serrer, 2021.



Infelizmente, o aquecimento global já está produzindo efeitos colaterais quase irreversíveis, uma vez que os GEE se alastram na atmosfera. Todas as pessoas já perceberam que houve, pelos menos, uma mudança climática. Alguns dos efeitos mais presenciados são: ondas de calor; secas e escassez de água em regiões, historicamente, chuvosas; incêndios florestais; maior frequência de tempestades intensas; densas chuvas com inundações ocorrendo com maior frequência; acentuada redução das geleiras; atenuação da neve nas montanhas; elevação do nível dos mares e oceanos em virtude do derretimento do gelo polar.

Todavia, reforçando a informação, a maior parte dessas emissões de GEE são emissões antrópicas, causadas por atividades humanas, como por exemplo, as atividades industriais, a agricultura, o transporte ou a produção de energia com combustíveis fósseis. Costa et al (2016), avaliam que, adotar um sistema de captação de energia aplicando as restrições é a integração segura entre os sistemas elétricos e o ecossistema, reduzindo, sistematicamente, o lançamento de GEE.

Para Yue et al (2021), apesar de um presente e significativo consumo de energia mundial seja servido por combustíveis fósseis, os impactos desfavoráveis da combustão desse tipo de combustíveis são, frequentemente, desprezados.

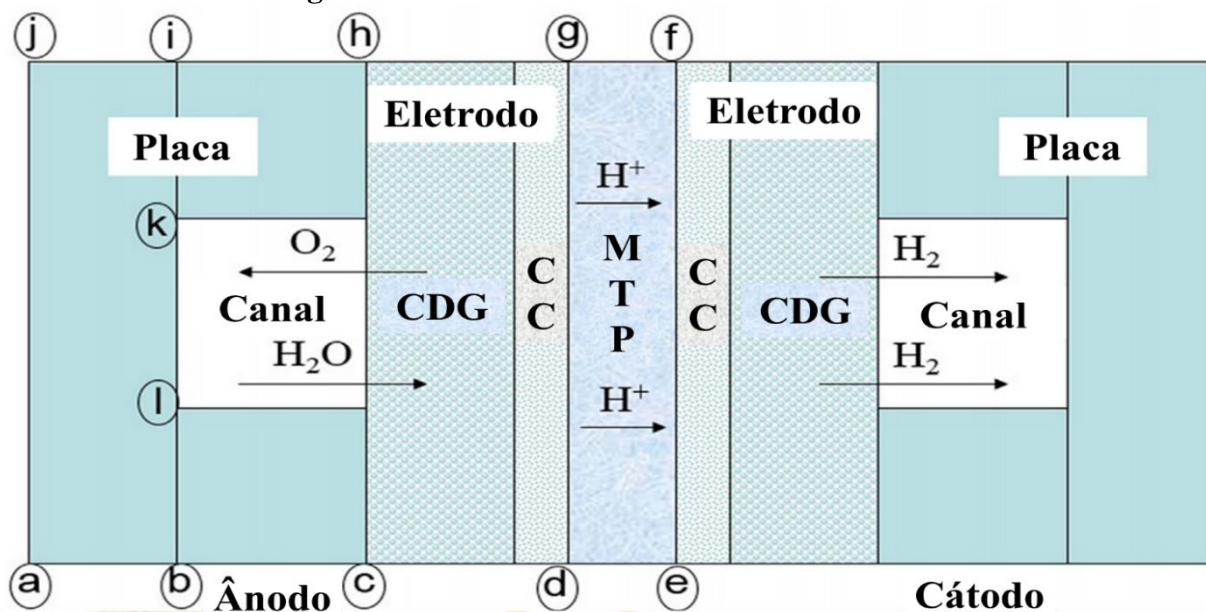
Dessa forma, esse artigo destaca que a transformação energética global deverá ser orientada, com maior aceleração, para o desenvolvimento do uso de energia renovável. Para que exista um impulso, realmente, forte na direção de reduzir as emissões de GEE, evidencia-se o Hidrogênio Verde como um excelente insumo à geração de energia. A geração de energia elétrica a partir do Hidrogênio, pode ser realizada mediante uma célula de combustível. Essa estratégia não produz poluição, uma vez que o único subproduto é a água. Segundo Handwerker et al (2021), o Hidrogênio contém 33,33 kWh de energia por quilo, em comparação com 12 kWh de gasolina e óleo diesel.

