

MÓDULOS DE SIMULAÇÃO PARA ESTUDOS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas – tiara_rs@yahoo.com.br

Paulo José M. Menegáz – p.menegaz@ele.ufes.br

Jussara Farias Fardin – jussara@ele.ufes.br

Domingos Sávio Lyrio Simonetti – d.simonetti@ele.ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Elétrica

7.5 Células a combustível

Resumo. Este trabalho descreve um ambiente de simulação em MATLAB/SIMULINK[®] de Células a Combustível. No ambiente de simulação, a célula é implementada por diagramas de blocos. As curvas características da célula são utilizadas para validar o modelo, e o módulo desenvolvido é utilizado incorporado a outros sistemas, por exemplo, uma bateria sendo carregada. Nesse aspecto são comparados os resultados da alimentação da bateria diretamente da célula e da bateria alimentada por um módulo que faz a célula operar no ponto de máxima potência. O módulo é facilmente integrável em estudos realizados no programa em que foi desenvolvido.

Palavras-chave: Energia Renovável, Célula a Combustível, Simulação

1. INTRODUÇÃO

Célula a Combustível - CaC - é uma tecnologia que utiliza o hidrogênio e o oxigênio como combustíveis e tem como produto eletricidade e água. Os benefícios da utilização desta tecnologia são os mais variados, e dentre eles pode-se destacar sua alta eficiência e a não emissão de poluentes quando se utiliza o hidrogênio puro. Fatores como a diminuição dos custos de energia, aumento da eficiência dos equipamentos, a preocupação com o Meio Ambiente e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis tem incentivado a P&D das células a combustível em todo o mundo e caracterizado essa tecnologia como uma fonte de energia alternativa.

O seu principal combustível, o hidrogênio, a fonte de energia mais abundante do universo, pode ser obtido a partir de diversas fontes renováveis e também a partir de recursos fósseis, mas com muito menor impacto ambiental. Esse fato coloca o Brasil numa situação de grande privilégio, pois se pode obter hidrogênio das várias reservas de gás natural, das inúmeras hidroelétricas e do agronegócio de cana-de-açúcar altamente desenvolvido, entre outros (Serra e outros, 2005).

As células a combustível têm um mercado promissor e crescente, sendo uma solução para a geração de energia no próprio local de consumo, desde uma indústria, residência, centros comerciais, além de sua utilização em automóveis, aviões, motos, ônibus e equipamentos portáteis, tal como o telefone celular e os laptops.

O presente trabalho apresenta um ambiente de simulação de células a combustível, desenvolvido usando a ferramenta de simulação Matlab[®] / Simulink[®] [The MathWorks, LEE/UERJ]. A possibilidade de simular com razoável representatividade, fenômenos de naturezas diversas, possibilita a detecção de falhas de implementação antes da montagem do sistema considerado. No estudo de estruturas alimentadas a partir de fontes renováveis de energia é de grande importância ter-se disponível um modelo confiável da fonte. Se as equações descritivas do comportamento da fonte são conhecidas, a sua incorporação em um módulo de simulação é de grande utilidade em estudos de aplicação.

2. CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Existem basicamente seis tipos de célula a combustível, que variam em tamanho, temperatura, combustível, eletrólito e aplicações. O tipo de eletrólito normalmente determina a temperatura de operação, que varia bastante entre as tecnologias. Cada tipo de tecnologia requer materiais e combustíveis particulares, além de terem sua aplicação direcionada. O nome da célula a combustível normalmente está relacionado ao tipo de eletrólito utilizado na mesma.

O trabalho desenvolvido explora o funcionamento de uma Célula a Combustível de Membrana Polimérica (PEM), também conhecida como “célula a combustível de membrana trocadora de prótons”. Esse tipo de CaC apresenta partida rápida e responde com flexibilidade às variações de carga. A alta densidade de potência deste tipo de CaC viabiliza a sua utilização, sendo que esta é a tecnologia preferida para aplicações em automóveis, equipamentos portáteis como telefones celulares, e para geração de energia em residências.

