



ENSAIOS E ANÁLISES ADICIONAIS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE UMA CÉLULA COMBUSTÍVEL UTILIZANDO HIDROGÊNIO

Ivan Doneda Purificação¹

Claudio E. Ponce Saldias²

Resumo: Este artigo aborda uma análise sobre uma célula combustível experimental realizando os testes necessários para averiguação de seu desempenho. Foi realizado um estudo da arte sobre células combustíveis, apresentando os modelos estudados no artigo, assim adquirindo uma célula combustível de uma pesquisa anterior para complementação de seu estudo. Foram efetuados os testes de bancada para obtenção dos dados e a realização das análises necessárias para estabelecer a resposta da célula e comparando-a com a de outro modelo experimental encontrada no mercado. Os resultados do modelo matemático atenderam aos requisitos e levaram a conclusão que a célula estudada tem apenas uma aplicação educacional.

Palavras-chave: Célula combustível. Hidrogênio. Troca de prótons. Eletrolise.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de geração de energia são objetos de inúmeros estudos aplicados especificamente com o intuito de os tornarem cada vez menos poluentes e mais eficazes. Mas trata-se de uma tarefa complexa em um mundo capitalista, já habituado com a produção do modo mais fácil e rentável. O mercado por inúmeros fatores necessita de novas iniciativas, mas os pesquisadores desta área específica da engenharia encontram entraves e barreiras para aplicarem suas ideias e teorias inovadoras.

Atualmente, os métodos de geração de energia estão focados no sentido de produzir energia em grande quantidade, como usinas fotovoltaicas ou eólicas. Infelizmente essas não são as únicas soluções, e sozinhas, as respectivas usinas não resolverão os problemas ambientais causados por energias não renováveis e o enorme aumento da demanda de energia utilizada pelo consumidor. Geração de energia em pequenas escalas, mas para uma gama de usuários muito grande também tem uma influência muito importante na sociedade em geral.

¹ Graduado em Engenharia Elétrica, Faculdade Satc. E-mail: ivan_doneda@hotmail.com

² Professor Faculdade Satc. E-mail: claudio.saldias@satc.edu.br



Nesse contexto, se inserem as células combustíveis, uma forma de transformação de energia de pouca produção, mas que pode substituir com grande potencial as fontes de energia a combustíveis fósseis, pilhas, baterias e pequenos equipamentos eletrônicos, e até mesmo com uma visão mais ampla, dentro de uma planta industrial.

As células combustíveis são uma ótima solução para geração de energia limpa e, com o investimento e apoio necessários ao desenvolvimento e ampliação de novos estudos, pode-se chegar a um nível de eficiência desejável, tanto que seus estudos têm gerado interesse de grandes montadoras de veículos.

O uso do hidrogênio para produção de energia elétrica tem grande importância por não gerar poluentes e ser uma nova área, pode gerar novos estudos e a criação de novas indústrias especializadas nesse tipo de produção de energia. Como o exemplo da geração solar, pouco estudada e aplicada entre os anos de 1980 a 2000, e que seu uso vem crescendo exponencialmente nos últimos anos.

Este trabalho tem por objetivo o estudo em relação a um protótipo experimental para geração de energia limpa por meio de uma célula a combustível, dando continuidade a um estudo, aplicando sobre ele os devidos testes não realizados no mesmo. Apresentando assim o aprendizado e as discussões sobre o tema. Desse modo, desenvolve-se uma pesquisa bibliográfica de caráter qualitativo-experimental.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se um estudo da arte com diversas fontes de informações, expondo a teoria necessária para o entendimento sobre célula a combustível e os testes realizados na mesma.

2.1 CÉLULA COMBUSTÍVEL

A célula a combustível é uma forma de geração de energia, consistindo de um dispositivo eletroquímico, esse que transforma de energia química em energia elétrica e térmica. Para que esse processo se torne contínuo, necessita-se da interação de um combustível e um oxidante (sem que haja combustão). São considerados equipamentos de alta eficiência em comparação a equipamentos que utilizam a combustão para formação de energia [1; 2].



O funcionamento da célula a combustível necessita destes componentes: eletrólito ou membrana, envolvida por dois eletrodos (ânodo e cátodo). A geração de energia acontece quando há a oxidação de um combustível no ânodo e a redução de um oxidante no cátodo [3; 4; 5].

- A primeira etapa do funcionamento ocorre no ânodo, terminal negativo da célula, onde entra o hidrogênio pressurizado, seguindo até o catalisador transformando-se em dois íons de hidrogênio e dois elétrons [6].

- Seguindo para a segunda etapa, os elétrons formados agora percorrem o eletrodo negativo até chegarem ao circuito externo, assim produzindo uma corrente elétrica. O sentido dessa corrente é do ânodo para o cátodo, sendo utilizada para alimentar cargas. As moléculas de hidrogênio (H_2) que não foram transformadas ainda serão realimentadas, para serem novamente quebradas, pois somente íons de (H^+) passaram pelo eletrólito [6].

- Na etapa três, pelo cátodo, terminal positivo, insere-se o gás oxigênio pressurizado, seguindo até o catalisador, assim realizando uma reação com os elétrons de H^+ que passaram pelo eletrólito, assim como os elétrons que passam pelo circuito externo. Esta reação forma a água (H_2O). Nesta etapa é liberada uma quantidade de energia térmica em forma de vapor d'água, esta que pode ser utilizada para outros fins de modo a melhorar a eficiência da célula e evitar desperdícios [3; 6].

2.2 MODELOS DE CÉLULAS

Hoje, existem diversos modelos de células a combustível com a ideia de reagir o hidrogênio com o oxigênio, elas têm o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se no tipo de eletrólito empregado, e, o combustível a ser utilizado em cada uma das células [6].

Cada modelo tem características e aspectos construtivos próprios, sendo apresentados na Quad. 1.



Quadro 1: Modelos de células combustíveis.

Tipo	Denominação em inglês	Denominação em português
AFC	Alkaline fuel cell	Célula a combustível alcalina
PAFC	Phosphoric acid fuel cell	Célula a combustível de ácido fosfórico
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell	Célula a combustível de membrana de troca de prótons
DMFC	Direct methanol fuel cell	Célula a combustível de metanol direto
MCFC	Molten carbonate fuel cell	Célula a combustível de carbonato fundido
SOFC	Solid oxide fuel cell	Célula a combustível de óxido sólido
Z AFC	Zinc-air fuel cell	Célula a combustível de zinco-ar
RFC	Regenerative fuel cell	Célula a combustível regenerativa

Fonte: [3]

Dentre estas se destaca a PEMFC (modelo utilizado neste estudo), DMFC (Mesmo funcionamento da PEMFC, alterando apenas o combustível utilizado) e a RFC (funcionamento inverso ao da PEMFC, tendo os gases como produto final).

2.3 CÉLULA COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA DE TROCA DE PROTONS

A PEMFC (Célula combustível de membrana de troca de prótons) se destaca pela sua simplicidade construtiva e de funcionamento. Constituem-se de uma membrana sólida, feita com um polímero permeável a prótons quando colocado com água, mas não conduzindo elétrons. [3].

O hidrogênio é o combustível utilizado para geração de energia nesta célula a combustível, tendo o íon de hidrogênio como transportador de carga. Seu funcionamento se dá de forma que no ânodo a molécula de hidrogênio se divide em duas partes, íons de hidrogênio e elétrons, assim os íons atravessam o eletrólito até o cátodo na medida em que os elétrons passam pelo circuito externo, gerando energia. O oxigênio do ar é inserido ao cátodo, combinando-se com elétrons e íons de hidrogênio, formando água [1; 6].