Han et al (2015), apresentaram um modelo computacional abrangente para as células eletrolisadoras de Membrana de Troca de Prótons (MTP). A proposta da MTP direcionou diversas pesquisas para o armazenamento de energia renovável e produção de Hidrogênio. Esse modelo de perda ôhmica de uma célula eletrolisadora MTP abrange diferentes condições operacionais e parâmetros físicos de projeto em seu desempenho foi, exaustivamente, investigado, inserindo os parâmetros da temperatura operacional, pressão, densidade de



corrente elétrica de troca, espessura do eletrodo, espessura da membrana e interface resistência. Contudo, a estratégia da MTP considerou a Corrente Elétrica como a única variável de controle, conforme indica a Figura 2.

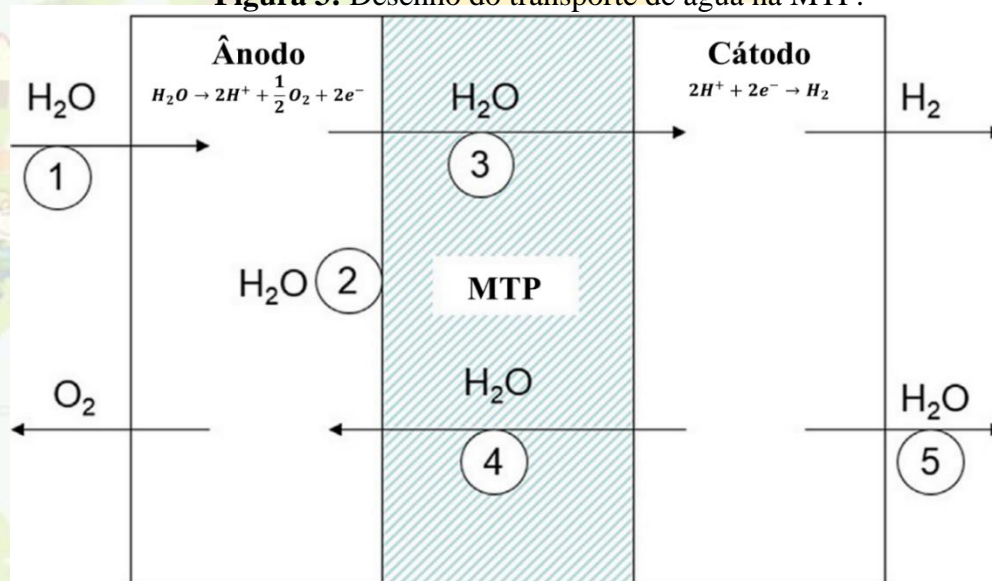
Figura 2: Desenho da Membrana de Troca de Prótons.



Fonte: Adaptado de Han et al (2015).

A Figura 3 mostra o esquema de transporte da água em uma única célula do eletrolisador da Membrana de Troca de Prótons.

Figura 3: Desenho do transporte de água na MTP.



Fonte: Adaptado de Han et al (2015).



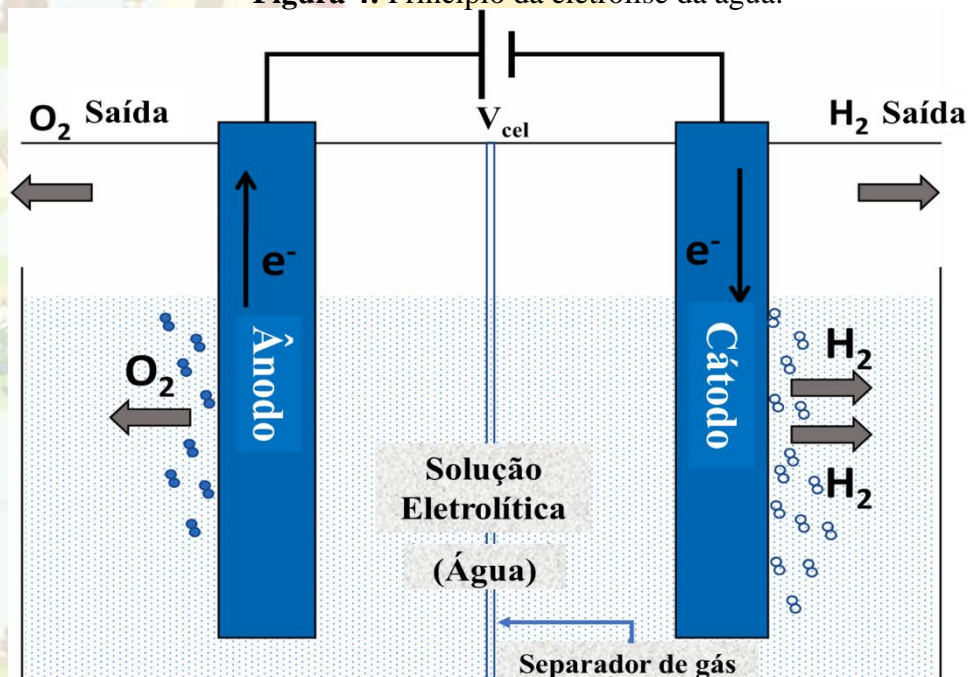
O Potencial Elétrico de Difusão é produzido devido à massa transportada dentro dos eletrodos porosos do eletrolisador MTP. Durante a reação eletroquímica da MTP, a água, em estado líquido, deve ser transportada para a camada de reação e o gás precisa ser removido do local da reação. As perdas de transporte de massa desempenham um papel importante no desempenho da célula eletrolisadora MTP.