A célula a combustível é composta basicamente de placas elétricas de difusão de gases, eletrodos, catalisadores, membrana ou eletrólito, circuito externo e, algumas vezes, um reformador para extrair o hidrogênio de um combustível.

O funcionamento de uma célula a combustível PEM é relativamente simples (Corrêa e outros, 2004; Costa, 2005). O Hidrogênio é fornecido a um catalisador, e este quebra a molécula de hidrogênio em um íon positivo e um elétron. Os elétrons provenientes de várias moléculas de hidrogênio circulam por um circuito externo, e o íon positivo (próton)

atravessa totalmente uma membrana, recombinando com o elétron e mais a molécula de oxigênio (O₂) retirada do ar que é injetada do outro lado da CaC, formando vapor de água. Os elétrons circulantes são a corrente elétrica que vai ser aproveitada. A Fig. 1 (www.energiadistribuida.com) mostra em forma resumida o funcionamento de uma CaC PEM.

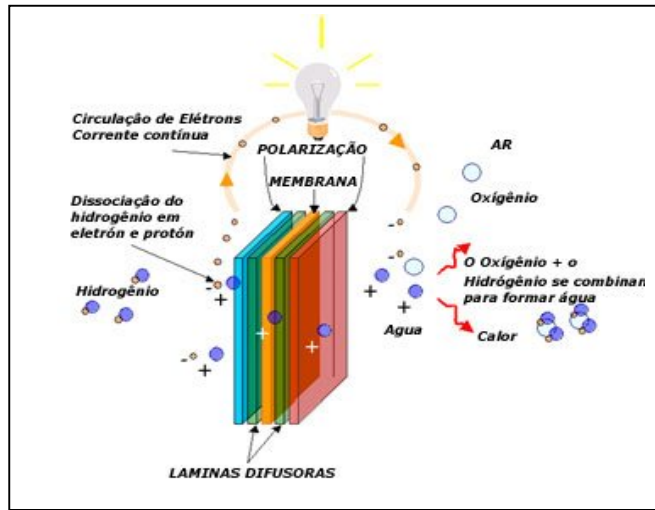


Figura 1 – Funcionamento de uma Célula a Combustível PEM.

Numa Célula a Combustível, o comportamento elétrico é determinado pela tensão que ela fornece sob determinada corrente e pelas perdas geradas por essa corrente.

A equação geral que determina a tensão de saída real de uma célula pode ser vista na Eq. (1), onde E_{cell} é a tensão de saída ideal da célula, e V_{act} , V_{ohm} e V_{conc} representam as tensões associadas às perdas por ativação, perdas ôhmicas e perdas por concentração, respectivamente. Quando não há circulação de corrente na célula, os termos V_{act} , V_{ohm} e V_{conc} são nulos, e assim a tensão de saída real da célula é a própria tensão ideal da célula.

$$V_{cell} = E_{cell} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} [V] \quad (1)$$

As perdas por ativação são relativas às perdas pela lentidão das reações químicas, por exemplo, para dar início à reação química. Essa energia, necessária para iniciar a reação é chamada de energia de ativação e, em algumas reações, pode atrasar o processo. Elas são dominantes na parte inicial da reação química, ou seja, quando a densidade de corrente na célula é baixa.

As perdas por concentração têm sua origem no estabelecimento de um gradiente de concentração do reagente que é consumido no eletrodo através da reação química. Sempre que um dos reagentes é consumido pela reação eletroquímica nos eletrodos da célula, existe a incapacidade da vizinhança do meio em manter a concentração inicial junto ao eletrodo. Este gradiente de concentração do reagente próximo ao eletrodo produz uma queda de tensão no valor da tensão elétrica da célula, denominada perda por concentração ou tensão de polarização por concentração. Na prática, o fator que mais contribui para a polarização por concentração é o transporte lento dos íons pela membrana em situações de alta densidade de corrente, o que coloca sua influência predominante em condições extremas de carga.