2.3.1 Aplicações

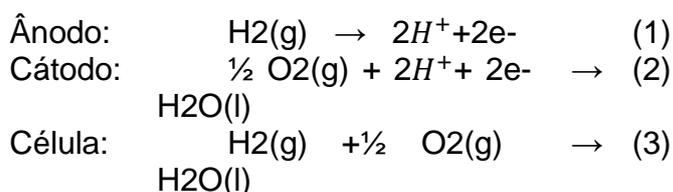
As aplicações das células combustíveis vão muito além do que somente em automóveis para reduzir o consumo de combustíveis; estas podem ser utilizadas também, em quaisquer equipamentos, estacionários ou não, que utilizem pilhas e/ou baterias como forma de fornecimento de energia, bem como equipamentos que, na falta de energia elétrica da rede, conseguem se manter ativos, aplicando-lhes as células para evitar a interrupção do trabalho realizado pelos mesmos [9].

A Nissan Motor Co. revelou, em 2016, o primeiro protótipo de carro movido 100% com tecnologia de célula a combustível alimentado por etanol. Desse modo, o carro tem autonomia de 600 km, emitindo apenas carbono neutro, não poluindo o meio ambiente, com o mesmo torque de um motor fóssil comum, com condução silenciosa e pouca manutenção de um carro elétrico.

Outra forma de geração é a estacionária, que pode ser entendida como a produção de energia próxima do local de consumo, a qual pode ser utilizada em residências, indústrias, hospitais, centros comerciais e outras edificações, tendo como principal função, a redução no consumo de energia elétrica da rede, ou funcionar como um gerador em ocorrências de falta de energia [7].

2.3.2 Especificação do Funcionamento da PEMFC

Para esta conversão de energia ocorrer em uma PEMFC, é necessária a água, para que a partir da eletrólise, dê origem ao hidrogênio, possibilitando a oxidação do mesmo no ânodo (1), já no cátodo, ocorre a reação de redução do oxigênio (2). Como resultado da reação química da célula tem-se a formação de água (3), além da liberação dos elétrons e da geração de calor. As reações ocorridas são as seguintes [10]:



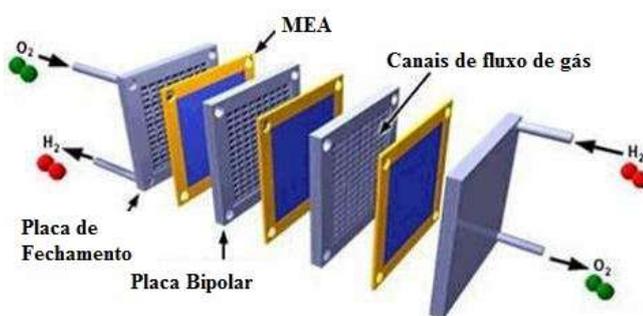
Para que ocorra esta reação, faz necessário o uso de um catalisador, que irá realizar a quebra das ligações químicas no cátodo [10].

2.3.3 Estrutura da PEMFC

A estrutura segue o mesmo princípio independentemente do tamanho e potência fornecida pela mesma, em células com potência em valores de KW são construídas com componentes maiores e também se acopla várias células para a formação de uma pilha a combustível, que será o mesmo que uma célula de grandes proporções de geração.

A célula combustível é uma placa formada por diversas camadas, estas que estão compactadas e seladas para que não ocorra nenhum tipo de vazamento ou perdas. A seguir, exemplificam-se as partes constituintes da célula na Fig. 1.

Figura 1: Estrutura da célula a combustível.



Fonte: [12]

Como indicado, as partes constituintes são: conjunto membrana eletrodo (MEA) - nela se cita a membrana polimérica, eletrodos, catalisador, membrana difusora de gás – placas bipolares e placas de fechamento. Estas que serão abordadas a seguir [13].

2.4 CONJUNTO MEMBRANA ELETRODO (MEA)

Tendo como principal objetivo, para geração de energia, a interação do hidrogênio e o oxigênio no processo da célula, a PEMFC é constituída pelo conjunto membrana eletrodo (MEA), o qual terá esta função de decompor este hidrogênio em prótons e elétrons e permitir a passagem dos prótons por ela, ou seja, é o principal componente da célula [10].

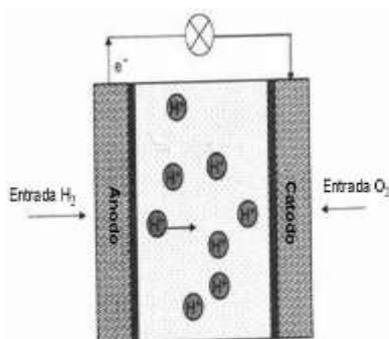
Como a reação entre o hidrogênio e o oxigênio não inicia espontaneamente, necessita-se do catalisador. Assim, irá acelerar a reação de oxidação do hidrogênio e

a redução do oxigênio. A platina é o elemento que forma o catalisador mais eficiente para estes tipos de célula, assim, portanto é colocada sobre o carbono poroso da MEA [1, 12].

A platina é o componente que mais encarece a construção da célula a combustível por ser um metal raro. Dessa forma, quanto menor for a necessidade de sua utilização, melhor será o custo, o que depende de um estudo para estabelecer o custo-benefício da quantidade a ser usada para máxima eficiência, com menor custo [13].

Os eletrodos são outra parte da MEA, neles são injetados o hidrogênio e o oxigênio para que ocorra a decomposição para geração de energia. Esses são formados por um material condutor elétrico poroso, o mais utilizado é o carbono, tendo a função de conduzir os elétrons e ser permeável aos gases. O ânodo e o cátodo são os dois eletrodos constituintes da célula e que serão prensados da membrana de *Nafion* [7; 12].

Figura 2: MEA (Membrane Electro de Assembly).



Fonte: [12]

É possível identificar os eletrodos na região escura e na região transparente identifica-se uma parte da MEA com a função de isolamento entre o ânodo e o cátodo [5].

2.5 PLACAS BIPOLARES

As placas bipolares são constituídas por um material condutor, o qual tem a função de coletar os elétrons gerados na oxidação do hidrogênio e transportá-los, isso gera corrente elétrica. A opção mais recomendada é a utilização de materiais



impermeáveis aos gases (para não ocorrer perdas), bons condutores de eletricidade, que sejam resistentes e com pouco peso [4; 8; 14].

O grafite é o material mais utilizado na fabricação dessas placas, para PEMFC e DMFC, mas isso requer grande cuidado ao manuseá-lo, pois é um material pouco resistente e de difícil manuseio em sua usinagem. Outro material que vem sendo estudado como substituto do grafite é o aço inoxidável, por suprir as deficiências encontradas no grafite [13; 14].

2.6 PLACAS DE FECHAMENTO

As placas de fechamento têm a função de exercer uma pressão na célula combustível para manter a estrutura, manter os contatos e selar a célula para evitar perdas ou vazamento dos gases e combustíveis. São duas placas, uma em cada extremidade da célula e é por meio delas que ocorre a injeção do combustível, bem como do oxigênio [14].

2.6.1 Eficiência da Célula Combustível

Para analisar o funcionamento da célula e sua eficiência aplica-se o conceito de energia livre de Gibbs (ΔG), que por definição é o total de energia associada a um sistema termodinâmico disponível para realizar trabalho útil.

Sabe-se que ΔG está relacionada com o trabalho útil do sistema, sendo aplicado para o trabalho elétrico (W_{el}) gerado pela célula chega-se a (4).

$$W_{el} = -\Delta G \quad (4)$$

Sendo que trabalho elétrico é definido pela multiplicação da carga (q) que circula durante a reação e a tensão da célula (5). Esta carga pode ser encontrada multiplicando o número de mols de elétrons (n) vezes a constante de Faraday (F), como mostrado a seguir (6).

$$W_{el} = q * V \quad (5)$$

$$q = n * F \quad (6)$$

Com as três equações descritas realizam-se as substituições necessárias encontrando (7), sendo que V é a tensão gerada no sistema.



$$\Delta G = -n * F * V \quad (7)$$

Aplicando os valores nesta equação, chega-se a um valor de 1,482 V de tensão teórica da célula, sendo este um valor sem considerar nenhuma perda no sistema.

