

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA PILHA DE COMBUSTÍVEL DE ELECTRÓLITO DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEMFC) PARA APLICAÇÃO EM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA

M. T. Outeiro¹ A. T. Almeida² A. S. Carvalho³

1 Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Rua Pedro Nunes - Quinta da Nora, 3030 Coimbra
Telef: 239 790 200, Fax: 239 790 201, Email: touteiro@mail.isec.pt

2 Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, ISR-DEEC, Pólo II, 3030 Coimbra
Telef: 239 796 218, Fax: 239 406 672, Email: adealmeida@isr.uc.pt

3 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ISR-DEEC, Rua Roberto Frias s/n 4200-465 Porto
Telef: 22 508 18 18, Fax: 22 508 14 43, Email: asc@fe.up.pt

1. Introdução

A preocupação crescente com os aspectos ambientais e as limitações nas reservas de combustíveis fósseis, têm vindo a criar motivações fortes para a investigação e o desenvolvimento de novas formas de produção de energia eléctrica. Fontes de energia, mais amigas do ambiente, altamente eficientes e com ciclos renováveis, estão a conduzir a política energética para uma nova dimensão, passando a dar-se maior importância à forma como este sector se desenvolve.

A nova era energética baseia-se na utilização de fontes renováveis sob as mais diversas formas (eólica, solar, geotérmica e biomassa), as quais tendem a ser acompanhadas da evolução tecnológica dos equipamentos e sistemas usados para a geração, conversão e armazenamento destas formas de energia.

Neste sentido, para além de tecnologias para utilização das energias renováveis, estão a ser desenvolvidas outras formas de produção de energia eléctrica, salientando-se a gaseificação integral do carvão em ciclos combinados, a combustão em leito fluidificado pressurizado, os sistemas de turbinas avançados e as pilhas de combustível.

As pilhas de combustível constituem uma das mais promissoras tecnologias de geração distribuída. O seu enorme potencial estende-se a uma grande variedade de aplicações e áreas tecnológicas, desde os transportes, equipamentos portáteis como os telefones celulares, até os sectores industrial, militar, médico, naval, espacial e aéreo, incluindo a produção de energia eléctrica por centrais estacionárias e de distribuição.

A pilha de combustível produz energia eléctrica a partir do combustível hidrogénio, através de um processo electroquímico, com um rendimento que

poderá atingir os 90% em algumas aplicações. Deste processo, resulta apenas água e calor, estando praticamente isento de emissões poluentes e de ruído.

Existem no entanto diversos problemas importantes por resolver, para que as pilhas de combustível possam ser lançadas no comércio em larga escala.

Devido por exemplo, ao seu elevado custo actual em comparação com as fontes de energia convencionais, aos problemas e custos associados ao transporte e distribuição de novos combustíveis como, por exemplo, o hidrogénio, e aos interesses económicos associados às indústrias de combustíveis fósseis dos países industrializados.

Apesar disso, todos os dias surgem novos desenvolvimentos desta tecnologia. Novas membranas de permuta protónica, melhores catalisadores, melhores desenhos das células e novos modos de funcionamento dinâmico.

Paralelamente ao desenvolvimento tecnológico, as infra-estruturas de fornecimento de combustível têm vindo a fazer progressos no sentido da descarbonização dos combustíveis fósseis, com a separação e sequestração do CO₂ e o aproveitamento do hidrogénio.

O hidrogénio é um dos mais promissores transportadores de energia renovável, constitui por isso uma das soluções mais interessantes.

A longo prazo, prevê-se que o hidrogénio e as energias renováveis constituam o suporte da economia de energia do futuro (“Sustainable Energy Economy”). O planeta e o homem agradecem.

2. Tipos de Células de Combustível

As células de combustível têm-se afirmado como uma das tecnologias de produção de energia mais promissoras. Produzem energia com rendimento típico entre 40 e 60%. Devido às suas emissões reduzidas e funcionamento de forma silenciosa, estas podem facilmente ser utilizadas em bairros residenciais. São particularmente bem adaptadas ao mercado da produção distribuída devido a essas características, a que se junta ainda a sua modularidade e a possibilidade de se construírem unidades com qualquer potência que se deseje. Uma unidade de célula de combustível produz entre 0.5-1V, sendo habitual interligarem-se várias unidades, formando uma pilha que pode fornecer uma tensão mais facilmente utilizável. As células de combustível actuais enquadram-se num de cinco tipos, encontrando-se em diferentes estágios de desenvolvimento técnico e comercial:

AFC : Pilha de combustível alcalina (*Alkaline Fuel Cell*)

MCFC : Pilha de combustível de carbonato fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell*)

SOFC : Pilha de combustível de óxido sólido (*Solid Oxide Fuel Cell*)

PEMFC : Pilha de combustível de electrólito de membrana polimérica (*Proton Exchange Membrane ou Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*)

PAFC : Pilha de combustível de ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell*)

3. Análise do funcionamento da PEMFC

O funcionamento de uma pilha de combustível, em particular o da PEMFC, baseia-se num processo electroquímico de oxidação – redução, no qual o oxigénio (ar) é o oxidante e o hidrogénio (ou outro combustível rico em hidrogénio) é o redutor. Este processo consiste na conversão directa da energia química dos combustíveis em energia eléctrica (DC), água e calor.