A resistência ôhmica de uma CaC PEM está relacionada à resistência do fluxo de elétrons através dos eletrodos e ao fluxo de íons no eletrólito, ou seja, diz respeito à resistência da membrana polimérica. Os valores de resistência ôhmica são dados essencialmente construtivos, que poderão sofrer variações devido à temperatura de operação e, no caso do eletrólito, sofrerá alterações também conforme a variação da umidade necessária para a condução iônica.

A Fig. 2 (Costa, 2005) mostra a curva característica de uma Célula a Combustível, onde se pode observar a diferença entre a tensão de saída ideal e a tensão de saída real em função da corrente que circula.

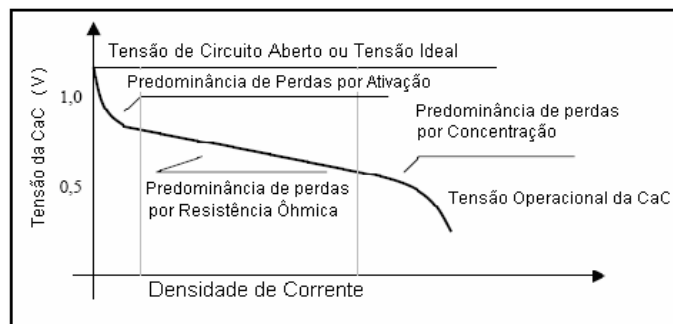


Figura 2 – Característica $V \times I$ para uma Célula a Combustível.

Durante o funcionamento da célula a combustível não existe perdas de energia por vibração ou ruído, assim toda energia perdida durante o processo será dissipada em forma de calor. Portanto a potência dissipada em forma de calor pode ser facilmente calculada através de um balanço energético conforme indicado pela Eq. (2), onde E_0 é o potencial padrão da CaC (Amphlett, 1995).

$$P = (E_0 - V_{cell}) * I \quad [W] \quad (2)$$

A potência de saída de uma CaC é definida pela Eq. (3).

$$P = V_{cell} * I \quad [W] \quad (3)$$

3. MÓDULOS DE SIMULAÇÃO DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL PEM

Para a simulação de células a combustível, foram desenvolvidos alguns módulos básicos em ambiente Matlab/Simulink®, que podem ser conjugados conforme o interesse do estudo (o pacote simulink permite que o usuário prepare módulos adicionais conforme sua necessidade). Os módulos são apresentados a seguir.

3.1 Módulo CaC

Para o modelamento de uma CaC em Matlab, utilizou-se q Eq. (1), editada como linha de programa e gerando uma rotina (Matlab Function), onde o objetivo dessa simulação era obter uma função que pudesse ser utilizada no ambiente Simulink. Para implementar a simulação todas as equações que determinam as perdas foram inseridas no código e a Eq. (1) foi estendida para N células a combustível, de forma a obter o comportamento de uma pilha de células. Com isso, modelou-se uma CaC a partir do bloco matlab_function e este foi implementado em ambiente Simulink. O bloco construído para representar a CaC é mostrado na Fig. 3, onde pode-se observar os parâmetros de entrada e saída.

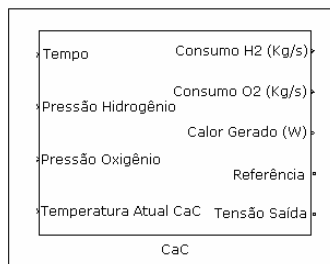


Figura 3 – Bloco representativo da Célula a Combustível.

A CaC disponibilizada oferece como grandezas de entrada as variáveis do processo, a Pressão do Hidrogênio, do Oxigênio e a Temperatura da célula. Como grandezas de saída têm-se a tensão (e a sua referência), o calor gerado e os consumos de H_2 e O_2 . As características construtivas da célula podem ser modificadas pelo usuário, de acordo com o tipo de CaC que está sendo simulada, bastando clicar 2 vezes no elemento CaC, abrindo a máscara visualizada na Fig. 4, onde L é a espessura da membrana, A a área da célula, B é um coeficiente característico da célula, J_{max} a máxima densidade de corrente e N_{CaC} o número de células em série.

