

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA POLIMÉRICA MEMBRANA POLIMÉRICA

George Cassani Gatti

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rua 28 de Setembro, n°36, apto. 206, Vila Isabel – CEP: 20551-031 – Rio de Janeiro/RJ – BRASIL
gatti_ufrj@yahoo.com.br

Silvio Carlos Aníbal de Almeida, D.Sc.

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cid. Universitária - Centro de Tecnologia-Bloco G, sala 204, Ilha do Fundão - Caixa Postal 68503; CEP: 21945-970 – Rio de Janeiro, RJ – BRASIL
silvioa@gmail.com

José Geraldo de Melo Furtado, D.Sc.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) – Departamento de Tecnologias Especiais (DTE)
Av. Um s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro/RJ – BRASIL – CEP: 21941-590 – Sala 121
furtado@cepel.br

Bruno Domont Xavier

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rua Gregório de Castro Morais, n°873, apto. 201, Ilha do Governador/Jardim Guanabara – CEP: 21931-350 – Rio de Janeiro/RJ – BRASIL
brunodomont@gmail.com

Rodrigo Minguita Ribeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rua São Gabriel, n°60, apto. 204, Cachambi – CEP: 20785-293 – Rio de Janeiro/RJ – BRASIL
rminguita@yahoo.com.br

Resumo. A tecnologia das células a combustível de membrana polimérica (PEMFC) tem sido intensamente pesquisada devido às excelentes características apresentadas por esses dispositivos: alta eficiência, baixas emissões, alta densidade de corrente e possibilidade de utilizar hidrogênio como combustível. O presente trabalho relata ensaios realizados com uma PEMFC numa bancada de testes no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás (CEPEL/ Eletrobrás). A bancada fabricada pela Electrocell permite estudar a influência de parâmetros operacionais (tensão, corrente, fluxos de massa e pressões) no desempenho de PEMFCs unitárias. Foram levantadas curvas de polarização de uma PEMFC da Electrocell com 5W de potência nominal e eletrodo 5X5 cm, operando a 60°C (temperatura do eletrólito) e pressões manométricas de 48 kPa no anodo e 85 kPa no catodo. Os resultados experimentais foram comparados com um modelo matemático semi-empírico visando à otimização da operação deste dispositivo e simulação em softwares. A célula a combustível é modelada em regime permanente considerando uma voltagem máxima que depende da temperatura de operação e pressão parcial dos gases reagentes. Entretanto, o aumento da corrente diminui a voltagem da célula, descreve-se este comportamento inserindo termos de perda. Para obter os parâmetros do modelo emprega-se o método da interrupção de corrente.

Palavras Chaves: Célula a Combustível, PEMFC, Curva de Polarização.

1. Introdução

A crescente preocupação de órgãos internacionais com a emissão de poluentes, o aumento do preço do petróleo bem como a dependência energética de países desenvolvidos vem estimulando pesquisas em fontes alternativas de energia com destaque para o hidrogênio. Os Estados Unidos responsáveis por 25,9% e União Européia 19,1% do consumo mundial de petróleo, importam mais da metade do petróleo consumido. Visando uma maior independência energética, estas nações têm investido milhões de dólares em pesquisa e desenvolvimento relacionado à produção, armazenamento e geração de energia utilizando o hidrogênio (Directorate General for Research, 2003).

Dentre as novas tecnologias que convertem a energia do hidrogênio, as células a combustível têm merecido

destaque. Existem diversos tipos destas que possuem diferentes características operacionais e são classificadas pelo eletrólito utilizado. Em especial a célula a combustível de membrana polimérica (PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) é responsável pela maior parcela de pesquisas atualmente, devido as suas características operacionais e diversificado campo de aplicação (automotivo, geração descentralizada, portátil, etc). Esta tecnologia possui alta eficiência energética, baixos níveis de ruído, montagem simples, alta densidade energética e emissão zero (Blomen et al., 1993).

Este dispositivo opera com hidrogênio e ar atmosférico, e através de reações eletroquímicas gera energia elétrica e rejeita apenas água e calor (EG&G Technical Services, 2002). A modificação de certos parâmetros de operação (como temperatura do eletrólito e pressão dos reagentes) influi diretamente na performance, portanto a obtenção de modelos matemáticos que representem com boa precisão o comportamento da célula a combustível de membrana polimérica são excelentes ferramentas para determinação de suas condições ótimas de funcionamento e simulações computacionais.

O presente trabalho apresenta a modelagem de uma célula a combustível de membrana polimérica e obtém um modelo matemático analítico, apesar de suas vantagens posteriormente sugere-se um modelo semi-empírico devido às dificuldades de obtenção dos parâmetros do modelo analítico. Por fim apresenta-se um método de obtenção dos parâmetros do modelo semi-empírico e realiza-se a comparação deste com resultados experimentais.