No ânodo (eléctrodo negativo) da pilha de combustível, o hidrogénio é ionizado, libertando electrões (e^-), e criando iões H^+ (ou protões). Enquanto os electrões ficam retidos no ânodo, os protões atravessam o electrólito em direcção ao cátodo. Esta reacção é representada pela equação, $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$.

No cátodo (eléctrodo positivo), o oxigénio que é absorvido do ar, reage com os electrões(e^-), vindos do eléctrodo contrário, e os iões H^+ vindos do electrólito, desta junção forma-se água pura. Esta reacção é representada pela equação, $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$.

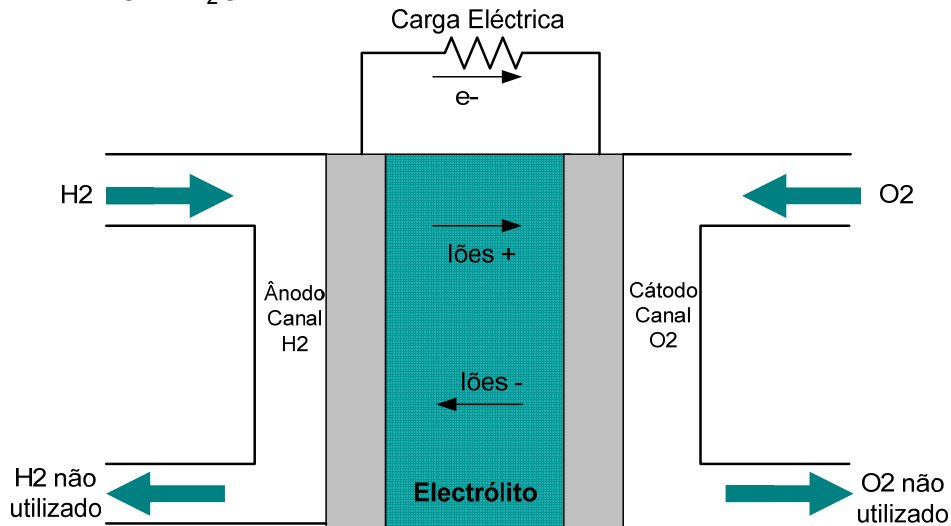


Figura 1 – Esquema representativo das reacções numa célula de combustível.

Em determinados momentos, a reacção química anteriormente descrita acontece muito devagar, daí o uso do catalisador de platina o qual permite que as moléculas diatómicas do gás usem de forma mais eficiente a energia ambiente para a sua separação na forma monoatómica. Consequentemente, a construção de uma célula de combustível deve, satisfazer as condições:

- 1) Possuir uma área superficial suficiente, revestida pelo catalisador como forma de acelerar a reacção na produção da corrente eléctrica requerida,
- 2) Possuir formas de fornecimento da quantidade suficiente de cada gás (H_2 e O_2) separadamente para cada lado da PEM distribuindo-os através da sua área superficial.
- 3) Possuir um circuito capaz de permitir movimento de cargas eléctricas.
- 4) Possuir formas de remover o excesso de calor e de água produzidos na reacção.

4. Apresentação do sistema *GenCore® 5B48* da *Plug Power*

O sistema da *Plug Power GenCore® 5B48* consiste numa unidade de produção de energia com potência até 5kW. O sistema é alimentado directamente a partir do hidrogénio liquefeito, o qual necessita de ter uma pureza de 99.95% e do oxigénio proveniente do meio ambiente. O sistema disponibiliza uma tensão de saída de $+48V_{DC}$ ($\pm 42-58 V_{DC}$), o qual permite alimentar de forma contínua um barramento DC ou ainda carregar um banco de baterias de supercondensadores.



Figura 2 – Apresentação do sistema Plug Power GenCore 5B48. Fonte: Plug Power.

4.1 Pilha ou “stack”

A pilha de combustível é constituída por 70 células, cada uma com uma PEM entre duas placas. As células encontram-se ligadas em série com uma placa de colector no topo e outra no fundo da pilha, estas fornecem as ligações adequadas para envio da corrente ao circuito externo. A pilha possui canais verticais para a passagem do ar, do hidrogénio e do líquido refrigerador. Do processo electroquímico resulta como já foi referido, electricidade e como subprodutos, água e calor. A pilha representa a parte principal do sistema. As tensões individuais de cada uma das células são medidas a partir de um sistema de interface por *Scanner*, montado ao lado desta, este sistema fornece toda a informação necessárias ao sistema de controlo (placa GCC). Uma pilha da Plug Power pesa aproximadamente 41 Kg. Se a pilha exigir algum serviço correctivo, esta terá de ser substituída com uma nova pilha e a pilha danificada será neste caso enviada ao fabricante para reparação. A figura a seguir mostra o aspecto deste componente fundamental do sistema.