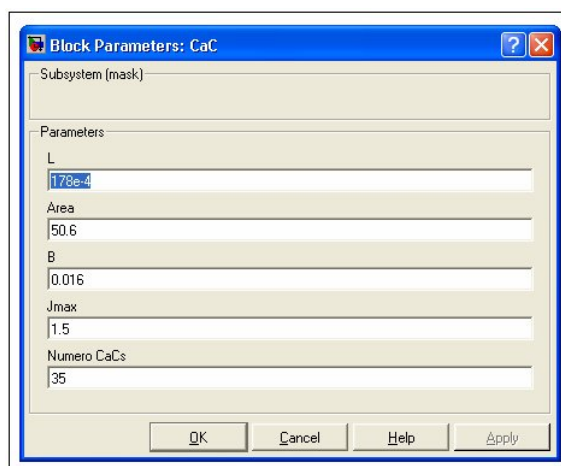


Figura 4 - Parâmetros da CaC disponíveis para mudança.

3.2 Módulo Bateria

O modelo de bateria utilizado é simples, mas adequado à finalidade de estudos por simulação. É composto de um capacitor em série com uma fonte de tensão, cujo valor corresponde à carga inicial da bateria. Em paralelo, tem-se outra fonte de tensão e um diodo no sentido fonte, cuja função é limitar a máxima tensão na bateria (cerca de 14,2V em uma bateria de 12V). Por fim, uma resistência série ao conjunto representa a resistência série equivalente. A Fig. 5 mostra a bateria internamente.

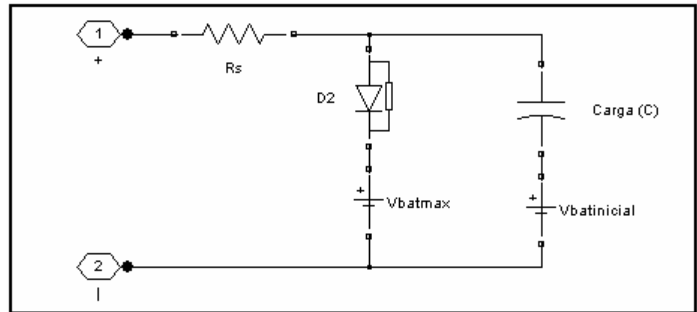


Figura 5 - Representação da Bateria.

3.3 Módulo Conversor CC-CC

O módulo conversor faz a adaptação de tensão entre a carga e a CaC. O conversor comporta-se na entrada como fonte de tensão (impõe tensão à CaC), e na saída como fonte de corrente (impõe corrente à carga), como pode ser visto na Fig. 6. Através da máscara do bloco pode-se selecionar o tipo de conversor, estando disponíveis conversores PWM tipo buck, boost, e buck-boost (Fig. 7).

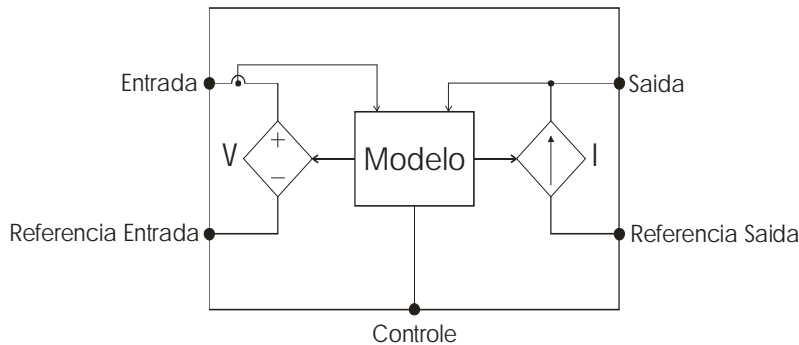


Figura 6 - Comportamento do conversor PWM.