No desenvolvimento desse trabalho utilizou-se a estratégia de Membrana de Troca de Prótons (MTP), considerando dois estudos de caso: (i) as variáveis de controle serão a Corrente Elétrica e a Temperatura no sistema; (ii) as variáveis de controle serão a Corrente Elétrica e a Pressão no sistema. Os modelos computacionais implementados durante as investigações, consideram que as avaliações do Potencial Elétrico de Difusão são mais precisas quando o modelo matemático for uma função de mais de uma variável de controle.

2. Metodologia

Fundamentados na arquitetura apresentada na Figura 2, onde são observadas as Camadas do Catalisador (CC) e as Camada de Difusão de Gás (CDG), sabe-se que os prótons são transferidos através da MTP, combinando-se com os elétrons, gerando Hidrogênio no cátodo, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4: Princípio da eletrólise da água.



Fonte: Adaptado de Yue et al (2021).



Durante esse processo os parâmetros físicos influenciam, substancialmente, o comportamento da célula, em discrepantes circunstâncias de execução. O potencial de uma única célula do eletrolisador MTP é composto pela Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica. Essa Tensão Elétrica de Ativação pode ser representada pela Equação (1).

$$V_{cel} = V_0 + \frac{RT}{zF} \ln \left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}}{a_{H_2O}} \right] + (R_{eq} + R_m)i + \frac{RT}{\alpha_a zF} \ln \left[\frac{i}{i_0} \right] + \frac{RT}{\alpha_c zF} \ln \left[1 + \frac{i}{i_{disp}} \right] \quad (1)$$

Sendo,

$a, c \rightarrow$ índices representam ânodo e o cátodo;

$R \rightarrow$ Constante dos gases;

$T \rightarrow$ Temperatura de operação;

$F \rightarrow$ Constante de Faraday;

$i \rightarrow$ Corrente elétrica;

$i_0 \rightarrow$ Corrente elétrica de troca;

$\alpha_a, \alpha_c \rightarrow$ Coeficientes de transferência de carga;

$R_{eq} \rightarrow$ Resistência elétrica equivalente dos eletrodos da interface;

$R_m \rightarrow$ Resistência elétrica da membrana;

$P_{H_2}, P_{O_2} \rightarrow$ Pressões do Hidrogênio e do oxigênio;

$a_{H_2O} \rightarrow$ Coeficiente de atividade da água;

$z \rightarrow$ Número molar de elétrons transferidos durante a eletrólise;