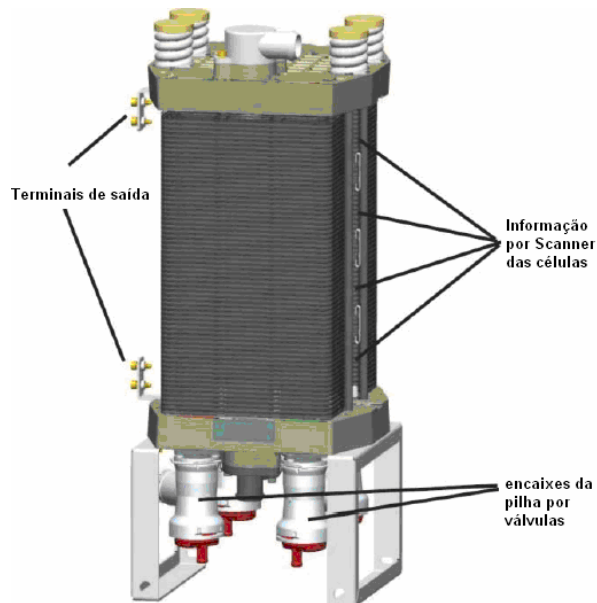


Figura 3 – Informação acerca da pilha. Fonte: Plug Power.

4. 2 Recirculação do hidrogénio não utilizado

A pilha da célula combustível necessita de um fluxo constante de entrada quer do hidrogénio quer do oxigénio, extraído do ar ambiental, de forma a assegurar as reacções electroquímicas para a potência que lhe é solicitada. Como nem todo o hidrogénio é consumido durante sua primeira passagem através da pilha, torna-se necessária a sua recirculação. Assim, todo o hidrogénio não consumido no processo de ionização é retirado da pilha e recirculado pelo ventilador de gases de exaustão (EGR). Para além deste, também aqui circulam os gases inertes e vapor de água desde o ânodo de saída até ao ânodo de entrada. Esta recirculação é fundamental no processo uma vez que impede a existência de água em estado líquido dentro da pilha. O ventilador EGR tem então por função, retirar os gases não-combustíveis para fora do sistema, e reenviar o hidrogénio à pilha.

Subsistema do ar: 1) Entregar do ar filtrado e aquecido do cátodo à pilha da célula combustível para a reacção química. 2) Remover a água adicional das células combustíveis. 3) Aceitar os gases non-fuel do orifício da recirculação do gás de exaustão (EGR) para a descarga.

Subsistema do hidrogénio: 1) Entregar o hidrogénio à pilha da célula combustível na pressão requerida a reacção química. 2) Controlar o fluxo do gás de hidrogénio no sistema da célula combustível, e isolá-lo se necessário. 3) Recircular gases de exaustão para remover a água adicional e os outros gases não combustíveis.

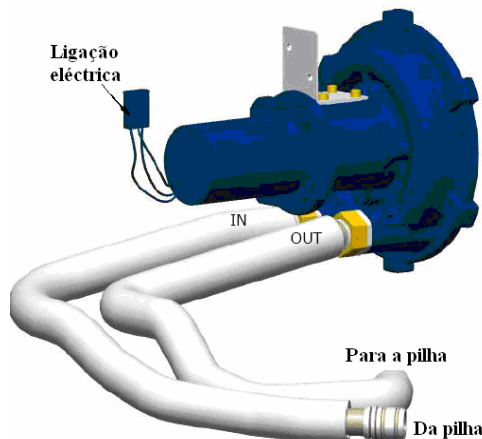


Figura 4 –Ventilação de gases de exaustão (EGR). Fonte: Plug Power.

4.3 Regulador de pressão do hidrogénio

O sistema regulador de pressão de hidrogénio, reduz a pressão deste, de 80 psi para ± 1.5 psi. O regulador de pressão é uma válvula que funciona de forma directa.

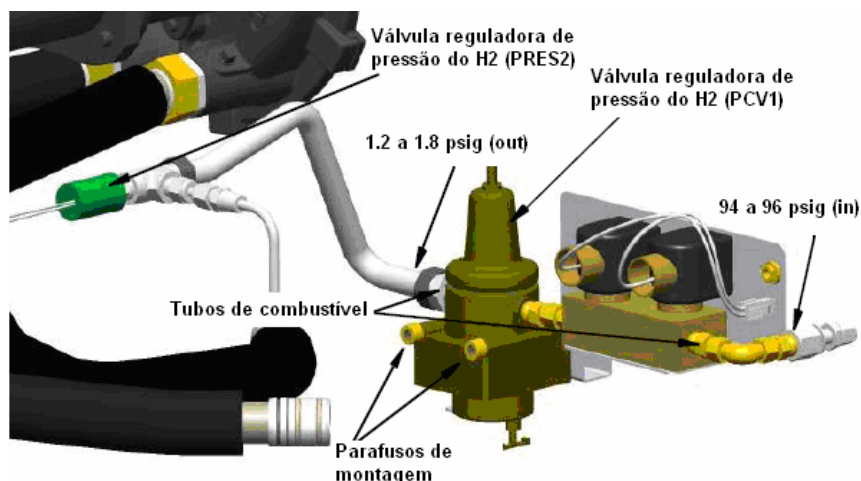


Figura 5 – Sistema de regulação do combustível (H₂). Fonte: Plug Power.