A eficiência térmica de um aparelho de conversão de combustível é definida por (8), que é a relação entre a quantidade de energia produzida e a variação de entalpia (Δh).

$$\eta = \frac{\text{energia}}{\Delta h} \quad (8)$$

Aplicando valores padrões de temperatura (25°) e pressão (1 atm), a energia livre de trabalho equivale a 237,1 KJ/mol e a variação de entalpia é 285,8 KJ/mol, chegando a uma eficiência de (9):

$$\eta = \frac{237,1}{285,8} = 0,83 \quad (9)$$

De uma forma direta, a equação do rendimento de uma célula combustível, considerando suas perdas e um rendimento esperado de 83% é (10):

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{Potência}}{\Delta G / 0,83} \\ &= \frac{V_{\text{real}} * \text{Corrente}}{V_{\text{ideal}} * \text{Corrente} / 0,83} \quad (10) \\ &= \frac{0,83 * V_{\text{real}}}{V_{\text{ideal}}} \end{aligned}$$

Essa formulação matemática é considerada ideal para uma célula combustível, mas levam-se em consideração os valores estáveis de tensão por carga durante os cálculos, fato que não ocorrerá neste estudo como será mostrado posteriormente.

2.6.2 Consumo de Gases

A corrente drenada pela célula está relacionada com o consumo de hidrogênio, já que este é a única fonte de elétrons do sistema. Sabendo que a carga



elétrica é dada pela Eq. (6) e multiplicando pelo número de mols de hidrogênio (no caso 1) e aplicando a forma diferencial, chega-se a (11):

$$I = 2F * \delta H_2 \text{ A/s} \quad (11)$$

Onde I é corrente elétrica e δH_2 é taxa de consumo de hidrogênio. Agora multiplicando este valor pela massa molar do hidrogênio, obtêm-se a fórmula da taxa de consumo de hidrogênio em Kg/s (12).

$$\delta H_2 = \frac{I * M_{H_2}}{2F} \text{ Kg/s} \quad (12)$$

Analogamente o consumo de oxigênio se realiza da mesma forma, salvo uma alteração estequiométrica (13).

$$\delta O_2 = \frac{I * M_{O_2}}{4F} \text{ Kg/s} \quad (13)$$

Aplicando o valor da corrente para a máxima potência da célula pode-se identificar o quanto à célula consome de gases para seu melhor funcionamento.

2.6.3 Identificação do Sistema

Uma das formas de identificar um sistema é a criação de um modelo matemático que apresenta as principais características durante sua utilização para obter-se um diagnóstico, controle e melhorias deste sistema. O modelo de um sistema resume-se em uma equação matemática com o intuito de compreender e posteriormente prever como o sistema se comporta sobre determinadas situações.

A identificação experimental é um segmento no modelo matemático o qual utiliza dados de entrada e saída para formação de um modelo aproximado, podendo assim elaborar a função transferência, correspondente ao comportamento do sistema.

2.6.4 Correlação e Regressão de Variáveis

O estudo de correlação e regressão se baseia em verificar se duas ou mais variáveis tem algum relacionamento entre si, isto é, se valores altos ou baixos de uma influenciam em valores altos ou baixos de outra. Constatando esta relação, se obtêm



o grau desta influência, a condição dela e a sua classificação, por exemplo, constatar se a temperatura de um gerador influencia na sua transformação de energia.

Este é um método importante para este estudo, com viabilidade de aplicação na relação entre carga e eficiência de uma célula combustível. Sendo estudado a seguir.

3 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

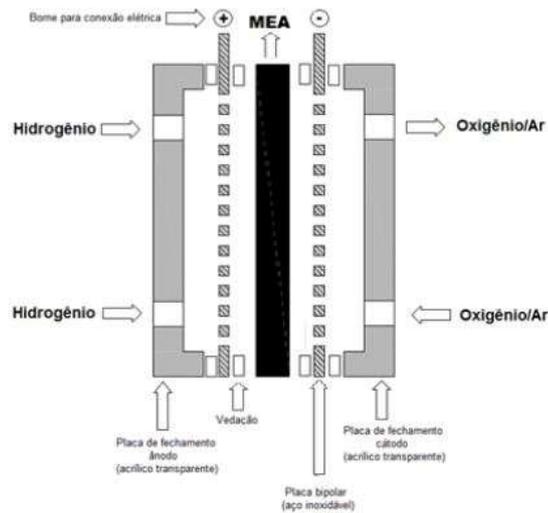
Neste capítulo, serão exemplificados - de forma técnica e prática - os termos estudados na fundamentação teórica, abordando a metodologia utilizada para a realização do trabalho, assim como os requisitos para os ensaios do protótipo experimental de uma célula a combustível tipo PEMFC, bem como, as escolhas adequadas para a realização do mesmo e, finalizando, apresentam-se os testes efetuados no procedimento experimental para a comprovação da fundamentação estudada.

Serão apresentados no desenvolvimento dos ensaios as etapas do projeto, a concepção e explanação dos materiais utilizados, a montagem e análise destes materiais e os problemas enfrentados durante o processo.

3.1 PROTÓTIPO EXPERIMENTAL UTILIZADO

Após o estudo sobre as células, foi reutilizado de um estudo anterior, uma célula experimental do tipo PEMFC que servirá de base para a realização dos testes. A Fig. 3 apresenta o esquema desta célula.

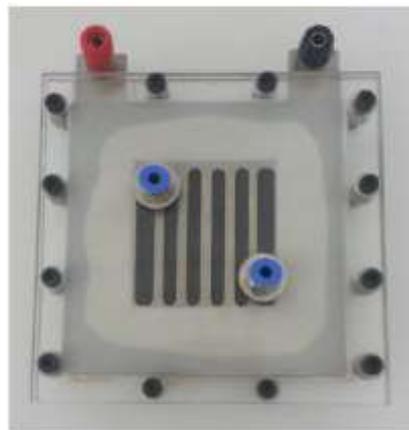
Figura 3: Estrutura de uma célula combustível.



Fonte: Adaptado de [10]

O processo de montagem dos componentes é realizado em forma de bloco sobrepondo um ao outro e gerando pressão neles através de parafusos em suas laterais (Fig. 4).

Figura 4: Protótipo Adquirido.



Fonte: [3]

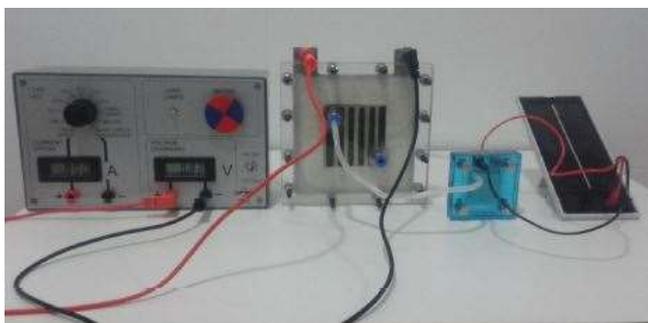
A figura mostra a célula utilizada nos testes, adquirida de um estudo anterior no qual houve a construção do protótipo, mas sem a realização dos devidos testes.

