DOSSIÊ

MODELAGEM DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL COMERCIAL (PEM) UTILIZANDO MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE

MODELING OF A COMMERCIAL FUEL CELL (PEM) USIND EQUIVALENT ELECTRIAL MODEL

Antonio Eliseu Holdefer[19]
Andressa Santos Pereira[20]
Luan Marcel de Sousa Lima[21]
Mateus Parreira Soares[22]
Yuri Freitas Nogara[23]

Submissão: dia/mês/ano Revisão: dia/mês/ano Aceite: dia/mês/ano

Resumo: O mundo está passando avanços tecnológicos sem precedentes com a crescente demanda por energias renováveis que não prejudicam o meio ambiente em uma escala global. Assim, a produção de energia a partir de células a combustível é uma grande alternativa para as futuras gerações, porque é uma energia "limpa", não poluente. A célula a combustível está se tornando uma alternativa porque é um dispositivo eletroquímico onde a conversão de energia química em energia elétrica ocorre sem qualquer emissão de gases poluentes. As células a combustível são usadas em diferentes indústrias, tais como automóvel e cogerações em hospitais e indústrias. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo modelar eletricamente uma célula a combustível do tipo PEM (membranas celulares poliméricas), de maneira a obter um circuito eletrônico que apresente curvas de VxI (tensão-corrente) e PxI (potência-corrente) muito semelhantes ao modelo comercial, tornando assim possível a simulação do comportamento elétrico de uma célula a combustível muito semelhante ao modelo real. O uso de tal modelo é muito benéfico para os engenheiros de eletrônica de potência, que em muitos casos têm a tarefa de projetar conversores de energia trabalhando em conjunto com

[19]Meº,Profº e Orientador da Escola de Engenharia de Controle e Automação – Mecatrônica. Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC - GO). E-mail:holdefer@gmail.com.
[20]Graduando em Engenharia de Controle e Automação – Mecatrônica. Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC -GO). E-mail:andressa.chaves.16@hotmail.com.
[21]Graduando em Engenharia de Controle e Automação – Mecatrônica. Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC -GO). E-mail:naul_marcel@hotmail.com.
[4]Graduando em Engenharia de Controle e Automação – Mecatrônica. Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC -GO). E-mail:mateusps_go@hotmail.com.
[5]Graduando em Engenharia de Controle e Automação – Mecatrônica. Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC -GO). E-mail:freitas_y@hotmail.com.

células a combustível para diferentes condições de carga. A modelagem é baseada no uso de componentes eletrônicos convencionais facilmente encontrados em softwares de simulação e no mercado. O modelo desenvolvido no presente artigo pode ser utilizado para células a combustível de hidrogênio e de biocombustíveis como etanol, uma vez que ambos funcionam de forma semelhante e têm curvas semelhantes. O modelo também pode ser construído fisicamente para simular a operação de células a combustível para estudantes e engenheiros. O presente artigo apresenta um exemplo do desenvolvimento de um modelo genérico e seu uso em uma célula a combustível comercial de 1000W.

Palavras-chave: Célula a Combustível. PEM. Esquema Elétrico. PROTEUS.

Abstract: The world is undergoing an unprecedented technological advance with the ever-increasing demand for renewable energy that does not harm the environment on a global scale. Thus, the production of energy from fuel cells is a great alternative for future generations, because it is a "clean", non-polluting energy. The fuel cell is becoming an alternative because it is an electrochemical device where the conversion of chemical energy into electrical energy occurs without any emission of polluting gases. Fuel cells are used in different industries, such as automotive and cogeneration in hospitals and industries. This work has the purpose of modeling the fuel cell of the PEM type (polymeric cell membranes) electrically, that is, an electric circuit scheme developed in the simulation software Proteus presents I x V (voltage-current) and P x I (power-current) curves very similar to the commercial model, thus making simulated fuel cell behavior very similar to the real one. The use of a such model is very beneficial for power electronics engineers who in many cases have the task of designing power converters working in conjunction with fuel cells for different load conditions. The modeling is based on the use of conventional electronic components easily found in simulation software and in the market. The model developed in the present article can be used for both hydrogen and bio-fuels fuel cells such as ethanol, since both operate in a similar way and have similar curves. The model can also be physically built to simulate fuel cell operation for students and engineers. The present article presents an example of the development of a generic model and its use in a commercial 1000W fuel cell.