4.4 Controlo do sistema (GenCore Control Card - GCC)

A placa GCC é a unidade central de processador do sistema. Contem um microprocessador o qual é usado para monitorização e controle do sistema. Possui memória para o armazenamento de dados do programa e, permite as ligações dos vários sistemas de comunicação de dados de entrada e de saída (RS422, RS485). Contém também os circuitos e o software do sistema de controle, contém entradas e saídas discretas de controle dos vários sensores, e diversas outras funções tais como um modem e um sistema de disparo de impulso real no tempo. Possui uma porta para a programação do

microprocessador sempre que o software da placa GCC necessite de ser actualizado, a comunicação entre PC e a placa é feita através de cabo DB9. Outras funções no GCC incluem 1MB da memória usado para o armazenamento de dados em cartão, circuitos para o arranque do sistema, e circuitos para manter potência no modem para uma situação de paragem programada ou um ESTOP. As funções do controle e da sustentação do GCC concentram-se num microprocessador da *Mitsubishi*, o qual executa o software de controle. O GCC é alimentado a partir da potência fornecida pelo conversor auxiliar a uma tensão de +24Vdc, a qual é convertida para os 5Vdc.

Relativamente á parte de potência, a placa GCC é constituída por componentes de elevada potência, tais como controladores do motor e solenóides, de forma a garantir o isolamento eléctrico do ruído entre esta e os diversos circuitos analógicos e digitais altamente sensíveis. Assim na placa GCC encontram-se essencialmente quatro secções principais, 1)ESTOP 2)Controlador, 3)Comunicação 4)Distribuição de potência. A figura a seguir mostra o eu aspecto geral.

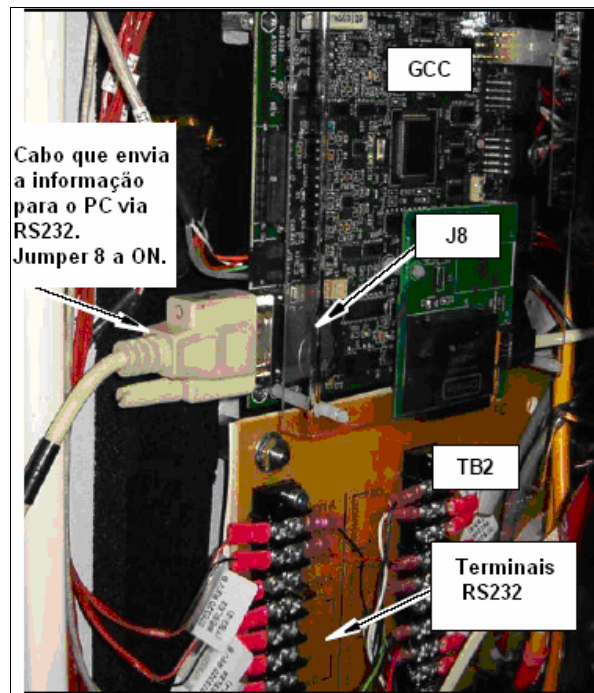


Figura 6 – Controlo do sistema pela placa GCC. Fonte: Plug Power.

4.5 Sistema de potência

O sistema de potência é constituído pelos conversores auxiliar e principal, banco de baterias, protecções e sistema de comunicação de dados.

Conversor principal:

Este conversor é bidireccional, isto é, é um conversor DC/DC do tipo “Buck-Boost”.

A sua entrada pode variar entre os 42-70Vdc, 120A, (+) e terra vindos da bateria ou da célula combustível consoante o modo de funcionamento. A saída pode variar entre os 42-58Vdc, para uma potência máxima de 5.0kW
Possui uma protecção por fusível de 150A e a saída é reavaliada caso esta desça abaixo dos 48Vdc.

Conversor auxiliar:

Este conversor é unidireccional, isto é, é um conversor DC/DC do tipo Buck.

Entrada pode variar entre os 42-70Vdc da tensão do conversor principal.

A tensão de saída é de +24Vdc relativamente à terra. Encontra-se protegida por um fusível de 40A.



Figura 7 – Baterias e respectivas ligações através de ficha “Anderson”. Fonte: Plug Power.



Figura 8 – Conversores DC/DC principal e auxiliar. Fonte: Plug Power.

