CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: ASPECTOS TÉCNICOS E ANÁLISE DE UM ESTUDO DE CASO

Jovanio Silva dos Santos Júnior[1], Ivan S. de Oliveira[2], Carlos M. R. de Almeida[3], Rogério M. da Silva [4]

Abstract *— The objective of this work is to introduce one of the more promising technologies in the field of electrical generation: the fuel cell. It also brings a study of case in which is analyzed the implementation of a laboratory for research and development of fuel cells in the Federal University of Rondônia (UNIR), what would bring to the university a greater acknowledgement in technological research.*

Index Terms—Fuel cells, PEM, sustainable development.

INTRODUÇÃO

Com o aumento da preocupação da humanidade em alcançar o pleno desenvolvimento sustentável, devido, principalmente, a fatores climáticos e geo-políticos, o campo do desenvolvimento de formas para que se possa gerar energia renovável está passando por uma transformação, o que pode ser notado pelo aumento do fomento à pesquisa.

Nesse cenário, a produção de energia por meio das células a combustível apresenta-se como uma alternativa promissora para as gerações futuras, por se tratar de uma energia "limpa" e renovável.

Ecologicamente, as células a combustível representam uma tecnologia muito promissora, justamente porque, além de apresentarem baixos níveis de poluição, atuam de forma limpa e silenciosa. Por este fato, elas se tornaram, em um mundo hoje preocupado com a preservação ambiental, temas de várias pesquisas.

DESCOBERTA E EVOLUÇÃO

A célula a combustível foi descoberta em 1839 por Sir. William Grove. Desde então, a tecnologia evoluiu significativamente, ao ponto de chegar a ser utilizada em vôos dos programas espaciais norte-americanos, como fonte de energia e água potável para as necessidades de bordo.

Atualmente, as células a combustível não são mais consideradas artigos supérfluos de luxo, mais sim, imprescindíveis para o desenvolvimento sustentável da espécie humana.

DEFINIÇÃO

As células a combustível são dispositivos eletroquímicos que produzem energia elétrica a partir do combustível hidrogênio [1].

Na célula a combustível, mostrada de forma esquemática na Figura 1, o combustível, que pode ser hidrogênio puro ou um gás rico em hidrogênio, é suprido constantemente em um dos eletrodos (o *anodo*) e reage eletroquimicamente com um oxidante (geralmente o oxigênio) suprido no outro eletrodo (o *catodo*).

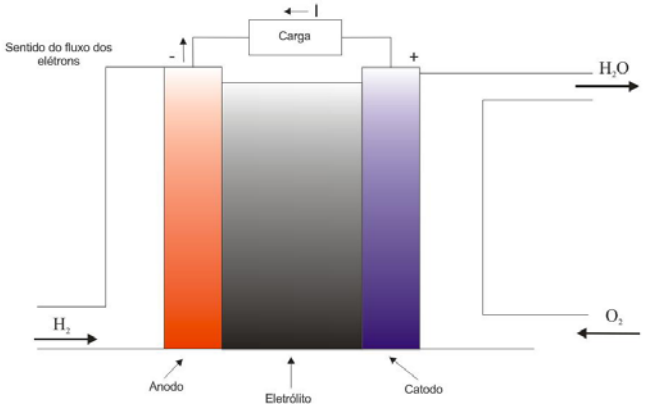

FIGURA. 1
ESQUEMATIZAÇÃO BÁSICA DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL [1].

Entre os eletrodos encontra-se o eletrólito, composto por material que permite a troca dos íons entre os eletrodos. Dessa forma, há dois circuitos distintos em uma célula a combustível: um circuito interno (eletrólito) e um circuito externo (passagem de elétrons).

Além da produção de água e energia elétrica, há também a produção de calor, visto que a reação de oxidação do hidrogênio é, por natureza, exotérmica. Essa energia térmica produzida pode ser utilizada, em algumas tecnologias de células, em ciclos de cogeração, os quais aumentam a eficiência das células a combustível.

É interessante notar também que a célula a combustível não é um dispositivo armazenador de energia, como é a bateria. Desde que se mantenha um fluxo constante de

1Jovanio Silva dos Santos Júnior, Monitor das disciplinas de Fisica I, II e III da Universidade Federal de Rondônia (UNIR), BR-364, Porto Velho, RO, Brasil, jovaniojunior@hotmail.com
2 Ivan Soares de Oliveira, Monitor da disciplina de Eletrônica da Universidade Federal de Rondônia (UNIR), BR-364, Porto Velho, RO, Brasil, ivan_iso@hotmail.com
3 Carlos Maílson Rodrigues de Almeida, Estudante de Graduação da Universidade Federal de Rondônia (UNIR), BR-364, Porto Velho, RO, Brasil, carlosmailson@hotmail.com
[4] Rogério Marcos da Silva Doutorando em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, Professor Assistente do Departamento de Engenharia Elétrica pela Fundação Universidade Federal de Rondônia. Porto Velho, RO, Brasil, rogeriom_4@hotmail.com;

reagentes (no caso hidrogênio e oxigênio) a célula continuará a produzir energia.