2. Modelagem

Os modelos para células a combustível podem ser analíticos ou empíricos, cada um destes possui características que influenciam na escolha para uma determinada aplicação (Haraldsson et al., 2004). Dentre estas características pode-se citar que modelos analíticos são mais precisos e podem ser utilizados numa ampla faixa de operação, entretanto a necessidade de se conhecer parâmetros construtivos da célula como: área ativa, hidratação da membrana e outras propriedades físico-químicas dos materiais constituintes, impede a sua utilização (Serpa, 2004). Portanto modelos empíricos, apesar de menos precisos e de representarem o comportamento da célula apenas para uma reduzida faixa operacional, são mais simples de serem implementados.

O modelo geral apresentado a seguir baseia-se em conceitos termodinâmicos e eletroquímicos e representa o comportamento em regime permanente, e será base tanto do modelo analítico quanto do semi-empírico. A célula a combustível é modelada considerando uma voltagem máxima ($V_{\text{Reversível}}$) que depende somente da temperatura de operação e pressão parcial dos gases reagentes (Eq. (1)). Entretanto, sabe-se que o aumento da corrente diminui a voltagem da célula (Figura 1), este comportamento é descrito pelos termos de perda (Eq. (3) e (4)).

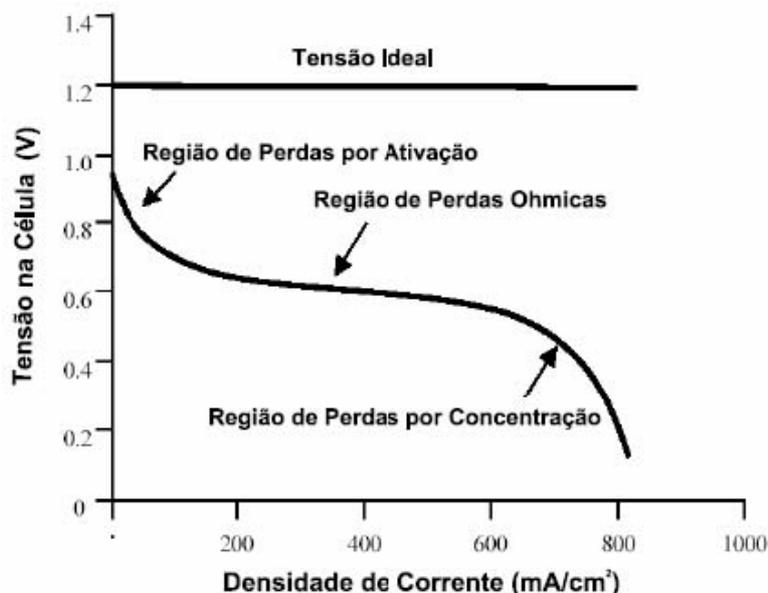


Figura 1: Curva de polarização demonstrando o comportamento da voltagem com a variação da densidade de corrente

Na Eq. (1) os dois primeiros termos recebem o nome de tensão de Nernst e indicam a variação da tensão na célula causada pela modificação de pressão dos reagentes, cuja qual surge da variação da energia livre de Gibbs – energia livre proveniente da reação apta a gerar algum tipo de trabalho – entre produto e reagentes.

$$V_{\text{Reversível}} = V^0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left[p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{1/2} \right] - \frac{\Delta \bar{s}_{T^0, p^0}}{2 \cdot F} (T - 298,15) \quad (1)$$

Onde:

- V^0 → Força eletromotriz em condições padrão de pressão e temperatura [V]
- R → Constante universal dos gases = $8,3145 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$
- T → Temperatura do eletrólito [K]
- F → Constante de Faraday = $96485,3 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$
- $p_{H_2}^*$ → Pressão parcial do hidrogênio [atm]
- $p_{O_2}^*$ → Pressão parcial do oxigênio [atm]
- $\Delta \bar{s}_{T^0, p^0}$ → Variação de entropia sob condições de pressão e temperatura padrão $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right]$

A equação acima passa a ser representada pela Eq. (2) se forem substituídos os valores das constantes e calculada a variação de entropia para pressão e temperatura padrão (Al-Baghdadi, 2004).

$$V_{\text{Reversível}} = 1,229 + 4,3085 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \ln \left[p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{1/2} \right] - 0,85 \cdot 10^{-3} (T - 298,15) \quad (2)$$

Existem três tipos de perdas: ativação, ôhmica e concentração. Todavia o termo relativo a perda por concentração é desconsiderado, por possuir valores significativos apenas para densidades de corrente elevadas (ver modelo analítico), onde usualmente não se opera o dispositivo por acarretar na sua danificação.