Keywords: Fuel cell. PEMFC. Electric schematic. PROTEUS.

Introdução

O conceito de um novo equipamento energético chamado célula a combustível começa a despertar um interesse cada vez maior na população em geral, deixando de ser um tema restrito à comunidade técnico-científica e empresarial. Este conceito vem sempre associado à crescente preocupação de preservação ambiental, a automóveis elétricos não poluidores e à geração distribuída de energia com maior eficiência. Sendo assim, a produção de energia a partir das células a combustível se apresenta como uma grande alternativa para as gerações futuras, por se tratar de uma energia "limpa", não poluidora. A célula a combustível vem se tornando mais uma alternativa, pois se trata de um dispositivo eletroquímico onde ocorre a conversão de energia química em energia elétrica, sem qualquer emissão de gases poluentes.

Células a combustível são, em princípio, baterias, ou seja, conversores diretos de energia química em elétrica e térmica, de funcionamento contínuo (diferentemente das pilhas comuns), que produzem corrente contínua pela combustão eletroquímica a frio de um combustível, geralmente hidrogênio, (De Lima et al., 2003). As células a combustível são utilizadas em diferentes setores, tais como o automobilístico e cogeração em hospitais e indústrias. Na maioria das aplicações estacionárias e móveis (como em geradores ou em automóveis), as células a combustível são utilizadas em conjunto com outros conversores de condicionamento de energia (baterias) e um modelo de circuito seria benéfico, especialmente para os engenheiros de eletrônica de potência que, em muitos casos, têm a tarefa de projetar conversores de potência trabalhando conjuntamente com células de combustível para diferentes condições de carga (Ramos-Paja, Carlos Andrés et al, 2009). Na última década, um grande número de estudos foi realizado para melhorar o desempenho da célula a combustível PEM (membrana de troca protônica), de modo que possa atingir uma penetração significativa no mercado (Tao et al, 2006).

Uma célula a combustível é constituída por dois eletrodos, um ânodo e um cátodo, e uma membrana de eletrólito que é inserida entre eles. O Cátodo é o eletrodo negativo, isto é, ligado ao pólo negativo da célula a combustível. Nele ocorre sempre uma reação de redução química e o ânodo é o eletrodo positivo, isto é, ligado ao pólo positivo da célula a combustível. Nele sempre ocorre uma reação de oxidação (Sommer, Elise Meister, 2013). Uma célula a combustível produz cerca de 0,7 volts em seus terminais. Para obter maior tensão, é necessário que várias células sejam conectadas em série. As células a combustível do tipo PEMFC (célula a combustível do tipo membrana de troca protônica) à hidrogênio utilizam hidrogênio pressurizado e oxigênio como combustível para produzir eletricidade. O hidrogênio no lado do ânodo será dissociado em prótons e elétrons. As células a biocombustível, como por exemplo o Etanol, do qual o Brasil é grande produtor, são uma proposta alternativa da qual já existem protótipos que aplicam esta tecnologia a muitos dispositivos (Munoz, 2014).

O presente artigo se propõe a desenvolver um modelo equivalente de uma célula a combustível usando componentes eletrônicos conhecidos, de maneira a facilitar a simulação do comportamento elétrico de uma célula a combustível.