3.2 TESTE INICIAL

Para a realização dos ensaios, o primeiro processo consiste em aplicar o combustível hidrogênio e o oxigênio na PEMFC, verificando, por meio de um multímetro, se há geração de corrente entre os terminais ânodo e cátodo da célula, o

valor obtido deve ser igual ou muito aproximado dos testes iniciais realizados em estudo anterior, se não obtiver resultados esperados, volta-se à montagem do ensaio para averiguação e correção dos problemas. A Fig. 5 apresenta os equipamentos utilizados no teste inicial, que também serão utilizados nos demais testes.

Figura 5: Equipamentos utilizados em teste básico.



Fonte: Adaptado de [3]

A imagem apresenta o painel de teste (um voltímetro e um amperímetro), a PEMFC, o minieletrólizador e um painel voltaico. Estes são os componentes para um teste básico de funcionamento deste protótipo tendo o painel de testes substituindo um multímetro.

3.3 ENSAIOS PARA COLETA DE DADOS

Com a geração de energia ocorrendo como esperado, serão realizados os ensaios para coletar os dados, indispensáveis para a realização do modelo dinâmico aproximado da célula, assim como para comparação com os outros modelos pesquisados.

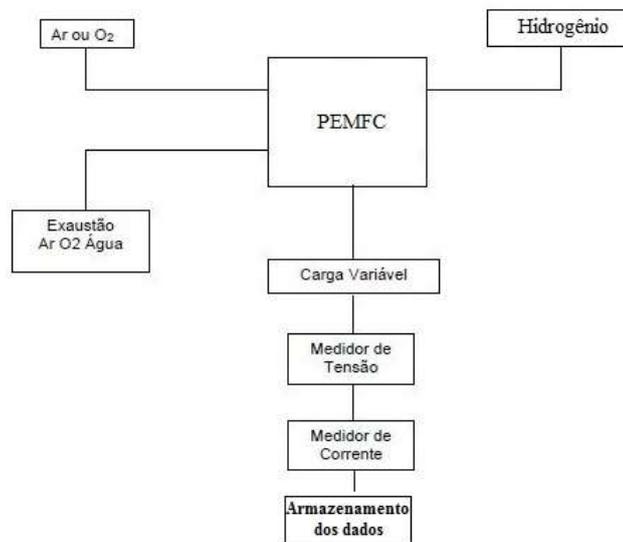
A medição é realizada por intermédio de dois multímetros, estes receberão os dados e enviarão para seu software de armazenamento de dados via computador, o qual organizará os dados no programa *excel*.

3.3.1 Ensaio de Degrau Unitário e Eficiência

O ensaio de degrau unitário consiste em aplicar um degrau unitário no protótipo (via injeção de combustível) e através de resistores associados, realizar a coleta de corrente e tensão nos terminais dos eletrodos. Assim, com a leitura inicial, final e máxima do período total de ensaio, pode-se encontrar uma função de

transferência em função da resposta da célula, a Fig. 6 apresenta o diagrama do ensaio realizado.

Figura 6: Fluxograma de ensaio.



Fonte: Do autor (2018)

A duração do ensaio varia até que a célula entre em modo estável de geração, sempre iniciando o processo novamente para cada valor de resistência aplicado. Para fins de comparação, os testes serão realizados com diferentes valores de resistência e com circuito aberto. Tendo como objetivo analisar não somente a amplitude gerada, mas também o tempo de resposta do protótipo e a relação entre energia gasta e produzida pela PEMFC.

O teste de eficiência será realizado com os mesmos dados coletados no ensaio anterior, tendo como diferença a análise feita sobre ele futuramente.

4 RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos resultados originados dos testes anteriores, os dados encontrados serão apresentados a seguir, bem como o estudo matemático sobre eles.

4.1 RESULTADOS ENCONTRADOS

Após a realização do teste de degrau unitário os valores máximos (obtidos após a estabilização do sistema) de tensão, corrente, potência e carga foram organizados na Tab. (2) a seguir:

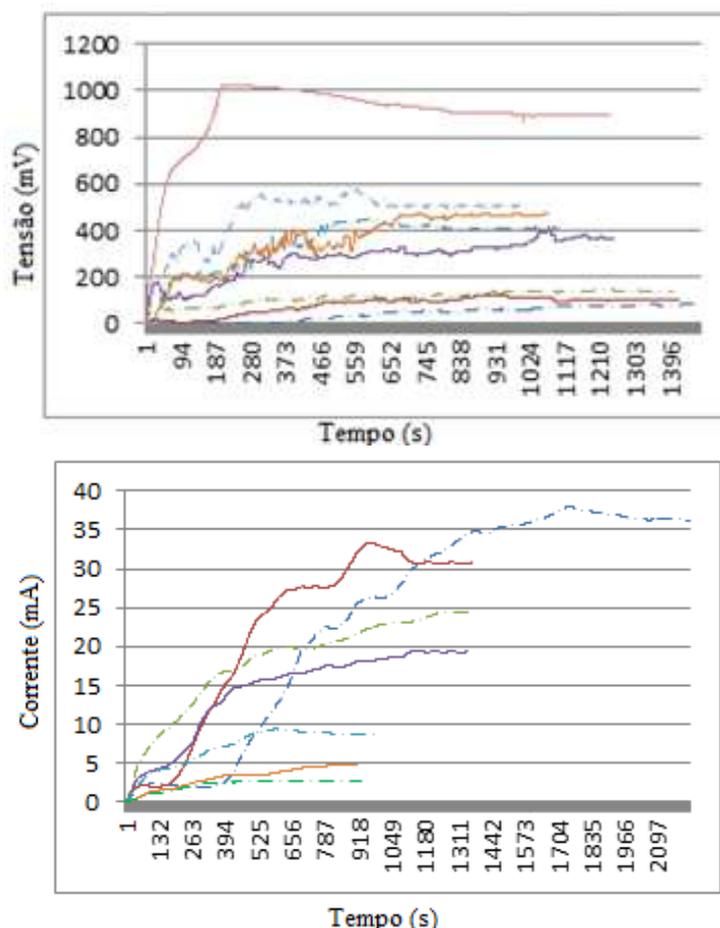
Tabela 1: Valores máximos das variáveis.

Carga (Ω)	Tensão (mV)	Corrente (mA)	Potência (mW)
Sem Carga	896	0	0
1	83,6	37,9	3,16
3	105	33,39	3,50
5	136	24,42	3,32
10	368	19,46	7,16
50	410	9,39	3,85
100	464,8	4,7	2,18
200	520	2,63	1,36

Fonte: Do autor (2018)

Para uma melhor avaliação do sistema e para realizar o estudo matemático foram aplicados filtros nas curvas de corrente e assim geram-se os gráficos de tensão e corrente no tempo (Fig. 7).

Figura 7: Gráficos de tensão e corrente.



Fonte: Do autor



Se comparado com o estudo anterior, a variação dos resultados se dá pelo fato do método de testes e os equipamentos de medições serem diferentes. Outro fato é por ser um sistema de baixa densidade de potência, qualquer interferência aplicada nele pode variar seu resultado final.

4.2 RELAÇÃO CORRENTE POR CARGA

Tendo o resultado de degrau unitário gerado, pode-se aplicar um estudo matemático para identificação da função transferência da resposta do funcionamento do protótipo, verificando assim o modelo dinâmico da mesma.