As células a combustível também podem ser utilizadas em conjunto com um eletrolisador, visto que tais componentes apresentam um comportamento dual entre si.

A tecnologia das células a combustível ainda é cara devido aos materiais utilizados na sua fabricação (principalmente os materiais que atuam como catalisadores das reações químicas das células).

A CÉLULA TIPO PEM (POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE)

Existem vários tipos de células a combustível, contudo procura-se dar mais visibilidade neste artigo à célula do tipo PEM (Polymer Eletrolyte Membrane ou Proton Exchange Membrane). Um esquema de uma célula PEM é apresentado na Figura 2.

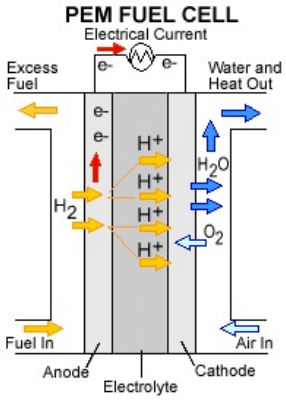

FIGURA. 2
ESQUEMA DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM [9].

A célula do tipo PEM é a que é mais utilizada no fornecimento de energia para automóveis, sendo também utilizada em aplicações estacionárias.

Geralmente, a utiliza-se bancos de células a combustível no projeto de carros e em outros tipos de aplicações, como na geração estacionária. Um exemplo de um banco de células é apresentado na Figura 3.

FIGURA. 3
BANCO DE CÉLULAS PEM UTILIZADO EM AUTOMÓVEIS [10].

Esse tipo de célula tem a vantagem de possuir um volume e um peso relativamente pequenos. Mesmo assim, a célula PEM consegue fornecer uma razoável quantidade de energia, o que faz com que a relação quantidade de energia/volume (ou peso) seja aceitável para a sua produção em larga escala.

As células do tipo PEM utilizam como eletrólito um polímero sólido, sendo que os eletrodos contêm carbonatos de carbono poroso, com a platina como catalisadora da reação de oxi-redução. Esse tipo de célula opera a temperaturas relativamente baixas (na média de $80^{O}C$). Tal fato faz com que seja possível que a célula tenha uma partida mais rápida, quando comparada com os outros tipos de células. Esse fato também proporciona um menor número de equipamentos utilizados em sua produção, o que gera, de forma direta, uma maior vida útil do sistema.

Apesar de haver uma diminuição no custo dos materiais utilizados na fabricação das células, tem-se que tal custo é reposto quando da aquisição do catalisador para os eletrodos, que precisa ser um metal nobre (geralmente a platina). Esse metal nobre é altamente suscetível ao monóxido de carbono, o que leva à necessidade de se utilizar um equipamento que faça a despoluição do combustível utilizado na célula, acrescentando, dessa forma, mais custos na fabricação da mesma.

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UM LABORATÓRIO NO *CAMPUS*

Devido ao interesse cada vez maior da humanidade em achar e aperfeiçoar formas de obtenção de energia sustentável, e também pelo fato de que é de suma importância para o desenvolvimento não apenas regional, mas também nacional, é de vital importância a implantação de um laboratório de células a combustível no *campus* da Universidade Federal de Rondônia (UNIR).

Tendo em mente esse idéia, foi elaborado um levantamento de custos para a implantação desse laboratório no campus. A seguir, apresentamos esses dados, atualizados até 06/10/2009.

- 5 Células a combustível tipo EcoFC-1U PEM: R$ 3.499,56 [8];
- 5 Osciloscópios modelo MO 1102: R$ 20.250,00 [7];
- 5 Multímetros modelo MDM 8165A: R$ 23.520,00 [7];
- 6 Computadores modelo Intel Core i5: R$ 20.994,00 [6] ;
- 6 Monitores LCD 21.5 polegadas Samsung modelo 2233 SW: R$ 4.374,00 [6];
- 1 Projetor portátil Viewsonic modelo PJ 400 + tela retrátil: R$ 3.799,00 [6].
- Total: R$ 76.436,56.