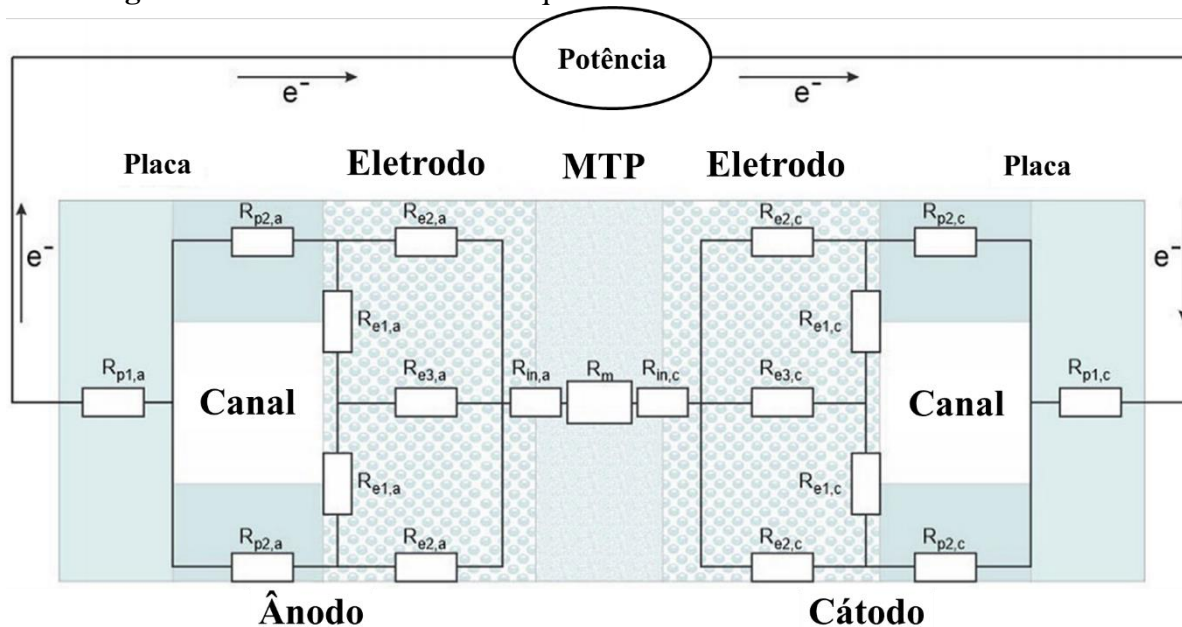
$i_{disp} \rightarrow$ Densidade de Corrente elétrica dissipada.

A Figura 5 mostra a Resistência Elétrica equivalente de um modelo de célula de eletrolisador MTP, ajustado para a resolução dos cálculos do Potencial Elétrico ôhmico, apresentado na Equação (1), em correspondência com a Figura 2. É sempre importante lembrar que essas resistências elétricas podem desmembradas e calculadas em função da resistividade elétrica do material (ρ). Essas relações podem ser usadas para o ânodo e o cátodo, conhecendo-se o comprimento (l) e área de cada componente (A), de acordo com a 2ª Lei de Ohm, expressa na Equação (2).



$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

Figura 5: Modelo de resistência equivalente de uma célula eletrolisadora MTP.



Fonte: Adaptado de Han et al (2015).

Os dados aplicados na resolução computacional da Equação (1) estão dispostos na Tabela (1). Essas informações foram catalogadas a partir das investigações realizadas nos trabalhos de Grigoriev et al (2009) e Bapat e Thynell (2008).

Tabela 1: Parâmetros iniciais de cálculo de uma célula eletrolisadora MTP.

Descrição	Valor	Unidade
Constante de Faraday	96485.0	F → C/mol
Constante dos gases	8.314	R → J/mol/K
Temperatura de operação	353.15	T → K
Pressão de operação	1(O ₂); 13.6(H ₂)	P → atm
Densidade dissipada de corrente elétrica	2.0	i _{disp} → A/cm ²
Corrente elétrica de troca	2.0e ⁻⁶ (ânodo); 1.0e ⁻¹ (cátodo)	i ₀ → A/cm ²
Número molar de elétrons transferidos	2.0	z
Espessura do eletrodo	200	l → Mícrons
Espessura da membrana	178	l → Mícrons
Resistividade do carbono	80.0 e ⁻³	ρ

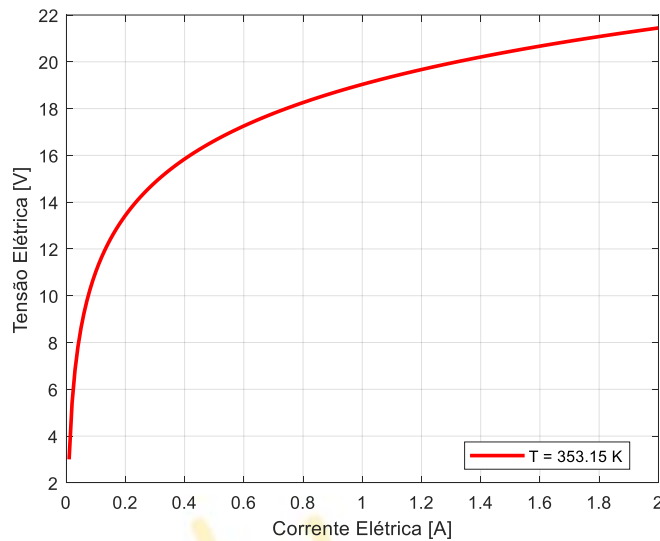
Fonte: Grigoriev et al (2009) e Bapat e Thynell (2008).



3. Resultados/Discussões

A Figura 6 apresenta o comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica, a uma temperatura de 353.15 K, considerando, exclusivamente, a corrente elétrica como variável de controle.