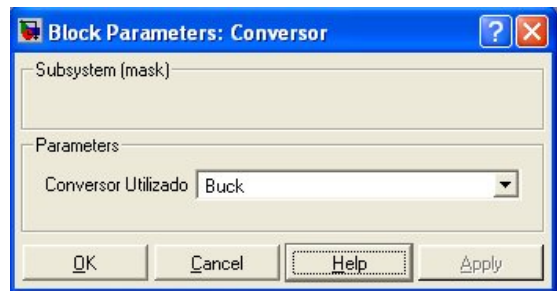


Figura 7 – Bloco conversor.

O sinal de comando do módulo conversor é a razão cíclica oriunda do módulo MPPT. Internamente, conforme o conversor selecionado e a tensão de saída existente, o módulo impõe ao módulo CaC a tensão calculada e, de acordo com a corrente fornecida, é imposta a corrente na carga.

3.4 Módulo MPPT

O módulo de busca do ponto de operação com máxima potência da CaC foi aproveitado de um ambiente de simulação similar ao aqui apresentado, direcionado a uso com painéis fotovoltaicos (Brumatti e outros, 2007) é

disponibilizado em um módulo MPPT como mostrado na Fig. 8. As variáveis de entrada são a tensão e a corrente da CaC, e a saída é a razão cíclica a ser aplicada ao conversor.

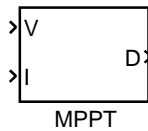


Figura 8 – Módulo de implementação do MPPT.

A seleção do método MPPT a ser empregado, informação da discretização da saída (variação da razão cíclica do conversor, apresentado na próxima sub-seção), período de amostragem, e razão cíclica inicial, são passadas através da máscara do módulo, que se mostra na Fig. 9.

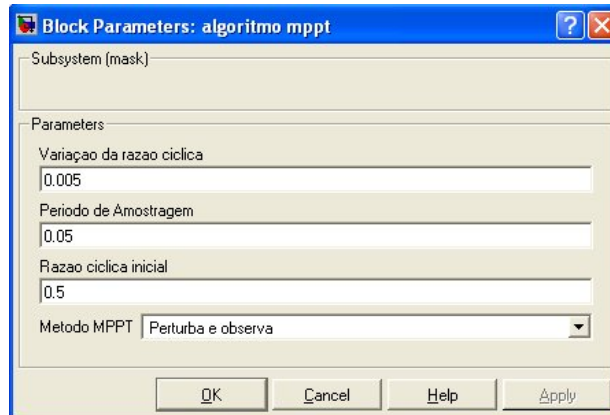


Figura 9 – Parâmetros para o Módulo MPPT.

Os estudos aqui apresentados fizeram uso do método *perturba & observa* (P&O), que consiste em estar sempre produzindo perturbações de pequeno sinal no ponto de operação do conversor (incrementando ou decrementando a razão cíclica), e analisando o comportamento da potência (Walker, 2000). Enquanto a potência aumenta a perturbação mantém o sentido de variação, porém se há redução de potência a perturbação inverte o sinal. O método foi implementado na forma de linhas de programa (comandos MATLAB), e permite que facilmente sejam implementados outros algoritmos, de forma a comparar o desempenho de várias soluções. Para tal fim, basta explorar a máscara (*look under mask*) do MPPT, e modificar a função Matlab do bloco perturba e observa conforme o algoritmo de interesse. Também está disponível o método da condutância incremental, que foi implementada utilizando elementos já disponíveis no Simulink.

4. UTILIZAÇÃO E RESULTADOS DO ESTUDO

Para observar o ponto elétrico de operação de uma CaC observou-se o comportamento da tensão de saída na CaC em função da corrente. Para uma primeira observação, utilizou-se uma fonte de corrente controlada e limitada para simular uma carga. A Fig. 10 ilustra a montagem da CaC associada à carga. A CaC utilizada foi do tipo *Ballard Mark V 5 kW* descrito na Tab. 1, cujos parâmetros são aqueles da Fig. 4.