Descrição das perdas:

- Perdas por Ativação (V_{act} [V]): Ocasionadas em decorrência da energia desperdiçada para romper a barreira de ativação da reação química. Quanto menor a densidade de corrente mais significativa às perdas.

$$V_{\text{act}} = A_T \cdot \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) \quad (3)$$

Onde:

- A_T → Inclinação de Tafel [V]
 - i → Corrente da célula [A]
 - i_0 → Corrente de troca da célula [A]
- Perdas Ôhmicas (V_{ohmic} [V]): Decorrentes da resistência à passagem dos íons através da membrana, bem como dos elétrons pelos eletrodos em função de suas imperfeições.

$$V_{ohmic} = (R^{elétrons} + R^{prótons}) \cdot i \quad (4)$$

Onde:

- $R^{elétrons}$ → Resistência ao deslocamento de elétrons [Ω]
- $R^{prótons}$ → Resistência a passagem de prótons H^+ na membrana [Ω]

Portanto a tensão no dispositivo é representada pela Eq. (5).

$$V_{cell} = V_{Reversível} - V_{act} - V_{ohmic} \quad (5)$$

É importante considerar que a membrana não possui comportamento ideal, devido à passagem de combustível, oxidante e elétrons através desta, que não produzem trabalho útil (eletricidade). Este desperdício de energia é denominado corrente interna (i_n) e é considerável apenas para baixas densidades de corrente. Devido a este fato a corrente interna é inserida apenas no termo de perda por ativação.

2.1. Modelo Analítico

Nesta modelagem utilizam-se as Eq. (2) e (5), entretanto desenvolvem-se os termos de perda das Eq. (3) e (4), conforme apresentado a seguir.

2.1.1. Perdas Ôhmicas

Conforme representado pela Eq. (4) as perdas ôhmicas envolvem termos relativos à resistência ao deslocamento de elétrons ($R^{elétrons}$) e à passagem de prótons através da membrana ($R^{prótons}$), no entanto a primeira é muitas vezes tida como incógnita, devido a sua complicada obtenção enquanto a segunda é descrita pela Eq. (6).

$$R^{prótons} = \frac{r_M \cdot l}{A} \quad (6)$$

Onde:

- r_M → Resistividade específica da membrana [$\Omega \cdot cm$]
- l → Espessura da membrana [cm]
- A → Área ativa da Célula [cm^2]

Cabem aqui algumas considerações a respeito da área ativa da célula. Embora grande parte da literatura considere esta como sendo a área superficial do eletrodo em contato com os gases reagentes, deve-se lembrar que a elevada porosidade existente na face do eletrodo voltada ao reagente fornece uma área ativa (área onde os sítios catalíticos proporcionam uma reação química otimizada) maior que simplesmente a área superficial. Essa área é de difícil obtenção e o seu cálculo foge do escopo do trabalho. Logo, para toda referência à área ativa da célula no presente texto associa-se o conceito de área geométrica, que é facilmente calculada.

Enquanto l e A são variáveis geométricas de fácil obtenção, a resistividade específica (r_M) é função da corrente, hidratação da membrana e temperatura, além da influência de diferentes características dos eletrólitos (membranas). A Eq. (7) apresentada em Mann et al. (2000) modela o Nafion[®] (membrana da Dupont[™] largamente utilizada em PEMFC's).

$$r_M = \frac{181,6 \cdot \left[1 + 0,03 \cdot \left(\frac{i}{A} \right) + 0,062 \cdot \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{i}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[\lambda - 0,634 - 3 \cdot \left(\frac{i}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[4,18 \cdot \left(\frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (7)$$

Onde:

· $\lambda \rightarrow$ Nível de umidade da membrana

São encontrados valores do nível de umidade em torno de 14 para o caso ideal (100% de umidade relativa) e 22 ou 23 em condições supersaturadas. Operando a 30°C com corrente zero encontra-se a fração

$$\frac{181,6}{\lambda - 0,634}$$

conhecida como resistividade específica. O termo exponencial no denominador é um fator de correção quando a célula não opera a 30°C, onde T é dado em Kelvin.

2.1.2. Perdas por Ativação

Na modelagem analítica das perdas por ativação a constante de inclinação (A_T) da Eq. (3) é representada pela Eq. (8).

$$A_T = \frac{R \cdot T}{2 \cdot \alpha \cdot F} \quad (8)$$

Onde:

· $\alpha \rightarrow$ Coeficiente de transferência de carga

Entende-se o parâmetro α como a proporção de energia elétrica aplicada que é aproveitada na alteração da taxa da reação eletroquímica.