Para dar início a construção desta análise é necessário verificar a relação entre corrente e carga. O objetivo desta relação é produzir uma equação (14) que indique a resposta da corrente do sistema pelo tempo, dessa forma foi realizada uma aproximação de primeiro grau, por esta já gerar um bom resultado.

$$I = max - (max * e^{-\beta T}) \quad (14)$$

Onde:

B = polo do sistema;
max = máxima corrente; e
T = tempo

Para obter o polo da equação, é necessário verificar o tempo de resposta para que cada carga aplicada atinja o máximo valor de corrente de seu funcionamento, assim cria-se um gráfico via *excel* aplicando o recurso regressão de curva, o qual irá gerar uma equação que indicará a relação entre carga e tempo, estas atuando na corrente do sistema (15).

$$\beta = 0,0027 * R^{0,215} \quad (15)$$

A próxima etapa é encontrar uma equação para a máxima corrente em relação à carga. Gerando assim um gráfico entre estas duas variáveis, encontrando qual o valor de carga (ζ) terá 36% do valor máximo de corrente do sistema. O valor encontrado é de 27 Ω , com isso aplica-se em (16).

$$\begin{aligned} Max &= max * e^{-\frac{1}{\zeta} * R} \\ Max &= max * e^{-\frac{1}{27} * R} \end{aligned} \quad (16)$$



O processo continua construindo um gráfico com a equação anterior, utilizando as cargas do sistema, aplicando novamente o recurso de regressão de curva para encontrar uma equação que corresponda ao valor máximo de corrente para cada carga aplicada. Neste estudo foram aplicadas no recurso regressão, equações logarítmicas e de potência, com a justificativa de que estas geraram as melhores aproximações dos valores encontrados na prática, equações polinomiais e exponenciais não produziram resultados satisfatórios. As equações encontradas são mostradas a seguir:

$$\text{Max log} = 37,69 - 7,011 * \ln(R) \quad (17)$$

$$\text{Max pot} = 51,87 * R^{-0,509} \quad (18)$$

Com estas equações montou-se a Tab. 3 para verificação de qual das duas é melhor para a utilização no estudo.

Tabela 2: Valores máximos de corrente.

Carga (Ω)	Max log	Max Pot.	Max Medida
1	37,69 mA	51,87 mA	37,69 mA
3	29,98 mA	29,65 mA	33,39 mA
5	26,40 mA	22,86 mA	24,42 mA
10	21,54 mA	16,06 mA	19,46 mA
50	10,26 mA	7,08 mA	9,39 mA
100	5,40 mA	4,97 mA	4,7 mA
200	0,54 mA	3,49 mA	2,63 mA

Fonte: Do autor (2018)

Continuando o estudo de degrau unitário, já com a equação que responde melhor ao sistema, aplicam-se as variáveis anteriores em (14) para encontrar a resposta da corrente em relação à carga do sistema estudado (19).

$$I(t) = [37,69 - 7,011 * \ln(R)] * [1 - e^{-t(0,0027 * R^{0,215})}] \quad (19)$$

Para encerrar a análise, e realizar a transformação da resposta do sistema no tempo, para uma resposta na frequência, aplica-se (20) para formação da função transferência do sistema.

$$G(S) = \frac{K}{S + \beta} \quad (20)$$

Onde



S= variável em função da frequência;
K= B*maxlog

Resolvendo (20) obtêm-se (21):

$$G(S) = \frac{[0,0027R^{0,215} * (37,69 - 7,011 * \ln(R))]}{S + 0,0027 * R^{0,215}} \quad (21)$$

Com as equações encontradas, podem-se gerar as tabelas com os resultados, originar os gráficos de cada uma e realizar as análises necessárias.

A função transferência encontrada corresponde a um sistema de primeira ordem, pois este já gerou resultados satisfatórios para este estudo. Um sistema de segunda ordem não foi considerado ideal para aplicação, por gerar empecilhos desnecessários, os quais dificultariam a melhoria dos rendimentos para a aproximação do sistema.

4.3 RELAÇÃO TENSÃO E POTÊNCIA POR CARGA

Considerando a célula combustível uma carga puramente resistiva, podemos encontrar a resposta da tensão do sistema utilizando a lei de Ohm ($V = I * R$), assim encontra-se a Eq. (22).

$$E(t) = R * \left[[37,69 - 7,011 * \ln(R)] * \left[1 - e^{-t(0,0027 * R^{0,215})} \right] \right] \quad (22)$$

Com estas novas equações foram realizadas as análises das variáveis elétricas do sistema.

4.3.1 Eficiência da Célula

Com os valores de tensão armazenados e tratados, pode-se verificar a eficiência da célula combustível para cada valor de resistência aplicada a ela, e também sem nenhuma carga aplicada.

Aplicando (10) gerou-se a Tab. 4, como mostrado a seguir:



Tabela 3: Eficiência da célula combustível.

Carga (Ω)	Tensão (mV)	Energia (KJ)	Eficiência (%)
1	83,6	16,13	5,65
3	105	20,26	7,09
5	136	26,24	9,18
10	368	71,01	24,85
50	410	79,12	27,69
100	464,8	89,69	31,39
200	520	100,34	35,12
Sem carga	896	172,90	60,51

Fonte: Do autor (2018)

Outro valor aplicado a esta tabela é o valor de energia produzida (trabalho elétrico) que foi encontrada através de (7).

4.3.1 Resultados Gerados pelos Gases

As equações de consumo de gases (12 e 13) proporcionaram a elaboração da Tab. 5, que expõe o consumo de hidrogênio e oxigênio, aplicando diferentes cargas no circuito.

Tabela 4: Consumo de gases.

Carga (Ω)	Hidrogênio (g/s)	Oxigênio (g/s)
1	$0,397 \times 10^{-6}$	0,198
3	$0,350 \times 10^{-6}$	0,175
5	$0,256 \times 10^{-6}$	0,128
10	$0,204 \times 10^{-6}$	0,102
50	$0,098 \times 10^{-6}$	0,049
100	$0,049 \times 10^{-6}$	0,025
200	$0,028 \times 10^{-6}$	0,014

Fonte 1: Do autor (2018)

5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Nesta etapa inicia-se a análise dos ensaios realizados, obtendo os dados para verificação da teoria e comparação com outros protótipos experimentais. Assim espera-se obter os resultados



5.1 EFICIÊNCIA DA CÉLULA

A célula combustível utilizada neste estudo por ser um protótipo experimental acabou demonstrando desempenho inferior a outros modelos comerciais. Este fato ocorre pela baixa potência dissipada pela mesma quando aplicadas cargas sobre ela.

Mesmo sem cargas aplicadas seu rendimento ficou em aproximadamente 63%, ainda não se aproximando do valor teórico, isso ocorre pelas perdas internas de uma célula combustível, que não são consideradas no cálculo teórico. Perdas por ativação, concentração e perdas ôhmicas ocorrem no interior da célula, as quais gerem a resposta de seu funcionamento.

Leva-se em consideração também, que a construção do protótipo não visa aplicação de cargas para uso prático e funcional da mesma, mas sim para um estudo de como ele se comporta durante o tempo, após a injeção de combustível. Tendo o resultado desta resposta em forma de equação, em futuras pesquisas na área, este artigo irá auxiliar para uma melhor compreensão da resposta e como encontrá-la.

Outro fato importante a ser destacado é que a formulação matemática aplicada às células combustíveis considera que o protótipo irá suprir às cargas aplicadas a ele, mantendo uma tensão aproximadamente estável, independente do valor de carga aplicado, variando apenas a corrente consumida pela carga. Como isto não ocorreu, a tensão varia muito, tendo um rendimento extremamente baixo às resistências que demandam maiores correntes.

5.2 ESTUDO SOBRE OS GASES

O consumo de gases está relacionado com a corrente drenada pela carga, ou seja, quanto menor a carga, a corrente aumenta e conseqüentemente aumenta o consumo de gás.

Para ponto de partida desta análise, o valor utilizado será o consumo onde apresenta a maior potência do sistema, onde se tem um consumo de 0,204 g/s de hidrogênio.