A fonte de corrente utilizada para simular uma carga foi limitada, como dito anteriormente. Isso foi necessário para demonstrar a limitação física de produção de corrente da CaC. Cada tipo de CaC tem sua própria limitação de corrente, definida por $I_{max} = J_{max} * \text{Área}$. Assim, se uma carga necessita de uma corrente maior que I_{max} , a célula não será capaz de fornecer tal corrente, mas ficará limitada a fornecer I_{max} .

Tabela 1 - Parâmetros da CaC Ballard V 5Kw.

Parâmetro	Valor
T	343 K
A	50,6 cm ²
L	1,78E-02
Phid	1 atm
Poxi	1 atm
B	0,016 V
Jmax	1500 mA/cm ²

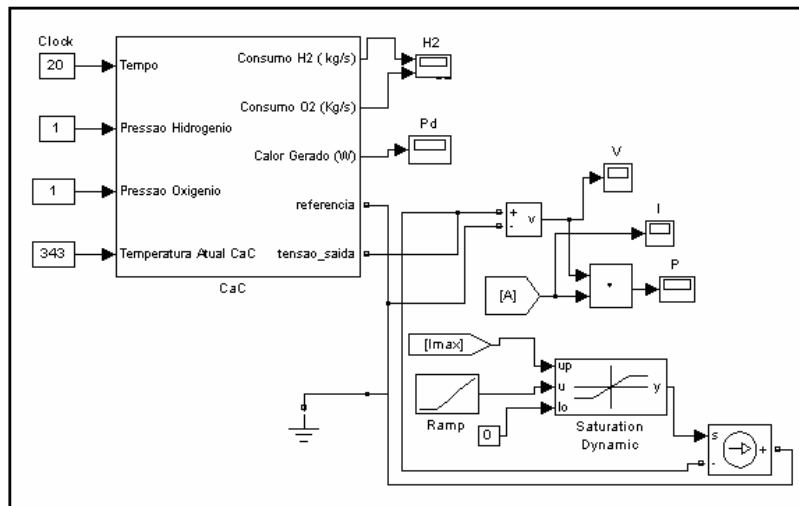


Figura 10 - CaC com carga representada por uma fonte de corrente limitada.

Os resultados da simulação são mostrados a seguir. A Fig. 11 mostra a corrente da CaC, a Fig. 12 representa a tensão real de saída da CaC, e a Fig. 13 a potência de saída da CaC.

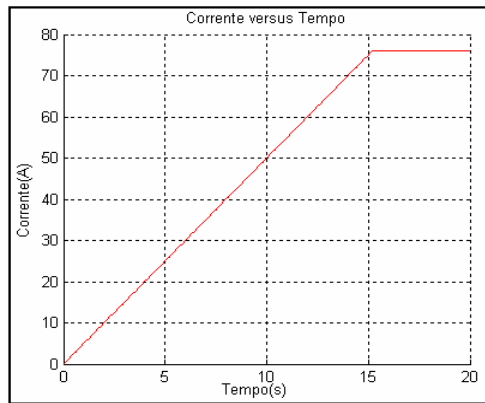


Figura 11 – Forma de onda da corrente para o caso de carga como fonte de corrente controlada.

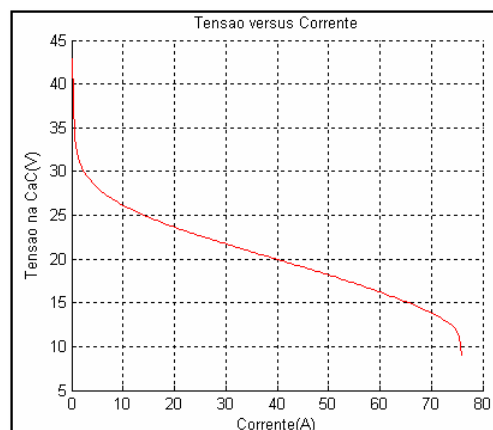


Figura 12 – Forma de onda da tensão para o caso de carga como fonte de corrente controlada.