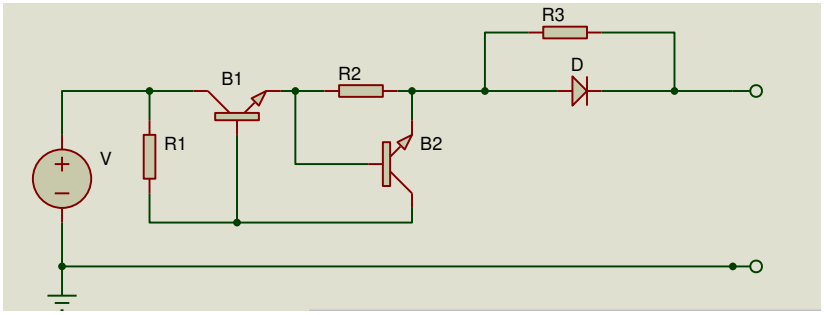
Materiais e Métodos

Este trabalho foi realizado com o auxílio de um software de simulação elétrica chamado *Proteus*, onde foi-se utilizada a *versão 8* mas podendo ser substituído tanto por outras versões quanto por outros softwares de simulação elétrica equivalentes. Pode-se também reproduzir este trabalho em bancada por meios práticos utilizando os mesmos componentes que foram utilizados no esquema elétrico (Figura 1), onde uma vez simulados virtualmente trarão resultados semelhantes em meios práticos. Esse modelo de circuito eletrônico atende tanto células a combustível a hidrogênio e a etanol.

Desenvolvimento do Modelo

Existem muitas abordagens para a modelagem de células a combustível. Neste estudo, o modelo desenvolvido (Dachuan Yu, 2005) e mostrado na Figura 1 é adotado para modelar as características terminais típicas de células a combustível. As células a combustível operam em três regiões diferentes associadas com diferentes perdas, conhecidas como polarização de ativação, polarização ôhmica e polarização de concentração, dependendo da magnitude do fluxo de corrente drenado da célula, tal como mostrado na Figura 2. Sendo assim, o modelo "imita" diferentes regiões de operação da célula a combustível através da utilização de não linearidades presentes nos transistores de modelo TBJ ou MOSFETS. O diodo no modelo é utilizado para representar tanto a região de ativação quanto das perdas ôhmicas na célula, e dois transistores TBJ ou MOSFETS são utilizados para modelar as perdas de concentração. Além disso, o circuito equivalente também pode ser modelado para incluir a natureza dinâmica da célula, usando um capacitor e um indutor.

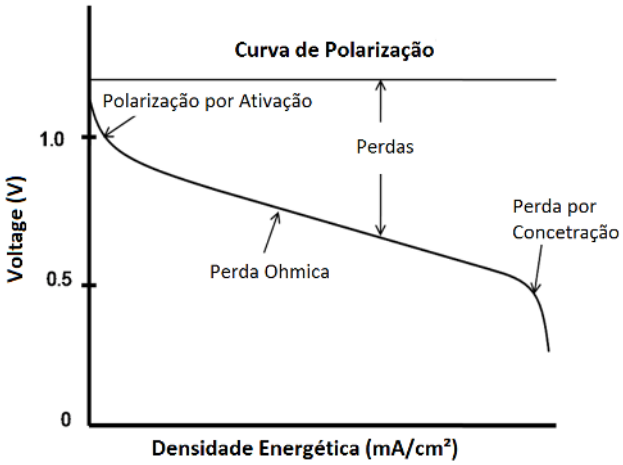
Figura 1 – Modelo equivalente elétrico de uma célula a combustível.



O diodo D no circuito é usado para modelar a ativação na célula a combustível. A célula a combustível é caracterizada por uma perda de ativação devido à lenta resposta eletroquímica nos eletrodos da célula e devido ao fluxo de corrente. Na simulação, o potencial de junção do diodo Vj proporciona um efeito semelhante ao da barreira ao fluxo de corrente da célula a combustível. Além disso, a resistência R3 em paralelo com o diodo D no modelo é utilizada

para modelar as perdas ôhmicas da célula a combustível, que se adicionam às perdas de ativação da célula. Na simulação as perdas de ativação são visíveis mesmo se o diodo não estiver incluído no circuito equivalente; contudo incluindo o diodo D e o resistor R3 no circuito as perdas de ativação são aumentadas significativamente.

Figura 2 – Curva característica de uma célula a combustível mostrando as diferentes regiões de operação.