As perdas por ativação ocorrem diferentemente no anodo e no catodo – conforme representado pela Eq. (9) – em virtude do coeficiente de transferência de carga (α) e da corrente de troca (i_0). A queda de tensão no anodo é menor que no catodo, devido corrente de troca muito maior.

$$V_{act} = V_{act,A} + V_{act,C} \quad (9)$$

Onde:

· $V_{act,A} \rightarrow$ Perdas no anodo

· $V_{act,C} \rightarrow$ Perdas no catodo

As perdas por ativação bem como a corrente de troca no catodo ($i_{0,C}$) são representadas pelas Eq. (10) e (11). Enquanto as Eq. (12) e (13) são relativas ao anodo.

$$V_{act,C} = \frac{R \cdot T}{2 \cdot \alpha_C \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{0,C}}\right) \quad (10)$$

$$i_{0,C} = n_C \cdot F \cdot A \cdot k_C^0 \cdot (C_{proton})^{1-\alpha_C} \cdot (C_{H_2O})^{\alpha_C} \cdot (C_{O_2})^{1-\alpha_C} \cdot \exp\left(\frac{-\Delta F_e}{R \cdot T}\right) \quad (11)$$

$$V_{act,A} = \frac{R \cdot T}{2 \cdot \alpha_A \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_{0,A}}\right) \quad (12)$$

$$i_{0,A} = n_A \cdot F \cdot A \cdot k_A^0 \cdot C_{H_2} \cdot \exp\left(\frac{-\Delta F_{ec}}{R \cdot T}\right) \quad (13)$$

Onde:

- n_A ou n_C → Número de elétrons transferido por mol, na reação do anodo ou catodo
- k_A^0 ou k_C^0 → Constante da taxa intrínseca no anodo ou catodo
- C_i → Concentração da molécula ou partícula i $\left(\frac{mol}{cm^3}\right)$
- ΔF_{ec} → Energia livre de ativação padrão para absorção química no anodo $\left(\frac{J}{mol}\right)$

Aplicando as equações de corrente de troca nas respectivas perdas por ativação e por fim substituindo estes resultados na Eq. (9) e simplificando obtém-se a Eq. (14).

$$V_{act,2} = -\left[\zeta_1 + \zeta_2 \cdot T + \zeta_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \zeta_4 \cdot T \cdot \ln(i)\right] \quad (14)$$

Onde:

$$\zeta_1 = \left(\frac{-\Delta F_e}{\alpha_C \cdot n \cdot F}\right) + \left(\frac{-\Delta F_{ec}}{2F}\right) \quad (15)$$

$$\zeta_2 = \frac{R}{2 \cdot \alpha_C \cdot F} \cdot \ln\left[n_C \cdot F \cdot A \cdot k_C^0 \cdot (C_{proton})^{1-\alpha_C} \cdot (C_{H_2O})^{\alpha_C}\right] + \frac{R}{2 \cdot \alpha_A \cdot F} \cdot \ln\left(n_A \cdot F \cdot A \cdot k_A^0 \cdot C_{H_2}\right) \quad (16)$$

$$\zeta_3 = \frac{R}{2 \cdot \alpha_C \cdot F} \cdot (1 - \alpha_C) \quad (17)$$

$$\zeta_4 = -\left(\frac{R}{2 \cdot \alpha_C \cdot F} + \frac{R}{2 \cdot \alpha_A \cdot F}\right) \quad (18)$$

2.1.3. Perdas por Concentração

Na região de perdas por concentração (ver Figura 1) uma pequena variação na corrente acarreta uma queda brusca de tensão. Esta ocorre no momento em que certa quantidade de corrente é drenada da célula (corrente limite). Este comportamento é descrito pela Eq. (19).

$$V_{conc} = -B \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (19)$$

Onde:

- i_L → Corrente limite [A]
- B → Constante [V]

A constante B depende do eletrodo onde ocorre a perda, assumindo o valor $\frac{R \cdot T}{2 \cdot F}$ no anodo e $\frac{R \cdot T}{4 \cdot F}$ no

Analizando a Eq. (19) percebe-se que quando a corrente da célula se aproxima do valor i_L a função aumenta rapidamente, comprovando o comportamento qualitativo previamente comentado. Conforme pode ser verificado experimentalmente este efeito ocorre apenas para altas correntes, tanto que no experimento realizado (apresentado a seguir) altos valores de corrente foram obtidos sem apresentar perdas por concentração (conforme planejado).