Banco de baterias:

Consiste num grupo de 4 baterias de 12Vdc/33 AH ligadas em série. Produzem os 48Vdc necessários para o funcionamento do sistema,

As baterias armazenam a energia necessária para os transitórios do sistema e para funcionamento temporal muito limitado em situações de não existir energia vinda da rede eléctrica e a pilha de combustível não se encontrar disponível.

As baterias encontram-se ligadas directamente à saída do conversor principal DC/DC e do barramento DC de saída, através de uma ficha “Anderson”.

Protecções e sistema de comunicação de dados:

Para além dos fusíveis de protecção já referidos, existem dois contactores; o contactor da pilha de combustível e o contactor do refrigerador (K2), ambos controlados através da placa GCC (*GenCore Card Control*). A comunicação dos conversores com a placa GCC é feita através de um circuito RS485. Para além destes, a placa GCC recebe também informação do sensor de corrente da bateria (CUR2) e o sinal da tensão no barramento de saída.

4. 6 Armazenamento do hidrogénio

O fornecimento do hidrogénio para o sistema em estudo, é constituído por um armário que contém seis cilindros de tamanho padrão, distribuídos por dois bancos, disponíveis nos distribuidores de hidrogénio, tal como se pode visualizar nas figuras a seguir. O hidrogénio, tem a pureza de 99,95% estando salvaguarda a hipótese de substituição e reparação das botijas sem a necessidade de paragem do sistema.



Figura 9 - Solução implementada para o armazenamento de hidrogénio.

5. Análise do desempenho da PEMFC em regime permanente

Foram realizados testes experimentais tendo como objectivo avaliar o comportamento da pilha de combustível em regime permanente.

A carga resistiva usada na realização destes testes, permite variações de corrente até 120A, e potência até aos 5000W (potência máxima fornecida pela pilha de combustível) quando alimentada por uma tensão contínua de $\cong 50V$. Esta carga permite configurações série e paralelo das doze resistências de 5Ω , deixando a possibilidade de receber energia a partir da rede de 230V se necessário.

Equipamento para realização dos testes:

- ◆ Pilha de Combustível, Plug Power GenCore 5B
- ◆ Multímetro TEK DMM249 e Pinça Amperimétrica CHY 91 DC/AC
- ◆ Osciloscópio Digital TEKTRONIX TDS 220
- ◆ Software Plug Power & comunicação RS232 para aquisição de resultados
- ◆ Carga Resistiva ($0.5 - 35\Omega$)



Figura 10 – Aspecto da montagem laboratorial.

5. 1 Análise de resultados

Para caracterizar do comportamento da pilha de combustível em regime permanente é necessário conhecer algumas relações, nomeadamente, da tensão versus corrente (curva característica da célula de combustível), da potência versus corrente (curva de potência da célula de combustível), da rendimento e consumo de combustível. A análise de resultados que permitiu esta caracterização, foi feita a partir do software Plug Power (Versão1.8.2), e dos aparelhos de medida.

5. 2 Tensão e potência fornecidas pela PEMFC

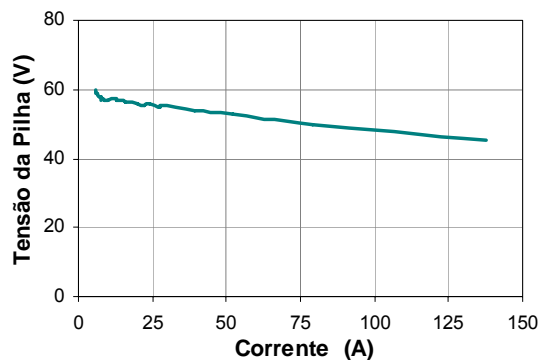


Figura 11 – Tensão versus corrente da PEMFC

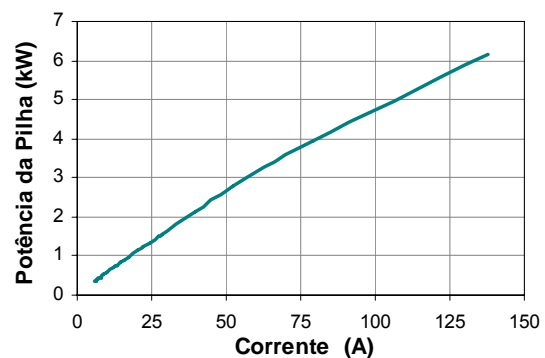


Figura 12 – Potência versus corrente da PEMFC

A curva característica da pilha de combustível, associada ao gráfico da tensão versus corrente, depende dos materiais de que são feitos os eléctrodos incluindo o catalisador, depende também da resistência interna, da temperatura e do volume de hidrogénio e de oxigénio fornecidos.

A figura 11 corresponde à tensão da pilha de combustível. Esta apresenta um ligeiro decréscimo de 53 para 48V com o aumento da corrente.