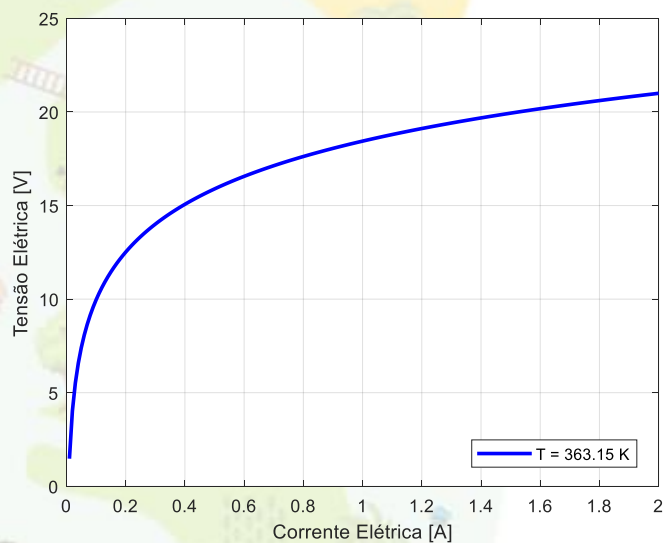
Figura 6: Tensão Elétrica (V_{cel}) para $T = 353.15 K$.



Fonte: Autoras(es).

A Figura 7 apresenta o comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica, a uma temperatura de 363.15 K, considerando, exclusivamente, a corrente elétrica como variável de controle.

Figura 7: Tensão Elétrica (V_{cel}) para $T = 363.15 K$.

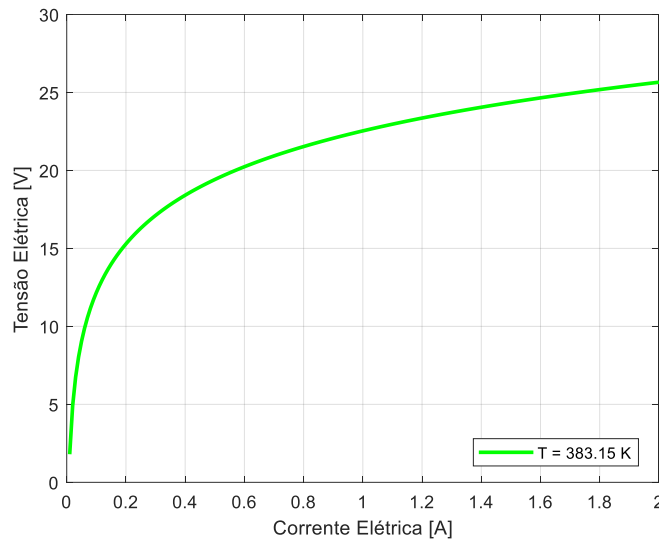


Fonte: Autoras(es).



A Figura 8 apresenta o comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica, a uma temperatura de 383.15 K, considerando, exclusivamente, a corrente elétrica como variável de controle.

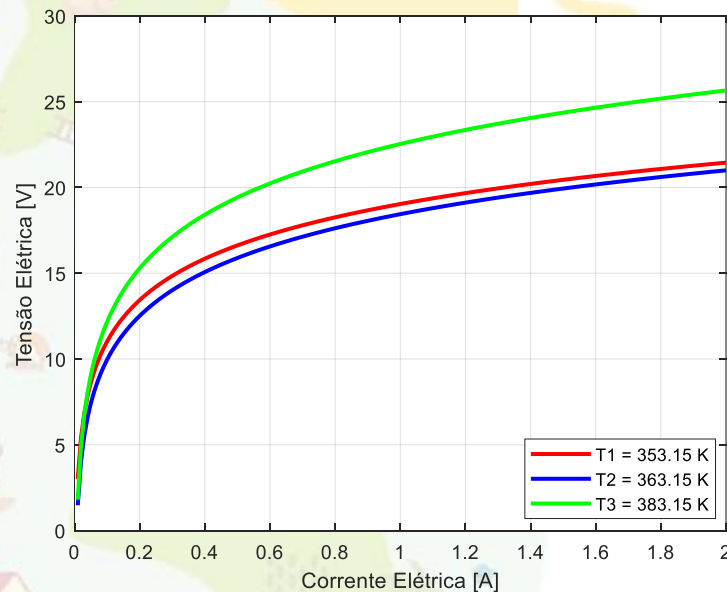
Figura 8: Tensão Elétrica (V_{cel}) para $T = 383.15 K$.