Verificando através de seu datasheet, o eletrolisador injeta uma quantidade de 2,1 ml/s de H_2 isso implica em um valor de 0,445 J/s de energia a ser gerada. Com os



0,204 g/s consumidos pelo protótipo gera-se uma energia de 0,0286 J/s obtendo assim a eficiência de consumo de gás em (23):

$$\eta = \frac{0,0286}{0,445} * 100\% = 6,42\% \quad (23)$$

Este valor refere-se ao consumo de hidrogênio instantâneo no sistema, mas isso não implica em um desperdício do resto. O restante do valor de hidrogênio ainda fica dentro do sistema e assim que a injeção de gás for interrompida, esta sobra será utilizada.

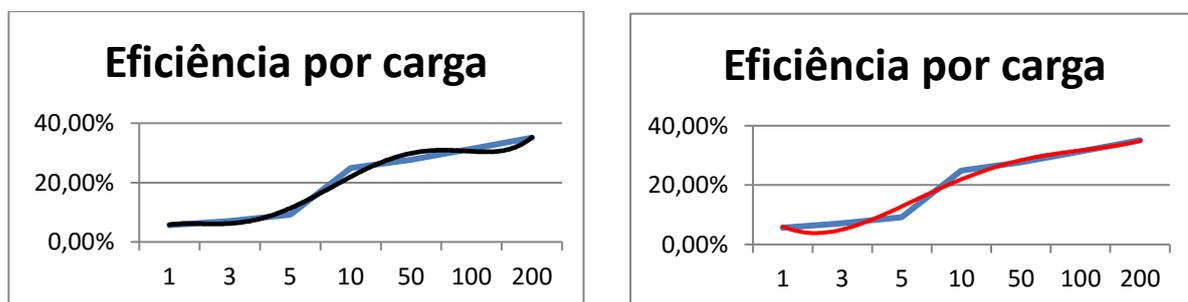
Esse baixo aproveitamento de consumo de gás instantâneo implica na baixa eficiência elétrica do sistema, se caracterizando como um dos fatores que fazem com que a célula não supra a densidade de corrente drenada pelas cargas. Se o consumo de hidrogênio fosse maior, a movimentação de elétrons aumentaria, atingindo melhores resultados de corrente e potência gerados.

5.3 ESTUDO SOBRE AS VARIÁVEIS

Sabe-se que a eficiência da célula é uma variável que depende da tensão e corrente gerada com o gasto de energia necessário para que esta geração ocorra. Assim, foi realizado um estudo novamente utilizando a prática de correlação e regressão, para identificar uma equação que gere uma resposta da relação entre a carga aplicada e a eficiência da célula.

Utilizando os dados da tab. 3 criou-se um gráfico e aplicou-se duas vezes o método de regressão apresentado na Fig. 8.

Figura 8: Gráficos de regressão de variáveis.



Fonte: Do autor (2018)

Analisando os gráficos e o método de regressão, extraem-se os dados, os quais apontam que cargas abaixo de 30 Ω , o melhor resultado é (24) enquanto para valores acima de 30 Ω o melhor resultado é (25).

$$R < 30$$

$$\eta = 0,001R^5 - 0,0192R^4 + 0,126R^3 - 0,3455R^2 + 0,4149R - 0,1193 \quad (24)$$

$$R > 30$$

$$\eta = 0,0015R^4 + 0,0273R^3 - 0,1711R^2 + 0,3548R - 0,2704 \quad (25)$$

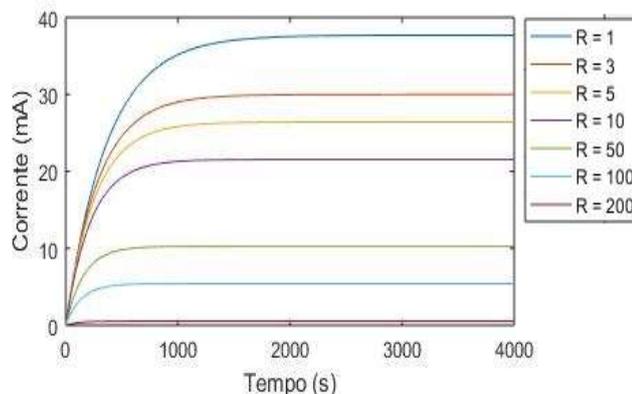
O valor do coeficiente de determinação é respectivamente 97,91% e 97,12%, sendo assim, uma ótima aproximação, confirmando que estas equações podem ser utilizadas para aplicação prática sobre a célula.

5.4 ANÁLISE DA RESPOSTA DA CORRENTE

Realizado o ensaio de degrau unitário realizado, pode-se aplicar um estudo matemático para identificação da função transferência da resposta do funcionamento do protótipo, verificando assim o modelo dinâmico da mesma.

Aplicando (19) no software *Octave* cria-se o gráfico das curvas de corrente pra cada carga.

Figura 9: Gráfico da resposta da corrente.



Fonte: Do autor (2018)

Aplicando a mesma equação montou-se a Tab. 6.



Tabela 6: Resultados da resposta da corrente.

Carga (Ω)	Tempo de Estabilidade (s)	I Calculada (mA)	I Medida (mA)
1	3339	37,69	37,69
3	2770	29,99	33,39
5	2622	26,41	24,42
10	2207	21,55	19,46
50	1200	10,26	19,39
100	1271	5,403	4,7
200	1200	0,5435	2,63

Fonte: Do autor (2018)

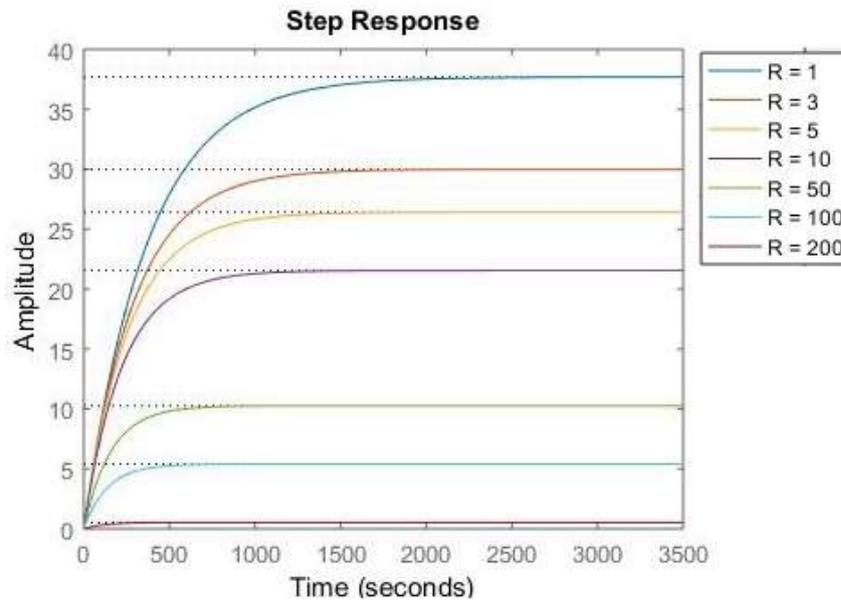
Realizando a análise do gráfico e da tabela verifica-se que a equação encontrada para a aproximação de valores teóricos e valores reais tem um pequeno erro para a maioria das cargas, importante ressaltar que, estes erros estão na casa de miliampères. Assim, os estudos da corrente pelo tempo atingem resultados satisfatórios para a análise desta célula.

Como o valor de erro de (17) para a carga de 200 Ω é muito grande, esta é a única carga que a corrente não atinge um valor teórico aproximado do valor real. Se aplicarmos (18) para encontrar o máximo valor de corrente, o resultado do seu erro é menor para este caso, sendo uma aproximação melhor a ser realizada. Porém, como este é um ponto fora da curva e a equação de resposta é uma só, este valor pode ser desconsiderado.