A figura 12 corresponde à potência fornecida pela pilha de combustível. Esta figura mostra que à medida que a corrente pedida pela carga aumenta, a potência fornecida à carga também aumenta. A potência máxima foi obtida para a tensão de 48.02V e corrente de 115.8A.

5.3 Rendimento da PEMFC e consumo de hidrogénio

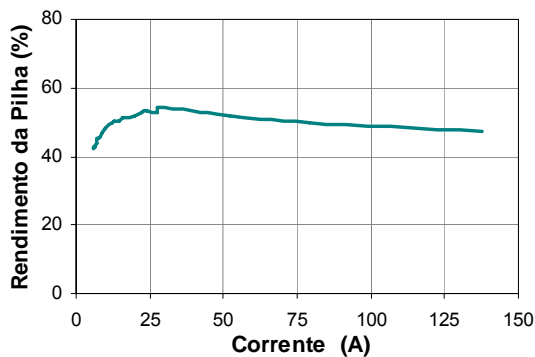


Figura 13 - Rendimento versus corrente da PEMFC

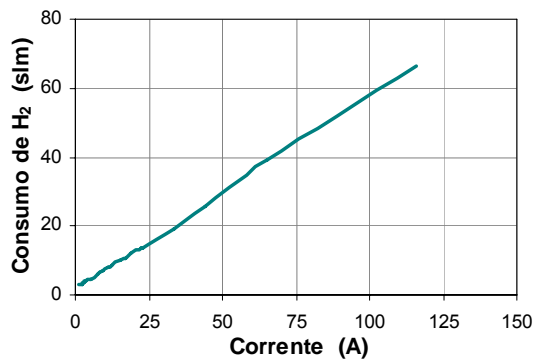


Figura 14 - Consumo de hidrogénio versus corrente da PEMFC . slm = standard liters per minute.

A figura 13 corresponde à eficiência da pilha de combustível em regime permanente. Verifica-se que apesar da variação substancial no regime de carga, o rendimento se mantém praticamente constante, o decréscimo ligeiramente com o aumento do regime de carga. Em regime permanente a eficiência varia entre os 40% - 50%. À semelhança dos resultados obtidos para a potência fornecida pela pilha de combustível, verifica-se que o consumo de hidrogénio, tal como mostra a figura 14 é proporcional à potência pedida pela carga.

6. Modelo dinâmico da PEMFC

Uma vez analisado o desempenho da pilha de combustível em regime permanente, é necessária a sua caracterização em regime dinâmico. Para tal, foi criado um modelo que permitirá analisar quais as melhores estratégias de controlo a implementar, no conversor de electrónica de potência DC/AC, para aplicação da pilha de combustível a diferentes tipos de carga e de redes, resultando num melhor aproveitamento da energia fornecida pela PEMFC.

Considera-se o modelo dinâmico da pilha de combustível representado através do circuito eléctrico equivalente que se mostra na Figura 15, em que as quedas de tensão dos componentes de activação e de concentração, representadas respectivamente pelas resistências R_{act} e R_{con} , são causadas pelo fenómeno do efeito de dupla camada [4]. Este fenómeno, existe normalmente, no contacto entre dois materiais diferentes. Sempre que dois materiais com cargas diferentes estão em contacto, verifica-se uma acumulação da carga nas suas superfícies ou em alternativa, verifica-se a transferência da carga de uma para a outra. A camada da carga junto da interface eléctrodo/electrólito actua como se, se tratasse de um armazém de cargas eléctricas de energia, comportando-se desta forma, como um condensador eléctrico. Desta maneira, pode-se considerar que existe nas tensões da activação e da concentração um atraso de primeira ordem, cuja constante do tempo, τ (s), associado com o este atraso resulta do produto a seguir.

$$\tau = C \times Ra \quad (13)$$

C representa a capacidade equivalente do sistema da ordem de alguns Farad (F) e R_a a resistência equivalente em Ohm (Ω).

Nesta forma, estas tensões irão mudar dinamicamente com a corrente, até que atinjam os seus valores em regime permanente. O valor de R_a é obtido a partir de:

$$Ra = \frac{V_{act} + V_{con}}{i_{FC}} \quad (14)$$

O efeito capacitivo analisado assegura um bom desempenho dinâmico da pilha, desde que a tensão varie suavemente para um novo valor, em resposta a uma mudança na corrente actual, por parte da carga.

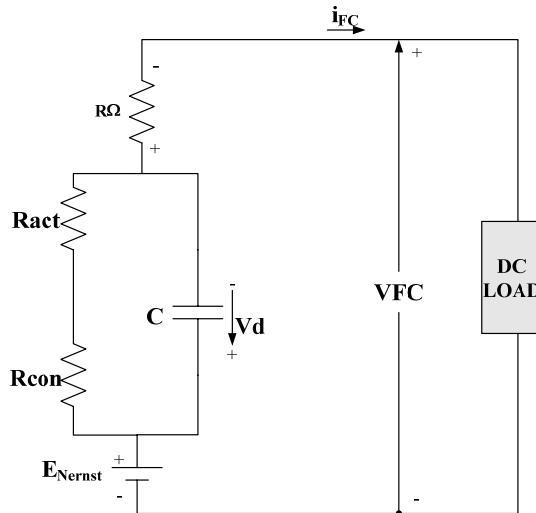


Figura 15 –Circuito eléctrico equivalente da pilha de combustível.