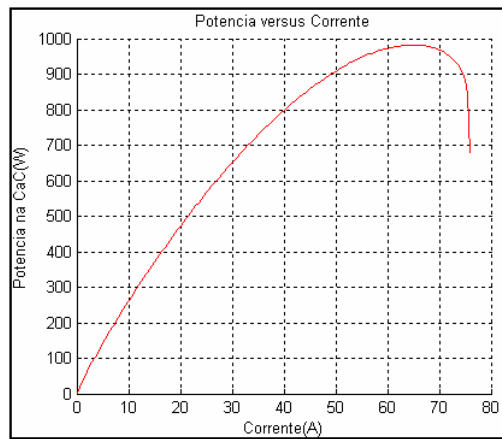


Figura 13 – Forma de onda da potência para caso de carga como fonte de corrente controlada.

A critério de comparação são mostradas as curvas de tensão versus densidade de corrente e potência versus densidade de corrente para um modelo diferente do que aqui é apresentado. As Fig. 14 e 15 mostram tensão e potência versus densidade de corrente empregando o modelo proposto por Mann e outros (Corrêa e outros, 2004).

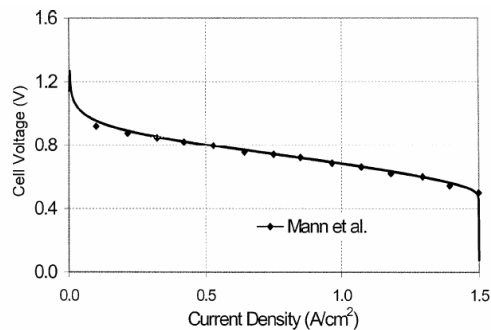


Figura 14 – Tensão versus densidade de corrente para modelo de Mann.

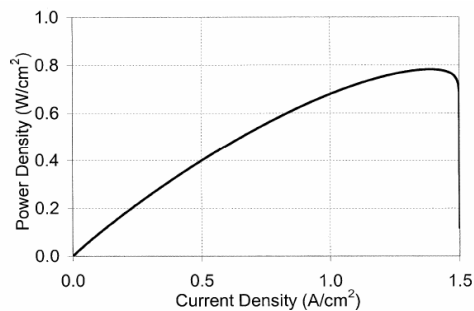


Figura 15 – Potência versus densidade de corrente para modelo de Mann.

Como pode ser observado, o comportamento obtido é similar com os que são apresentados neste trabalho.

4.1 Influência da temperatura de operação

Para uma análise da influência da temperatura numa CaC, foram feitas simulações com diferentes valores de temperatura. A seguir, as Fig. 16 e 17 mostram as tensões e as potências em função da corrente na CaC para dois valores diferentes de temperatura, 343K e 400K.

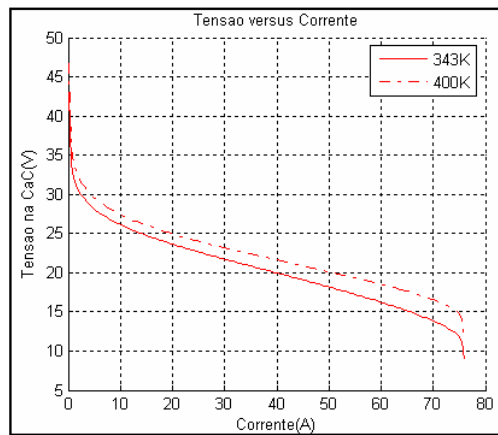


Figura 16 – Formas de Onda da Tensão para Diferentes Valores de Temperatura.