Anteriormente foi demonstrada a comprovação de que (19) gerou uma boa aproximação de resposta do sistema em função do tempo. O próximo passo é analisar se a equação em função da frequência também irá gerar tal aproximação.

Aplicando (21), o gráfico originado é mostrado na Fig. 9:

Figura 8: Gráfico da função transferência.



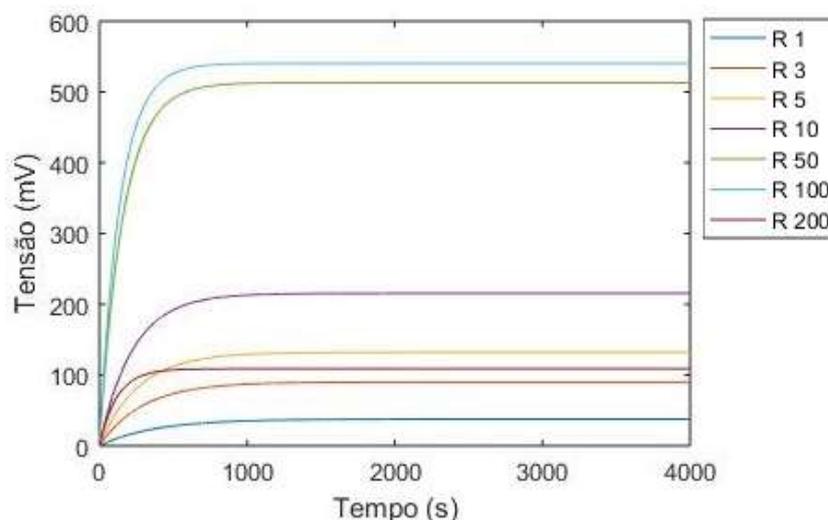
Fonte 2: Do autor (2018)

Como verificado anteriormente, a função transferência também obteve um ótimo resultado, mostrando a resposta do funcionamento da célula combustível em função de cada carga aplicada e tendo como erro a curva para a carga de 200 Ω .

5.5 ANÁLISE DA RESPOSTA DA TENSÃO

Os mesmos processos realizados anteriormente foram aplicados para a tensão, aplicando (22) obteve-se o seguinte gráfico (Fig. 11).

Figura 11: Gráfico da resposta da tensão.



Fonte: Do autor (2018)



Gerou-se novamente uma tabela, desta vez com a resposta da tensão do sistema. Tab. 7.

Tabela 7: Resultados da resposta da tensão.

Carga (Ω)	Tempo de Estabilidade (s)	Tensão Calculada (mV)	Tensão Medida (mV)
1	2933	37,68	83,6
3	2783	89,96	105
5	1988	132	136
10	2161	215,5	308
50	1396	513,1	410
100	1312	540,8	464,8
200	948	108,7	520

Fonte 3: Do autor (2018)

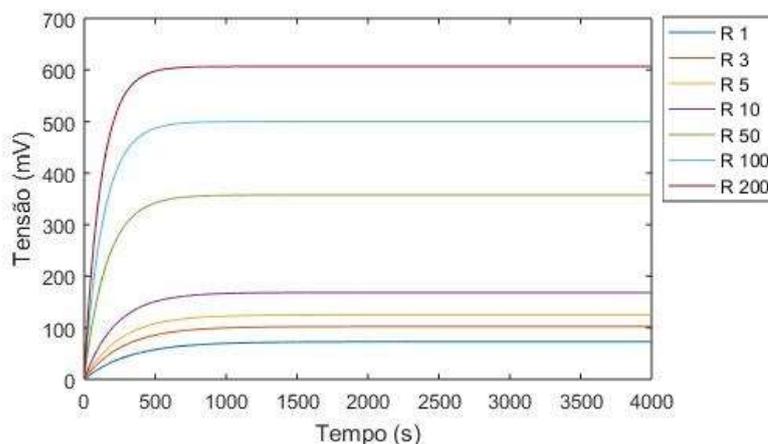
Analisando os resultados encontrados, verifica-se que para a tensão, a resposta do sistema tem dois pontos fora da curva (com a carga em 200 Ω e 10 Ω), novamente pontos os quais o erro de (17) foi muito grande, aplicando (18) para a respostas de máxima tensão como anteriormente obteve-se a resposta que o sistema daria para este caso. A tensão para a carga de 200 Ω se aproxima de uma melhor forma do valor real, assim como uma resposta decrescente para os valores de tensão conforme ocorre o aumento de corrente, fato que não ocorreu anteriormente.

As análises justificam que para a resposta de tensão do sistema, a melhor formula que corresponde a ela é (18), implicando assim em um resultado diferente (26).

$$E(t) = \left[R * [51,87 * R^{-0,509}] * \left[1 - E^{-t*(0,0027*R^{0,215})} \right] \right] \quad (26)$$

Assim plota-se o gráfico e a tab.8 a seguir: (Fig. 12)

Figura 12: Gráfico da segunda resposta da tensão.



Fonte: Do autor (2018)

Tabela 8: Resultados da resposta da tensão.

Carga (Ω)	Tempo de Estabilidade (s)	Tensão Calculada (mV)	Tensão Medida (mV)
1	3258	72,9	83,6
3	2857	102,5	105
5	1889	125	136
10	2161	168,4	308
50	1380	357,5	410
100	1358	500,1	464,8
200	1287	606,8	520

Fonte: Do autor (2018)

Com os dados tabelados comprova-se que a tensão respondeu melhor a (26), gerando uma aproximação melhor e com um erro menor. Bem como no gráfico, a ordem natural e esperada das curvas, teve um resultado correto, decrescente conforme a carga diminui.

5.6 COMPARAÇÃO ENTRE PROTÓTIPOS

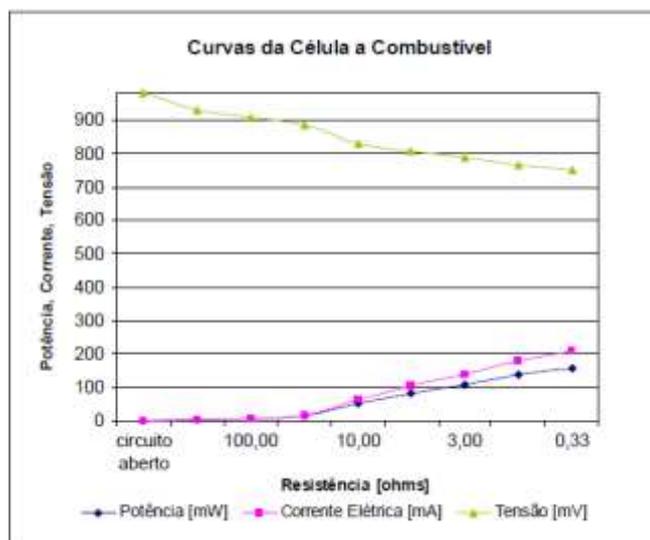
Para verificação e validação das teses elaboradas, foi aplicada uma comparação entre um protótipo comercial e o protótipo experimental deste estudo.

Uma célula combustível comercial, tem por objetivo conseguir suprir uma densidade de corrente requerida a uma certa faixa de cargas, isso ocorre pela fabricação com excelência, não apresentando perdas além das quais já ocorrem no

seu funcionamento teórico, ou seja, as únicas perdas do sistema serão as já estudadas (perdas de ativação, ôhmicas e de concentração).

Sendo assim ao aplicarmos uma carga sobre esta célula, ela drenará uma corrente e sua tensão não irá decair muito como mostrado na Fig. 13.

Figura 13: Gráfico obtido no ensaio.



Fonte: [6]

Os dados podem ser mais bem analisados na demonstração da tab. 9 e da Fig. 14 a seguir:

Tabela 9: Valores medidos nos ensaios.