O condensador (C) colocado paralelamente às tensões de activação (R_{act}) e de concentração (R_{con}) tem em consideração o efeito dinâmico destas quedas de tensão. Este conjunto encontra-se ligado em série com o potencial termodinâmico (E_{Nernst}) e com a queda de tensão Óhmica (R_{Ω}). A equação dinâmica do modelo dinâmico representado pelo circuito da Figura 15 é dada pela equação:

$$\frac{dV_d}{dt} = \left(\frac{1}{C} \times i_{FC} \right) - \left(\frac{1}{\tau} \times V_d \right) \quad (1)$$

onde V_d representa a tensão dinâmica equivalente do condensador (associada a V_{act} e a V_{con}); C representa a capacidade eléctrica equivalente; e τ uma constante de tempo definida por:

$$\tau = C \times Ra = C \times (R_{act} + R_{con}) = C \times \left(\frac{V_{act} + V_{con}}{i_{FC}} \right) \quad (2)$$

A tensão em circuito aberto para uma célula de combustível é definida por:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{Ohmic} - V_d = E_{Nernst} - V_{Ohmic} - V_{act} - V_{con} \quad (3)$$

Onde; E_{Nernst} representa o potencial termodinâmico de uma única célula (V), V_{act} representa as perdas de activação entre o ânodo e do cátodo (V), V_{Ohmic} representa as perdas Óhmicas dos prótons e dos electrões(V), V_{con} representa as perdas de concentração do oxigénio e do hidrogénio(V).

Considerando as n células ligadas em série, a tensão em circuito aberto de pilha de combustível (PEMFC) é dada por:

$$V_s = n \times V_{FC} \quad (4)$$

7. Escolha dos parâmetros e validação do modelo da PEMFC

Para além da definição das equações do modelo é necessária a atribuição de valores aos parâmetros que caracterizam uma determinada PEMFC. Estes, podem ser fornecidos pelo fabricante, através de resultados experimentais, ou caso essa informação não seja disponibilizada pelo fabricante ou seja insuficiente, é necessário encontrar métodos de os determinar. Neste trabalho optou-se pelo processo de optimização.

A optimização consiste na utilização de um algoritmo que percorre e analisa as soluções no espaço dos parâmetros. Parte-se de uma estimativa inicial dos parâmetros, e em cada iteração, o resultado experimental é comparado com o simulado, dando origem a um novo erro que desencadeia uma nova pesquisa no espaço dos parâmetros, isto é, uma variação dos valores dos parâmetros do conjunto actual. O processo de optimização evolui, convergindo para um erro mínimo. Quanto melhor for a estimativa inicial, mais rápido será o processo de optimização e mais facilmente convergirá para o valor óptimo.

A implementação do algoritmo e do modelo de simulação foram realizados em ambiente *Matlab/Simulink*, o algoritmo de optimização escolhido foi o *Simulated Annealing (SA)*. A figura 16, mostra o modelo em ambiente *Matlab/Simulink*.