Fonte: Autoras(es).

A Figura 9 compara os comportamentos da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica, com as temperaturas de 353.15, 363.15 e 383.15 K, considerando, exclusivamente, a corrente elétrica como variável de controle.

Figura 9: Tensão Elétrica (V_{cel}) para $T_1 = 353.15 K$, $T_2 = 363.15 K$ e $T_3 = 383.15 K$.



Fonte: Autoras(es).



A Tabela 2 expõe os resultados obtidos nas simulações computacionais, considerando a geração sustentável de energia elétrica, a partir do Hidrogênio Verde.

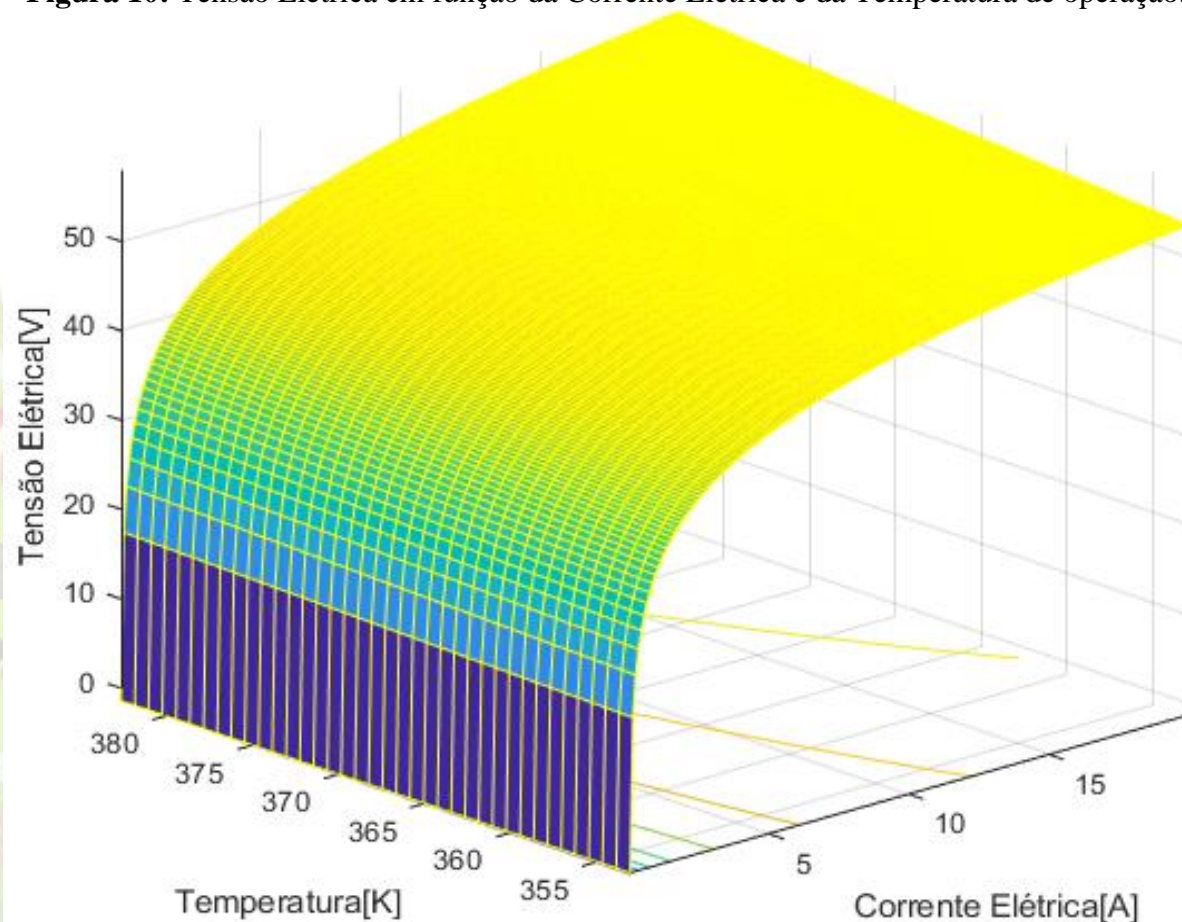
Tabela 2: Temperaturas e Tensões elétricas.

Temperatura (K)	Tensão Elétrica Máxima Gerada	Tensão Elétrica Média Gerada
353.15	21.4463	18.0279
363.15	20.9976	17.3784
383.15	25.6559	21.2339

Fonte: Autoras(es).