2.2. Modelo Semi-Empírico 1

2.2.1. Perdas Ôhmicas

Em virtude da complexidade e dificuldade da obtenção de parâmetros dos termos de perda do modelo analítico pode-se utilizar o modelo semi-empírico para descrever o comportamento de um dispositivo específico. Os parâmetros de perda são facilmente obtidos empregando-se o método de interrupção de corrente. A determinação analítica da tensão reversível é simples, tendo em vista que as pressões e a temperatura são facilmente obtidas. Neste modelo as perdas por ativação continuarão sendo descritas pela Eq. (4) enquanto as ôhmicas serão descritas pela Eq. (20).

$$V_{ohmic} = R_{ohmic} \cdot i = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot i + \varepsilon_3 \cdot T) \cdot i \quad (20)$$

Onde:

- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ e ε_3 → Parâmetros sugeridos

Como no ensaio realizado a temperatura foi constante, logo $(\varepsilon_1 + \varepsilon_3 \cdot T) = \kappa_1$ e $\varepsilon_2 = \kappa_2$ e a perda ôhmica passa a ser representada pela Eq. (21).

$$V_{ohmic} = R_{ohmic} \cdot i = (\kappa_1 + \kappa_2 \cdot i) \cdot i \quad (21)$$

Onde:

- κ_1 e κ_2 → Parâmetros encontrados

2.2.2. Método de Interrupção de Corrente

O método de interrupção de corrente pode ser realizado com um osciloscópio conectado a célula a combustível e consiste em interromper a corrente do dispositivo – quando estiver estável – durante um intervalo de tempo suficiente para obter uma curva “Tensão(V) X Tempo(s)” como na Fig. 2.

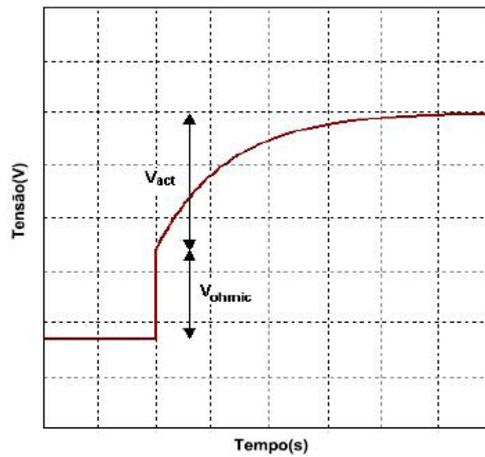


Figura 2: Curva do método de interrupção de corrente, para determinação de V_{ohmic}

Aplicando o método obtém-se V_{ohmic} para diversos valores de corrente e suas respectivas temperaturas. Utilizando estes valores e a Eq. (7) plota-se o gráfico “ $i \times R_{ohmic}$ ” (Figura 3) e resolvendo uma regressão linear encontra-se κ_1 e κ_2 .

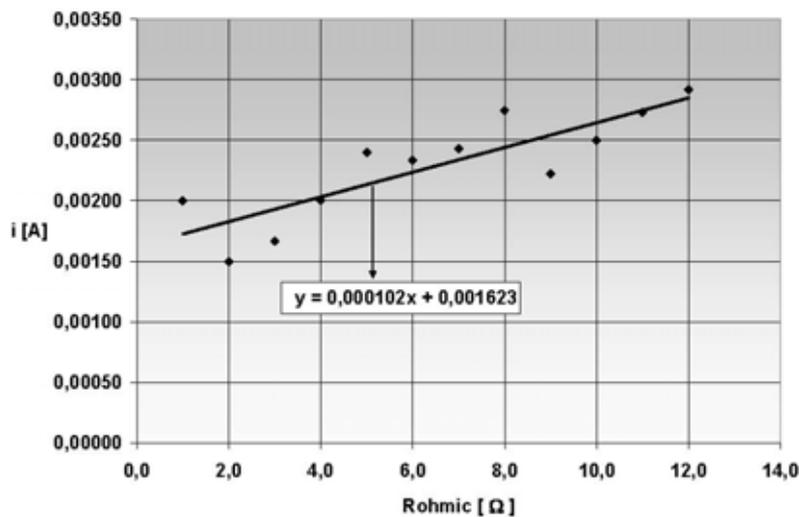


Figura 3: Ajuste da reta para obtenção dos parâmetros κ_1 e κ_2

2.2.3. Perdas por Ativação

Aplicando os valores V_{ohmic} e V_{cell} obtidos experimentalmente na Eq. (1) e calculando os respectivos $V_{reversível}$, determinam-se os valores de V_{act} . Partindo da Eq. (4) pode-se desconsiderar i_n para altas densidades de corrente e rearranjando os termos obtém-se a Eq. (22).

$$V_{act} = A_T \cdot \ln(i) - A_T \cdot \ln(i_0) \tag{22}$$

Construindo um gráfico “ $V_{act} \times \ln(i)$ ” para altos valores de densidade corrente, chega-se aos parâmetros A_T e i_0 através de regressão linear. Por fim determina-se i_n aplicando estes valores na Eq. (4) para circuito aberto.