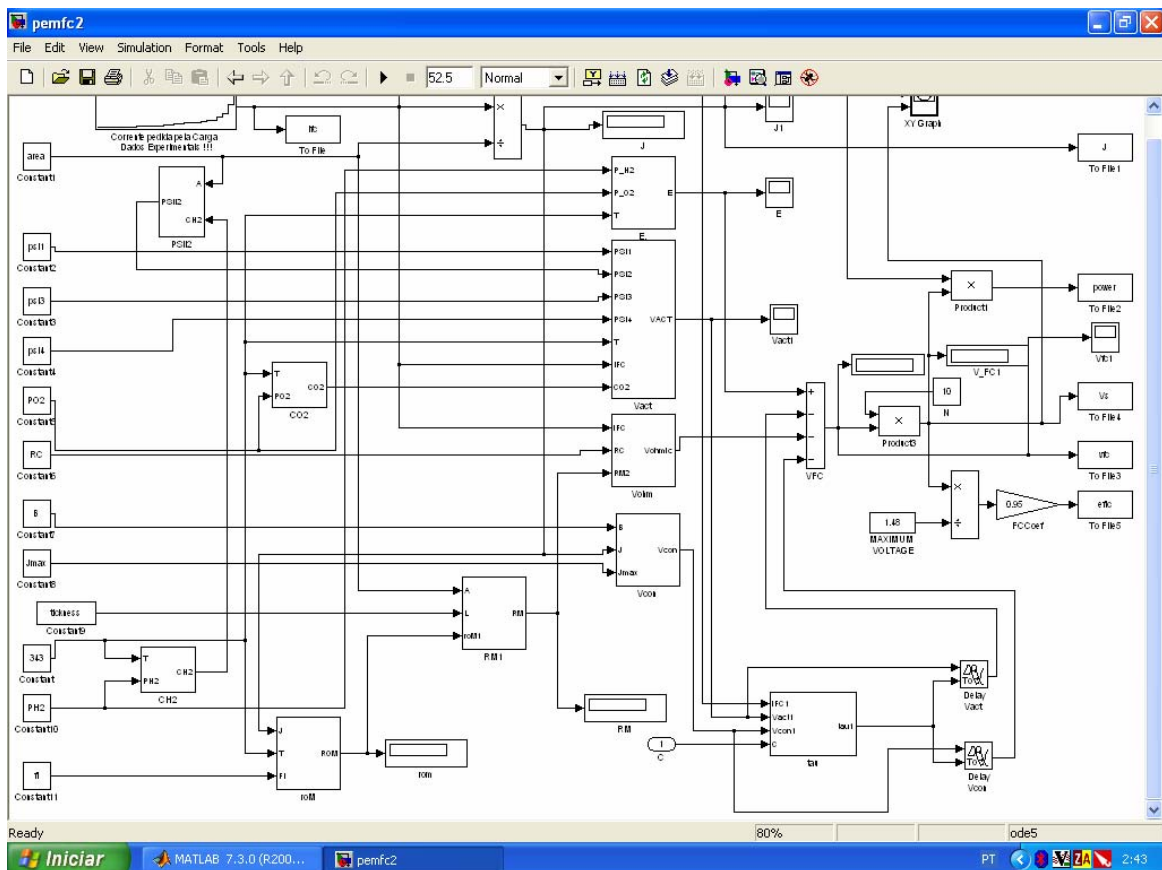


Figura 16 –Modelo da pilha de combustível em ambiente Matlab/Simulink.

8. Conclusões

A tendência actual em termos energéticos passa necessariamente pelo uso cada vez maior de fontes de energia amigas do ambiente. O aumento da poluição ambiental associada a grandes catástrofes climáticas a que temos assistido e as limitações nas reservas de combustíveis fósseis, estão a contribuir para a investigação e desenvolvimento destas novas tecnologias.

A pilha de combustível surge neste contexto como uma das mais promissoras tecnologias, com emissão de poluentes praticamente nulas e adaptável a inúmeras aplicações.

Apresentou-se neste trabalho, um sistema comercial de uma pilha de combustível do tipo PEMFC, e demonstrou-se que o seu desempenho em regime permanente, apresentava bons resultados, de acordo com as suas características.

Apresentou-se também a metodologia seguida para a modelização dinâmica da pilha de combustível, o método adoptado para extracção dos parâmetros e a implementação do modelo em ambiente *Matlab/Simulink*.

9. Referências bibliográficas

1. Corrêa, J.M., et al., *Sensitivity Analysis of the Modeling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2005. **20**(1): p. 204-210.
2. El-Sharkh, M.Y., et al., *Analysis of Active and Reactive Power control of a Stand-alone PEM Fuel Cell Power Plant*. IEEE Transaction on Power Systems, 2004. **19**(4): p. 2022-2028.
3. Corrêa, J.M., et al., *Simulation of Fuel-Cell Stacks Using a Computer-Controlled Power Rectifier With the Purposes of Actual High-Power Injection Applications*. IEEE Transaction on Industry Applications, 2003. **39**(4): p. 1136-1142.
4. Corrêa, J.M., et al., *An Electrochemical-Based Fuel Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach*. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2004. **51**(5): p. 1103-1112.
5. Almeida, P.E.M. and M.G. Simões, *Neural Optimal Control of PEM Fuel Cells with Parametric CMAC Networks*. IEEE Transaction on Industry Applications, 2005.
6. Forrai, A., et al., *Fuel-Cell Parameter Estimation and Diagnostics*. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2005. **20**(3).
7. Chiu, L.-Y., B. Diong, and R.S. Gemmen, *An Improved Small-Signal Model of the Dynamic Behavior of PEM Fuel Cells*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 2004. **40**(4): p. 970-977.
8. Yu, D. and S.Yuvarajan. *A NOVEL CIRCUIT MODEL FOR PEM FUEL CELLS*. in *Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC'04*. 2004.
9. Friede, W., S. Raël, and B. Davat, *Mathematical Model and Characterization of the Transient Behavior of a PEM Fuel Cell*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 19, NO. 5, SEPTEMBER 2004, 2004. **19**(5): p. 1234-1241.
10. Lasseter, R. *Dynamic Models for Micro-Turbines and Fuel Cells*. 2001. Power Engineering Society Summer Meeting: IEEE.
11. Larminie, J.E. and A. Dicks, *Fuel Cell system Explained*. 1ª ed. Vol. 1. 2000: John Wiley & Sons, Chichester. 308.
12. <http://www.plugpower.com/>
13. <http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/futuro.html>