Como pode ser observado, a implantação de um laboratório com a infra-estrutura mínima envolve custos

consideráveis, da ordem de R$ 76.436,56, quando comparados com a possibilidade de simulação dos circuitos que compõem uma célula a combustível. Assim, a possibilidade de se estruturar um laboratório para implementação prática das simulações computacionais cumpre um requisito importante, que é o de agregar ao futuro profissional a experiência em campo.

Destaca-se que os benefícios obtidos com um laboratório de *Fuel Cell* instalado na Universidade Federal de Rondônia atenderiam aos cursos de engenharia Elétrica e Química, além de inserir a Universidade no *rol* de Centros de Pesquisa que trabalham com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de células a combustível no Brasil e no mundo.

ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO

No que tange à análise de estudo de caso, tem-se o exemplo da medição de impedância de uma célula a combustível, realizada por ROUANE, KRAEMER e EL-MOZNINE [2], os quais utilizaram uma célula do tipo PEM.

Nesse estudo, utilizou-se o método EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy), o qual, segundo os autores, quando comparado com outros métodos, possui a vantagem de ter uma menor influência em uma bateria ou célula a combustível durante o funcionamento do equipamento. A EIS é útil para cobrir uma maior gama de freqüência, obtendo-se, dessa forma, mais informação do espectro de impedância gerado. Para uma célula PEM, o espectro de impedância foi gerado em um intervalo de 1 a 10 KHz.

O princípio utilizado pelos autores consiste em adicionar um sinal, a uma freqüência constante, à saída de tensão da bateria quando esta está fornecendo a corrente desejada. O sinal superposto pode ser obtido por três formas: potenciostástica, gavanostática, ou por métodos de modulação de cargas. Entre estes três métodos, os autores escolheram o método de modulação de carga. Este método consiste em variar-se a resistência da carga de acordo com o sinal que se quer superimpor. Portanto, a impedância da bateria ou da célula a combustível pode ser obtida por meio do quociente entre a tensão da bateria e a corrente que esta bateria fornece. A Figura 4 apresenta uma representação elétrica desse método.

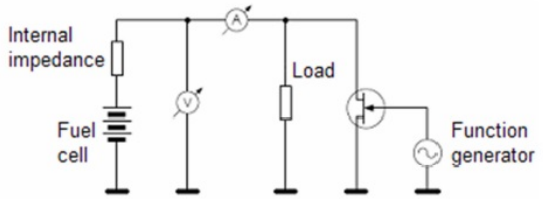

FIGURA. 4
REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DA MODULAÇÃO DA CARGA [2].

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO MÉTODO

Método

No estudo feito, os autores utilizaram o PSPICE® para validar a escolha do método utilizado. O modelo elétrico para representar os diferentes componentes do sistema é apresentado na Figura 5. A carga variável é representada por um MOSFET, enquanto a impedância interna da célula a combustível é representada por um circuito de Randle (Rohm = 10 mΩ, Ract = 90 mΩ e Cdc = 300 μF). Estes valores correspondem ao que se é esperado da impedância de uma célula a combustível. Eles são baseados nos trabalhos conduzidos por Noponen [3], Wagner [4] e Brunetto *at al* [5]. Neste último trabalho, os pesquisadores encontraram a parte real variando entre 3 mΩ e 200 mΩ, sendo que a parte imaginária está próximo de 15 mΩ.

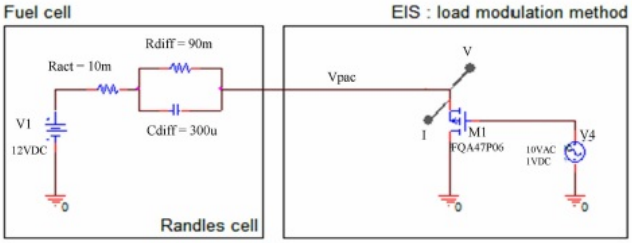

FIGURA. 5
REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO ELÉTRICO UTILIZADO [2].

Resultados da Simulação

O intervalo de freqüência utilizado nessa simulação é o mesmo que foi utilizado nos testes feitos pelos autores. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos, utilizando, para isso, um diagrama de Nyquist. Pode-se ver que um semi-ciclo perfeito é obtido, o que é esperado. Portanto, tem-se com esse gráfico a validação do método aplicado ao experimento.