As perdas de concentração em células a combustível que ocorrem devido à falta de combustível e oxidante de entrada em resposta à taxa de utilização, é modelada utilizando um circuito de limitação de corrente constituído por dois transistores TBJ B1 e B2, e das resistências R1 e R2. O resistor R2 atua como sensor de corrente, o que limita a corrente através do transistor B2. Assim que a corrente excede um limite definido através da resistência R2, B2 passa a conduzir.

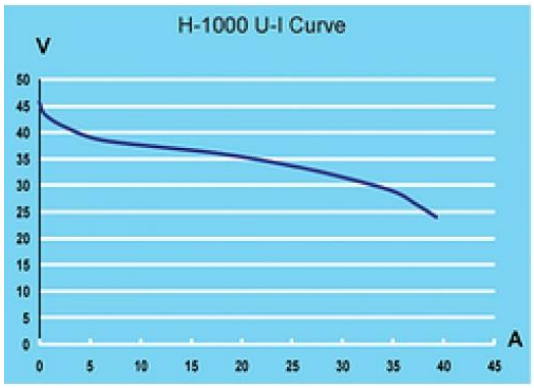
R2 como sensor de corrente controla o ponto em que a concentração da polarização começa e R1 representa a inclinação ou a taxa de variação da tensão da região de perda de concentração.

Isto por sua vez diminui a tensão de base de B1 levando a uma diminuição da tensão do emissor B2 exponencialmente (Dachuan Yu, Yuvarajan, 2005)

Resultados De Simulação Da Célula a Combustível Escolhida

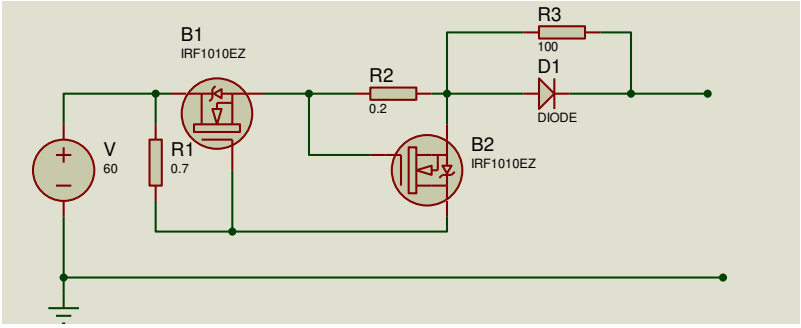
A célula a combustível escolhida para ser modelada no presente artigo é a **Horizon H-1000 PEM** de 1000W que possui a curva característica I x V mostrada na Figura 3. Tal modelo foi escolhido com a análise de suas características e sua faixa de possíveis aplicações.

Figura 3 – Curva característica da célula a combustível modelo **Horizon H-1000 PEM**.



O Circuito ajustado obtido que mais se aproximou do comportamento da célula original está mostrado abaixo na Figura 4.

Figura 4 – Modelo ajustado equiparável ao comportamento da **Horizon H-1000 PEM**.



Nela foram utilizados transistores do tipo MOSFET e com corrente nominal próxima às da célula a combustível. Através de métodos empíricos conseguiu-se chegar aos valores dos resistores, que também estão presentes na Figura 4, sendo R1=0.7 Ω, R2=0.2 Ω e R3=100 Ω.

As curvas obtidas ajustando o circuito, quando comparadas à original são mostradas na Figura 5 e na Figura 6.

Figura 5 – Curva característica I x V da célula a combustível modelo **Horizon H-1000 PEM** comparada ao modelo ajustado.