Estudo de Caso (i) → Nesse estudo acrescentamos, à Equação (1), mais uma variável de controle: a Temperatura. Ou seja, além da Corrente Elétrica, o comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica irá sofrer influência dinâmica da variação da Temperatura Operacional. A Figura 10 apresenta esse comportamento, ou seja, $V_{cel} = f(i, T)$.

Figura 10: Tensão Elétrica em função da Corrente Elétrica e da Temperatura de operação.

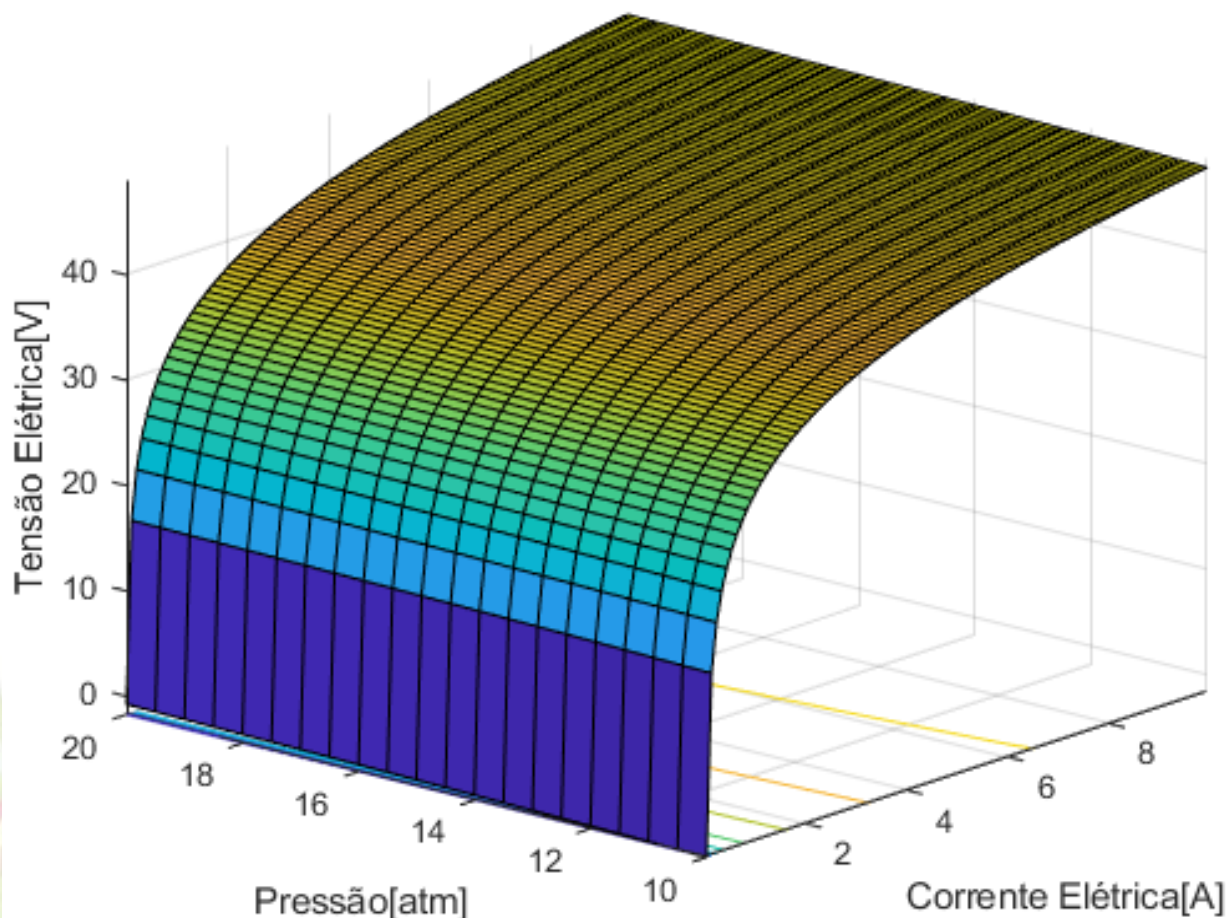


Fonte: Autoras(es).



Estudo de Caso (ii) → Nesse estudo acrescentamos, à Equação (1), mais uma variável de controle: a Pressão. Ou seja, além da Corrente Elétrica, o comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica irá sofrer influência dinâmica da variação da Pressão Operacional. A Figura 11 apresenta esse comportamento, ou seja, $V_{cel} = f(i, P)$.

Figura 11: Tensão Elétrica em função da Corrente Elétrica e da Pressão de Operação.