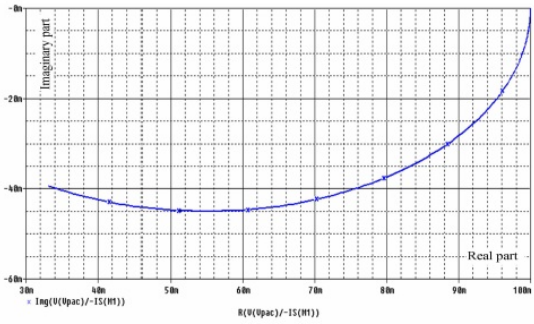

FIGURA. 6
DIAGRAMA DE NYQUIST PARA A SIMULAÇÃO, MOSTRANDO A PARTE IMAGINÁRIA (Z'') EM FUNÇÃO DA PARTE REAL (Z') DA IMPEDÂNCIA COMPLEXA (Z) [2].

Procedimento Experimental

O circuito utilizado pelos autores no experimento é apresentado na Figura 7, no qual a corrente é controlada por uma regulação de corrente analógica e não-numérica. Isso permite que se tenha uma regulação mais linear, mais rápida e mais confiável.

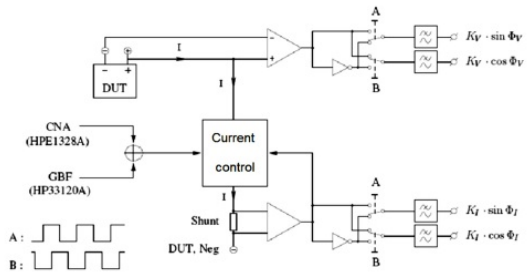

FIGURA. 7
CIRCUITO PRÁTICO UTILIZADO NO EXPERIMENTO [2].

O aparato foi desenvolvido com um sistema VXI, o qual controla diferentes cartões. Para que se possa filtrar o ruído e evitar a influência da freqüência de 50 Hz, uma detecção síncrona foi utilizada, a qual filtra uma estreita faixa perto do sinal desejado. Portanto, é possível fazer a filtragem de todos os ruídos e detectar a amplitude do sinal em uma freqüência fixa. Dois detectores síncronos foram utilizados: o primeiro detector impõe uma corrente ao dispositivo em teste, enquanto o segundo é utilizado para captar a resposta à tensão desse dispositivo. Esses detectores síncronos são controlados por quatro pulsos quadrados, os quais provém de um cartão, sendo defasados de 90°. As partes real e imaginária podem ser obtidas utilizando-se a lei de Ohm. Esses dois parâmetros, portanto, podem ser plotados em um diagrama de Nyquist. A associação de diferentes módulos permite a medição da impedância da célula a combustível a um baixo custo.

Resultados Experimentais

Os resultados preliminares foram obtidos em um veículo à bateria, com uma corrente da ordem de 330 A, e tendo a capacidade de 40 Ah. O espectro de impedância de uma célula a combustível e de uma bateria de carro são bastante coincidentes, segundo os autores, justamente pela razão de os processos eletroquímicos serem idênticos. Isso possibilitou aos autores realizarem um teste de medição em uma bateria de automóvel, para que pudessem compará-lo com os resultados obtidos por meio de simulação. Contudo, os espectros são muito dependentes dos valores dos componentes utilizados na modelagem do circuito de Randle.

As medições foram realizadas em tensões nominais diferentes (12.7 V, 10 V, 8 V e 5 V), com dois valores impostos de corrente (0,6 A e 4 A). A escolha desses valores foi aleatória. As Figuras 8 e 9 mostram os resultados obtidos nos testes, os quais apresentam as curvas esperadas e, dessa forma, garantem a habilidade do sistema desenvolvido pelos autores na medição de impedância.

Também é interessante perceber que os valores na parte imaginária são negativos, devido ao capacitor, mas por conversão, quando da montagem do gráfico, eles são multiplicados por -1, segundo os autores.

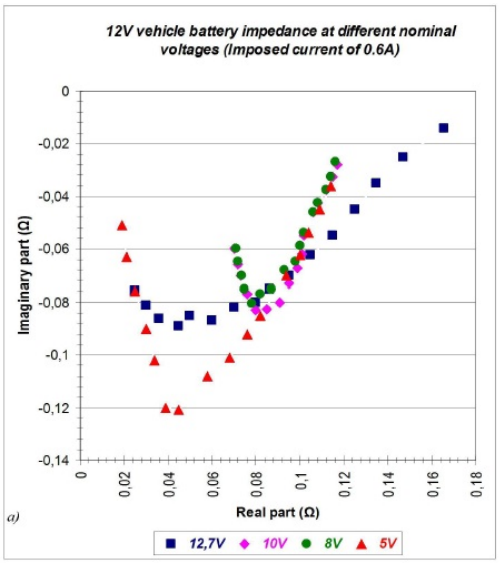

FIGURA. 8
RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PARA A IMPEDÂNCIA COMPLEXA (Z) PARA UMA CORRENTE DE 0,6 A [2].