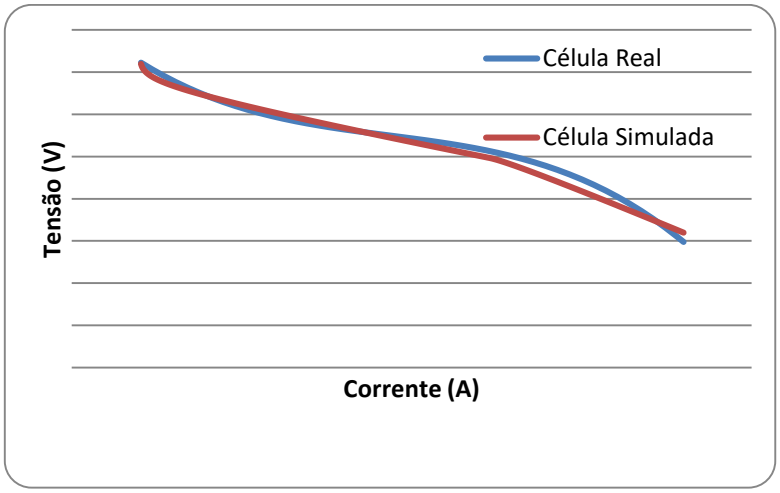
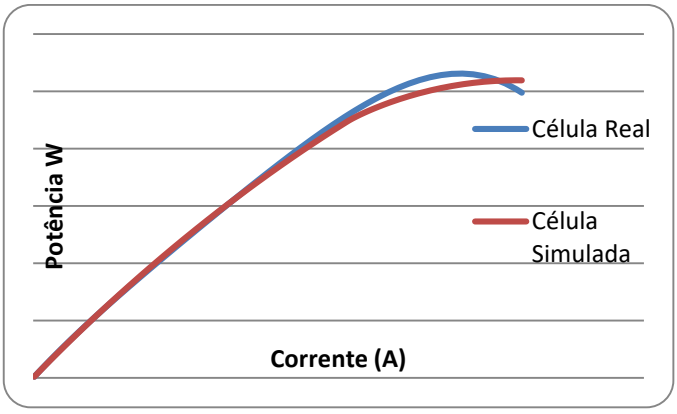


Figura 6 – Curva característica P x I da célula a combustível modelo **Horizon H-1000 PEM** comparada ao modelo ajustado.



O fator de correlação (R^2) entre as curvas foi de R^2=0,9935 para a curva I x V (Corrente - Tensão) e de R^2=0,9992 para a curva P x I (Potência –

Corrente), onde quanto mais próximo a correlação estiver de 1 melhor será a paridade.

Conclusão

O modelo mostrou-se muito preciso e satisfatório, alcançando-se valores altos de correlação (R^2) entre as curvas modeladas e reais, mostrando que o modelo está apto para realização de simulações que obtenham valores muito próximos aos reais e de grande confiabilidade. Os componentes escolhidos para simular a célula real são simples e fáceis de se encontrar no mercado, tal como fonte de tensão contínua (Vdc), dois transistores do tipo MOSFET, três resistores e um diodo. Foram escolhidos tais componentes por terem um comportamento elétrico desejado quando empregados da forma mostrada na figura 4.

Referências

Dachuan Yu, S.Yuvarajan, "Electronic circuit model for proton exchange membrane fuel cells", **Journal of Power Sources**, 2005, Vol.142, pp.238-242.

De Lima, R. B., et al. "On the electrocatalysis of ethylene glycol oxidation." **Electrochimica Acta** 49.1 (2003): 85-91.

Munoz, Gala Rosales, Jaime Soares Boaventura, and Janice Izabel Druzian. "AVANÇOS DOS BIOCATALISADORES USADOS EM CÉLULAS A BIOCOMBUSTIVEL." **Cadernos de Prospecção** 6.3 (2014): 393.

Ramos-Paja, Carlos Andrés, et al. "Minimum fuel consumption strategy for PEM fuel cells." *IEEE* **transactions on industrial electronics** 56.3 (2009): 685-696.

Sommer, Elise Meister. "**Modelagem, simulação e otimização de células de combustível de membrana alcalina**." (2013).

Tao, W. Q., et al. "Parameter sensitivity examination and discussion of PEM fuel cell simulation model validation: Part I. Current status of modeling research and model development." **Journal of power sources** 160.1 (2006): 359-373.