Embora o modelo semi-empírico apresente a vantagem de simples obtenção de parâmetros, tem-se o inconveniente de servir apenas para o dispositivo ensaiado, requerendo os parâmetros acima obtidos para cada dispositivo que se queira simular

Tabela 1: Valores dos parâmetros de perda ôhmica e por ativação

Perda Ôhmica	κ_1	0,001623
	κ_2	0,000102
Perda por Ativação	A_1 [V]	0,12426
	i_0 [A]	0,70967
	i_n [A]	14,39477

3. Modelo Semi-Empírico 2

Existe outra forma empírica de se representar as perdas. Visando comparar o modelo semi-empírico 1 com outro existente na literatura, substituiu-se as Eq. (3) e (21) por (14) e (23), respectivamente. Não há mudança no termo da tensão reversível ($V_{\text{Reversível}}$). Os valores dos parâmetros utilizados por Maxoulis et al.(2004) são apresentados na (Tabela 2).

$$V_{\text{ohmic2}} = i \cdot R^{\text{interna}} = i(\gamma_1 + \gamma_2 \cdot T + \gamma_3 \cdot i + \gamma_4 \cdot T \cdot i + \gamma_5 \cdot T^2 + \gamma_6 \cdot i^2) \quad (23)$$

Onde:

• $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ e $\gamma_6 \rightarrow$ Parâmetros obtidos experimentalmente

Tabela 2: Valores dos parâmetros dos modelos para perdas obtidos na literatura.

Perda Ôhmica		Perda por Ativação	
γ_1	0,01605	ξ_1	- 0,9514
γ_2	$- 3,5 \times 10^{-5}$	ξ_2	0,00312
γ_3	8×10^{-6}	ξ_3	$7,4 \times 10^{-5}$
$\gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$	0	ξ_4	- 0,000187

De acordo com a Eq. (14), além dos parâmetros acima apresentados deve-se obter o valor de C_{O_2} , que deve ser calculado conforme Eq. (24).

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (24)$$

4. Resultados

Foi realizado no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás (CEPEL/ Eletrobrás) um ensaio de uma PEMFC fabricada pela Electrocell com 5W de potência nominal, eletrodo 5X5 cm e membrana Nafion[®] 117, operando a 60°C (temperatura do eletrólito) e pressões manométricas de 48 kPa no anodo (hidrogênio) e 85 kPa no catodo (oxigênio). O objetivo foi obter dados de

performance de uma PEMFC operando com hidrogênio e oxigênio de alta pureza para construção da curva de polarização (gráfico “Tensão X Corrente”) e comparação com os modelos matemáticos apresentados acima. O ensaio foi realizado na bancada de testes também fabricada pela Electrocell (Figura 4) que permite estudar a influência de alguns parâmetros operacionais (tensão, corrente, fluxos de massa e pressões) no desempenho de PEMFC’s unitárias.

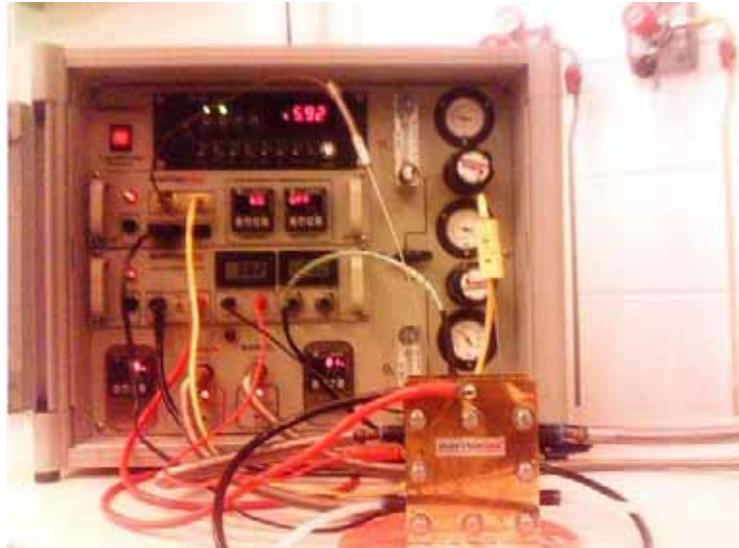


Figura 4: Bancada de testes conectada a célula a combustível de membrana polimérica.

Foram realizadas duas medições seguidas e diante dos resultados obtidos (Figura 5) pode-se inferir que o desempenho da PEMFC melhora após um ciclo de funcionamento. Este comportamento é explicado pela ativação dos sítios catalíticos durante a primeira etapa da aquisição de dados, pois na segunda etapa estes já estão ativados, facilitando a catálise desde o início da aferição.