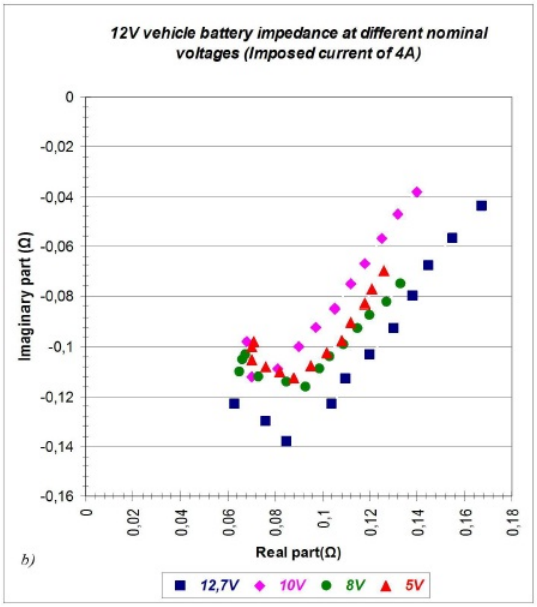

FIGURA. 9
RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PARA A IMPEDÂNCIA COMPLEXA (Z) PARA UMA CORRENTE DE 4 A [2].

CONCLUSÕES

A implantação de um laboratório de células a combustível no *campus* da Universidade Federal de Rondônia viabiliza uma linha de pesquisa de grande importância no cenário mundial, uma vez que, como maior fomentadora de estudos no Estado, não pode desconsiderar pesquisas dessa importância, como o desenvolvimento e aperfeiçoamento de células a combustível.

Para a análise do estudo de caso, foram comentados os resultados de pesquisas citadas nas referências. Com isso, atinge-se o objetivo acadêmico de iniciar os discentes na área da pesquisa científica, fazendo com que os alunos tenham opinião sobre o assunto e acrescentando a estes *know-how* para a iniciação científica.

Destaca-se que a medição da impedância é uma técnica muito útil para o monitoramento em tempo real do estado da carga de uma célula a combustível, o que foi comprovado por meio de análises computacionais e laboratoriais. Tendo isso em mente, os autores do experimento analisado provaram de uma forma sistemática a razão pela qual utilizaram a técnica da modulação da carga para o experimento, obtendo resultados satisfatórios, comparados com o modelo computacional implementado.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente a Deus e aos nossos pais, por nos dar a motivação necessária para que pudéssemos prosseguir com o nosso trabalho, e para que possamos seguir trabalhando dia após dia. Também gostaríamos de agradecer ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Rondônia (UNIR).

REFERÊNCIAS

[1] REIS, Lineu B dos, *Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade, 3ª* Ed. Barueri, SP. Manole, 2003.

[2] El-Hassane *et al*, *Impedance Measurement on a Fuel Cell on Load*, 9th on Electropower Quality and Utilization. 2007.

[3] Noponen, Matti, *Current Distribution Measurements and Modeling of Mass Transfer in Polymer Electrolyte Fuel Cells*, tese de PhD, Helsink University of Technology, Laboratório de Sistemas Avançados de Energia, Departamento de Engenharia, Física e Matemática.

[4] N. Wagner, *Characterization of Membrane Electrode Assemblies in Polymer Electrolyte Fuel Cells using AC Impedance Spectroscopy*, Journal of Applied Electrochemistry, 32:589-863, 2002.

[5] Brunetto, C. *et al*, *PEMFC Diagnostics and Modeling by Electrochemical Impedance Spectroscopy*, IEEE, 2004.

[6] Computadores e Acessórios. Disponível em: <www.dell.com.br> Acesso em 06/10/2009.

[7] Equipamentos de Medição. Disponível em <www.minipa.com.br> Acesso em 06/10/2009.

[8] EcoFC-XU™ PEM Fuel Cell Disponível em <www.cleanfuelcellenergy.com/EcoFC_XU.html>. Acesso em 06/10/2009.

[9] Types of Fuel Cells. Disponível em <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html>. Acesso em 06/10/2009.

[10] How they work – PEM Fuel Cell. Disponível em <http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_pem.shtml>, Acesso em 06/10/2009.