Fonte: Autoras(es).

Em ambos os Estudos, percebe-se, como maior precisão e acurácia o comportamento da Tensão Elétrica de Ativação. No Estudo (i), em função da Corrente Elétrica e da Temperatura; no Estudo (ii), em função da Corrente Elétrica e da Pressão. A incorporação dessas grandezas físicas como novas variáveis de controle, contribui para uma maior eficiência energética. Essas análises são essenciais pois, a alta densidade de energia baseada na massa do Hidrogênio o torna um dos os combustíveis futuros mais promissores. Reforçando o resultado do trabalho de



Handwerker et al (2021): o Hidrogênio contém 33,33 kWh de energia por quilo, em comparação com 12 kWh de gasolina e óleo diesel.

4. Considerações Finais

Este artigo se dedicou ao estudo da geração de energia, cujo combustível é o Hidrogênio. Considera-se que o Hidrogênio é um relevante elemento à transição energética, saindo da dependência dos combustíveis fósseis para as fontes de energia renováveis. Conseqüentemente, estudos sobre estruturas da eletrólise da água, de células de combustível e de uso do Hidrogênio foram apresentados neste artigo, cujas características apareceram descritas em modelos matemáticos com resultados experimentais obtidos por estratégias computacionais.

O artigo incorporou dois estudos às pesquisas sobre a geração sustentável de energia: *Caso (i)*, estudo do comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica influenciada pelas variáveis de controle Corrente elétrica e Temperatura operacional. *Caso (ii)*, estudo do comportamento da Tensão Elétrica de Ativação com perda ôhmica influenciada pelas variáveis de controle Corrente elétrica e Pressão operacional.

Com essas novas informações, obtidas na realização do projeto, será possível desenvolver estruturas com a complexidade inerente da operação de um sistema de geração de energia, tornando necessária a utilização de modelos sofisticados de diagnóstico, análise e aconselhamento. Ações preventivas disponíveis e, facilmente acessíveis, produzirão relevante melhoria na qualidade da informação disponível à população, quanto ao uso da energia limpa.

Para trabalhos futuros, estima-se a confecção de uma Inteligência Artificial, capaz de incorporar o máximo de dados e de informações, relevantes à tomada de decisão, a fim de maximizar a geração de energia.

5. Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA *Campus* Ananindeua, cuja gestão oportunizou e motivou o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Bacharelado em Ciência e Tecnologia, por subsidiar conhecimento científico que fundamentou à realização desse artigo.



Ao grupo de pesquisa Gradiente de Modelagem Matemática e Simulação Computacional – GM²SC, cujos participantes demonstraram estímulo e competência para a implementação desse trabalho.

6. Referências Bibliográficas

BAPAT, C. J.; THYNELL, S.T. **Effect of anisotropic electrical resistivity of gas diffusion layers (GDLs) on current density and temperature distribution in a polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell.** J. Power Sources;185(1):428e32. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.06.016>. 2008.

COSTA, Denis C. L.; NUNES, Marcus V. A.; VIEIRA, João P.A.; BEZERRA, Ubiratan H. **Decision tree-based security dispatch application in integrated electric power and natural-gas networks.** Electric Power Systems Research 14. 442–449. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2016.08.027>. 2016.

GRIGORIEV, S. A.; MILLET, P.; VOLOBUEV, S. A.; FATEEV, V. N. **Optimization of porous current collectors for PEM water electrolyzers.** Int J. Hydrogen Energy; 34(11):4968e73. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.056>. 2009.

HAN, Bo; STEEN, Stuart M.; MO, Jingke; ZHANG, Feng-Yuan. **Electrochemical performance modeling of a proton exchange membrane electrolyzer cell for hydrogen energy.** International Journal of Hydrogen Energy - Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.164>. 2015.

HANDWERKER, M.; WELLNITZ, J.; MARZBANI, H. **Comparison of hydrogen powertrains with the battery powered electric vehicle and investigation of small-scale local hydrogen production using renewable energy.** Hydrogen; 2(1):76–100. <http://dx.doi.org/10.3390/hydrogen2010005>. 2021.

NELLES, David; SERRER, Christian. **Small Gases, Big Effect: This is Climate Change.** Particular Books. ISBN-10: 024146188X. ISBN-13: 978-0241461884. 2021.

YUE, Meiling; LAMBERT, Hugo; PAHON, Elodie; ROCHE, Robin; JEMEI, Samir. **Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges.** Renewable and Sustainable Energy Reviews - Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>. 2021.