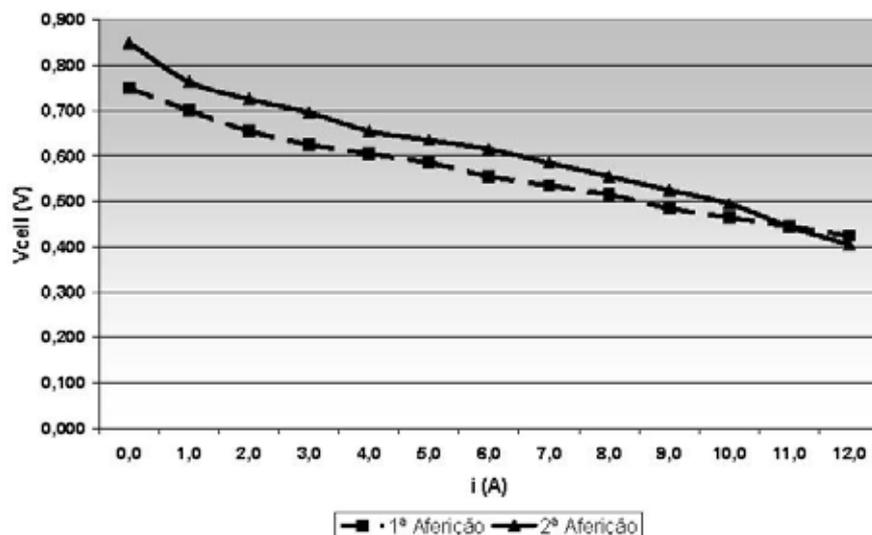


Figura 5: Curvas de polarização da célula a combustível de membrana polimérica de 5W.

Comparando estes resultados com a Fig.1 nota-se que o ensaio foi realizado apenas na região de operação da PEMFC que compreende as regiões de “Perdas por Ativação” e “Perdas Ôhmicas”. Este fato era esperado, já que operar na “Região de Perdas por Concentração” causa danos à membrana e pode inutilizar o dispositivo.

5. Comparação

Para comparação do modelo com os dados experimentais empregou-se o software Mathematica. Tendo em vista que o ensaio fornece pontos, utilizou-se o recurso de interpolação para obtenção das curvas de polarização experimentais. As curvas são comparadas na Fig. 6.

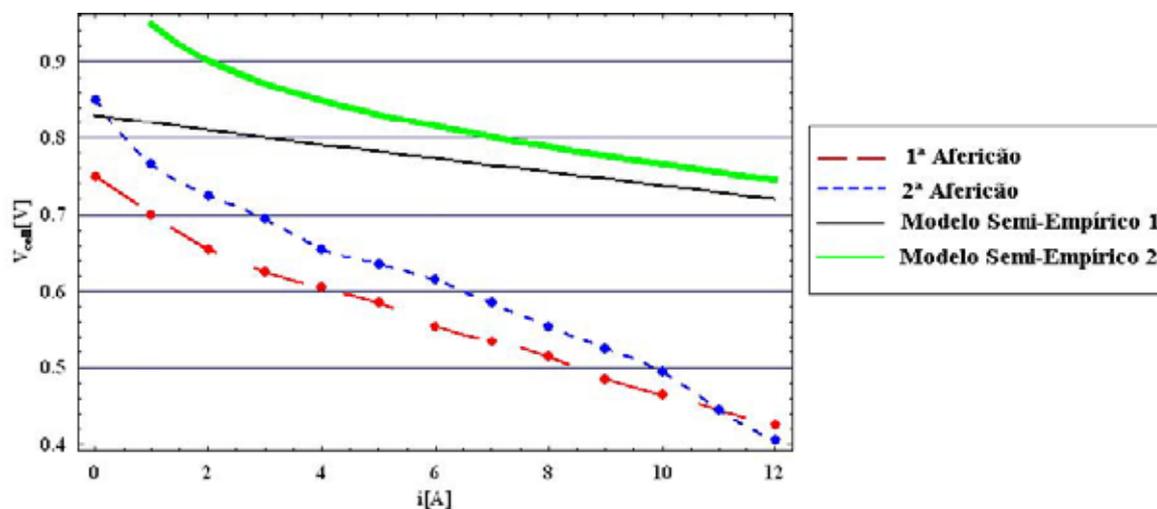


Figura 6: Comparação das curvas de polarização experimentais e teóricas.

5.1. Análise

O modelo 1 apresenta uma excelente aproximação para circuito aberto de um dispositivo já ativado (2ª Aferição), no entanto as perdas não foram muito bem representadas pelo modelo. Uma análise mais detalhada dos parâmetros permite afirmar que esta imprecisão deve-se principalmente às perdas ôhmicas.

O modelo 2 superestima a curva de polarização em toda a faixa de operação, a princípio considera-se como fonte de erro os parâmetros obtidos na literatura, pois conforme descrito acima este modelo é específico.

Apesar do resultado pouco satisfatório, pretende-se realizar mais ensaios com PEMFC's bem como obter novamente os parâmetros do modelo e estudar mais a fundo as possíveis causas das imprecisões.