Carga (Ω)	Tensão (mV)	Corrente (mA)	Potência (mW)
1	765	179,5	137,32
3	790	138,6	109,49
5	807	103,3	83,36
10	829	65,0	53,89
50	887	16,4	14,55
100	910	8,8	8,01
200	930	4,6	4,28
Sem Carga	983	0	0

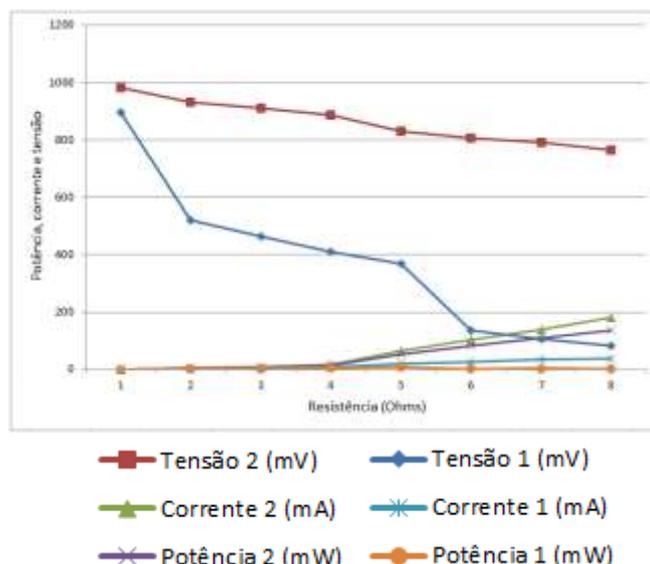
Fonte: [6]

Comparando estes resultados com a tab. 1, evidenciam-se duas conclusões, a primeira que a diferença de resultados é discrepante, validando que a célula utilizada neste estudo tem sim, um baixo rendimento e muitas perdas construtivas, sendo aplicada apenas para estudos experimentais.

E a segunda conclusão é que apesar de ter um rendimento muito baixo, o seu funcionamento está de acordo com o que é produzido em escala comercial e industrial, podendo o estudo em questão, ser útil em outros modelos para averiguação dos resultados e aplicação de um sistema de controle para um uso prático e funcional.

Para melhor visualização aplica-se o gráfico da Fig. 14, onde apresenta-se os valores encontrados (Potência 1, corrente 1 e tensão 1) para o modelo deste estudo e os coletados do modelo de comparação (Potência 2, corrente 2 e tensão 2).

Figura 14: Gráfico de comparação de modelos.



Fonte: [6]

6 CONCLUSÕES

No decorrer da elaboração deste artigo, buscou-se o melhor entendimento sobre as células combustíveis, assunto de importância crescente no meio energético mundial, que necessita de novas tecnologias e formas de controle dos processos que regem estas tecnologias. A afirmação deste método na geração de energia necessita de estudos especificamente aplicados e aprofundados, para proporcionar melhor compreensão do mesmo, melhor controle e desenvolvimento de melhorias.

O protótipo utilizado neste estudo demonstra uma eficiência adequada considerando seu funcionamento sem cargas aplicadas. No entanto, seu rendimento cai de forma brusca inserindo cargas no sistema, principalmente cargas de drenam um valor de corrente alto.

O fato deste rendimento ser muito baixo deve-se ao fator construtivo do protótipo (sendo realizado em casa, sem os equipamentos especializados



encontrados em indústrias de células comerciais), seu baixo consumo de gases e consequentemente baixa densidade de corrente.

Diante do exposto, este artigo comprova que este modelo utilizado é apenas para aplicação em estudos e pesquisas, não apresentando outra aplicação funcional.

Constata-se também que para o exemplo em questão a carga é a variável que conduzirá todo o funcionamento da célula, assim seu rendimento está totalmente ligado à resistência inserida no circuito gerando uma curva e equação que evidencia a eficiência obtida pela carga aplicada.

Averigua-se que a resposta da corrente para o ensaio de degrau unitário obteve um resultado satisfatório, gerando resultados muito próximos aos valores reais, salvos pontos de desvio padrão. Para a resposta da tensão, verificou-se uma modificação da equação final no alcance de um resultado otimizado do sistema.

Conclui-se também que apesar de sua eficiência instantânea se apresentar baixa, o protótipo utilizado em comparação com outro modelo, resultou em parâmetros semelhantes na questão de cargas aplicadas gerarem um distúrbio no sistema, rebaixando consideravelmente a tensão da célula combustível, dadas as proporções de cada uma, ou seja, o objetivo não é análise da amplitude dos valores, mas sim do comportamento da célula.

REFERÊNCIAS

- [1] SANTOS, A. C. M.; SANTOS, F. M. S. M. **Células de combustível**. Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millennium/Millennium29/21.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- [2] LINARDI, Marcelo; ARICÓ, M. Eliana. **Células a combustível de baixa potência para aplicações estacionárias**. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000300021>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- [3] SAVI, G. **Estudo e desenvolvimento de um protótipo experimental para geração de energia por meio de célula a combustível com membrana para troca de prótons**. 2015. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Faculdade SATC. Criciúma, 2015.
- [4] SERPA, L. A. **Estudo e implementação de um sistema gerador de energia empregando células a combustível do tipo PEM**. 2004. 208f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004. Disponível em: <<http://www.ivobarbi.com/PDF/dissertacoes/Dissertacao-leonardo%20serpa.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.



- [5] SIMONETTO, Henrique Menna Barreto. **Pesquisa e desenvolvimento de protótipos de células a combustível com membrana para troca de prótons a hidrogênio**. 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/3143/1/000385282-Texto%2BCompleto-0.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- [6] MOKWA, Ramires Herrmann; TANAKA, Josianne Gonçalves Pinto; GONÇALVES, Rodrigo do Rosário. **Estudo e análise experimental de um sistema de células a combustível**. 2007. 118f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2007.
- [7] NETO, Emilio Hoffmann Gomes. **Hidrogênio, evoluir sem poluir. A era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível**. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005
- [8] LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Célula combustível a hidrogênio: fonte de energia da nova era**. São Paulo, Ed. Artliber, 2004.
- [9] VILLULLAS, H. Mercedes; TICIANELLI, Edson A.; GONZÁLEZ, Ernesto R. **Células a combustível: Energia limpa a partir de fontes renováveis**. Química Nova na Escola - Atualidades em Química. n.15, p. 28-34, mai. 2002.
- [10] GAVILLON, Jorge Luiz. **Estudo, desenvolvimento e teste de protótipo de células a combustível com membrana para troca de prótons (PEM) com utilização direta de metanol e etanol**. 2006. 123f. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/3202/1/000385272-Texto%2bCompleto-0.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- [11] ALVES, Gustavo Marcati Alexandrino. **Microcélulas a combustível a etanol direto**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-16112012-154408/publico/Dissertacaocorrigida.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- [12] FRANCHI, Thales Prini. **Utilização de células a combustível tipo PEM como alternativa na geração auxiliar em instalações elétricas de grande porte**. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009. Disponível em: <file:///D:/Downloads/Thales_Prini_Franchi.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018



[13] SIMONETTO, Henrique Menna Barreto. **Pesquisa e desenvolvimento de protótipos de células a combustível com membrana para troca de prótons a hidrogênio**. 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

[14] CAMPOS, José Batista da Costa. **Modelação de células a combustível**. 2009. 147f. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 2009. Disponível em: <
http://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/2655/1/DM_DanielCampos_2009_MEEC.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.

[15] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. 2004. **Fuel cell handbook**. 7 ed. EG&G Services, Parsons, Inc., Science Applications International Corporation. Disponível em:
<<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/coal/energy%20systems/fuel%20cells/FCHandbook7.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.