6. Conclusão

As células a combustível surgem como uma interessante tecnologia do ponto de vista estratégico para o setor energético em diversos países. Em especial a célula a combustível de membrana polimérica apresenta diversas vantagens que a tornam a melhor opção para diversos campos de aplicação.

Realizou-se ensaios para obtenção da curva de polarização da célula a combustível de membrana polimérica de 5 W da Electrocell, que apresentou um comportamento qualitativo semelhante a dados da literatura.

Foram apresentados dois modelos matemáticos semi-empíricos, que superestimaram o comportamento do dispositivo. Apesar disso o modelo 1 representa com boa precisão o circuito aberto e o modelo 2 simula qualitativamente bem o decaimento inicial de tensão. Deve-se enfatizar

que embora o modelo semi-empírico seja de fácil obtenção sua representatividade é exclusiva do dispositivo ensaiado.

O modelo apresentado será melhor estudado para se descobrir e corrigir as causas da imprecisão, bem como serão realizados ensaios para variadas pressões e temperatura com intuito de melhor avalia-lo.

7. Agradecimentos

CEPEL/Eletróbrás e CNPQ.

8. Referências

- Al-Baghdadi, M.A.R.S., 2005, “*Modelling of proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations*”, *Renewable Energy* 30, 1587-1599.
- Blomen, L.J.M.J., Mugerwa, M.N., 1993, “*Fuel Cell Systems*”, Plenum Press, New York.
- Directorate General for Research, 2003, “*Hydrogen Energy and Fuel Cells: A vision of our future*”.
- EG&G Technical Services, 2002, “*Fuel Cell Hand Book – Sixth Edition*”, Inc. Science Applications International Corporation, U.S. Department of Energy, Morgantown, West Virginia.
- Haraldsson, K., Wipke, K., 2004, “*Evaluating PEM fuel cell system models*”, *J. Power Sources* 126, 88-97.
- Mann, R.F., Amphlett, J.C., Hooper, M.A.I., Jensen, H.M., Peppley, B.A., Roberge, P.R., 2000, “*Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell*”, *J. Power Sources*; 86:173–80.
- Maxoulis, C.N., Tsinoglou, D.N., Koltsakis, G.C., 2004, “*Modeling of automotive fuel cell operation in driving cycles*”, *Energy Conversion and Management* 45, 559-573.
- Serpa, L.A., 2004, “*Estudo e implementação de um sistema gerador de energia empregando células a combustível do tipo PEM*”, INEP/UFSC.

EXPERIMENTAL STUDY OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL

George Cassani Gatti

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rua 28 de Setembro, nº36, apto. 206, Vila Isabel – CEP: 20551-031 – Rio de Janeiro/RJ – BRASIL

e-mail: gatti_ufrj@yahoo.com.br

Silvio Carlos Aníbal de Almeida, D.Sc.

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cid. Universitária - Centro de Tecnologia-Bloco G, sala 204, Ilha do Fundão - Caixa Postal 68503; CEP: 21945-970 – Rio de Janeiro, RJ – BRASIL

e-mail: silvioa@gmail.com

José Geraldo de Melo Furtado

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) – Departamento de Tecnologias Especiais (DTE)

Av. Um s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro/RJ – BRASIL – CEP: 21941-590 – Sala 121

furtado@cepel.br

Bruno Domont Xavier

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rua Gregório de Castro Morais, nº873, apto. 201, Ilha do Governador/Jardim Guanabara – CEP: 21931-350 – Rio de Janeiro/RJ – BRASIL

brunodomont@gmail.com

Rodrigo Minguita Ribeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rua São Gabriel, nº60, apto. 204, Cachambi – CEP: 20785-293 – Rio de Janeiro/RJ – BRASIL

rminguita@yahoo.com.br

Abstract

The technology of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has been widely studied due to its interesting characteristics like: high efficiency, extremely low emissions, high current densities and use of the fuel hydrogen.

This paper describes, applies and compares a semi-empirical mathematical model to experimental results realized with a PEMFC at “Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás” (CEPEL/ Eletrobrás). Validation enables this model to optimize operational parameters improving the PEMFC performance and apply on simulation softwares.

These tests were realized in a work station assembled by Electrocell and allow study effects of some operation parameters (voltage, current, mass flow and pressure) on performance of unitary PEMFC's.

Polarization curves were plotted to the PEMFC also assembled by Electrocell. The device has 5 W nominal power with 5X5 cm electrodes and was operated on 60°C electrolyte temperature, 48 kPa manometric pressure at anode and 85 kPa at cathode.

The model represents a fuel cell at steady state condition taking account the greatest voltage that depends of operation temperature and reagents partial pressures. However, increase of current decreases cell voltage and this behavior can be described introducing loss terms. Parameters of the semi-empirical model were obtained applying the current interruption method.

Keywords: Fuel Cell, PEMFC, Fuel Cell Modeling, Current Interruption Method.