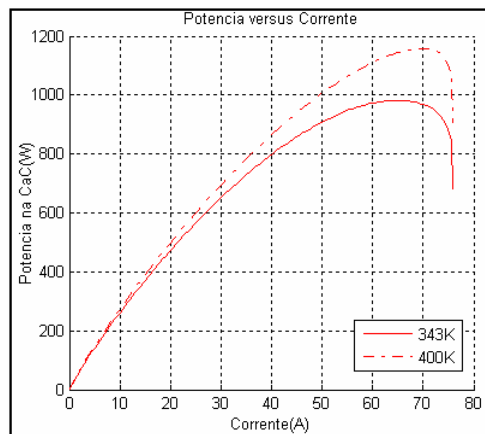


Figura 17 – Formas de Onda da Potência para Diferentes Valores de Temperatura.

Analisando as curvas, pode-se então concluir que um aumento de temperatura aumenta a tensão e a potência de saída da CaC, se comparado a um mesmo valor de corrente. Por exemplo, considerando a corrente de 65A, obtém-se da curva $V \times I$ um valor de tensão igual a 15V e um valor de potência igual a 970W, aproximadamente, para a temperatura de 343K. Quando a temperatura sobe para 400K, para o mesmo valor de corrente, 65A, a tensão é de 17,5V e a potência de 1150W, aproximadamente. É importante notar que o ponto de máxima potência foi deslocado. Para 343K esse ponto correspondia a 65A, 15V e 970W e a 400K o ponto corresponde a 70A, 14V e 1170W.

4.2 Simulação do modelo empregando carregamento de bateria

A utilidade do modelo desenvolvido foi testada aplicando uma CaC no carregamento de baterias. Com esse objetivo, foram utilizados os módulos CaC, conversor e MPPT. São considerados dois casos: um, em que a tensão nominal da bateria é de 48V, e outro considerando a tensão nominal da bateria de 12V.

4.2.1 Bateria associada diretamente a uma CaC

A primeira simulação é realizada supondo que a bateria será carregada diretamente conectada à CaC, conforme mostra a Figura . 18.

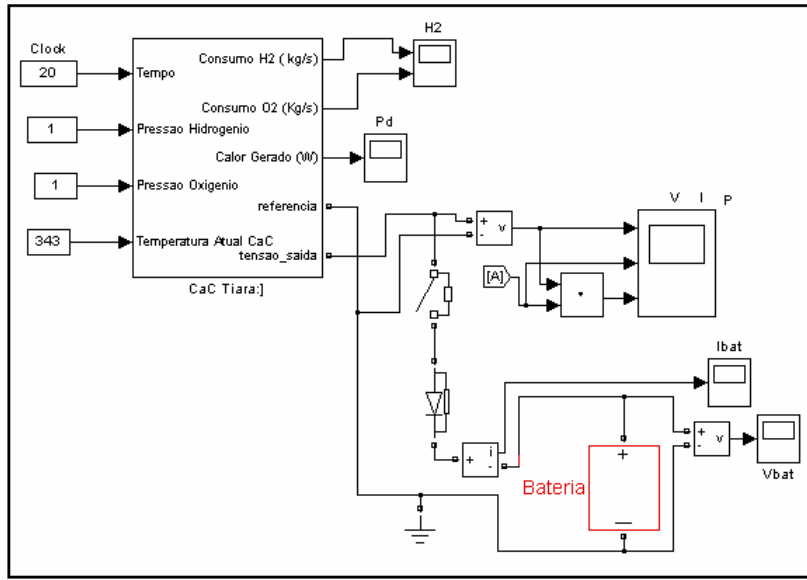


Figura 18 - CaC associada a uma bateria diretamente.

Os resultados obtidos, para os dois valores de tensão da bateria, são analisados posteriormente junto com os resultados da seção a seguir.

4.2.2 Bateria associada à CaC através do Conversor e do MPPT

Como a CaC, de forma similar a um painel solar, apresenta um ponto de operação em que, independente das condições de entrada, a potência gerada é máxima, realiza-se simulações utilizando o módulo MPPT, considerando um algoritmo de busca do ponto de máxima potência controlando um conversor de adaptação da tensão da CaC à bateria. A Fig. 19 mostra a bateria associada a uma CaC através de um conversor CC-CC e módulo MPPT.

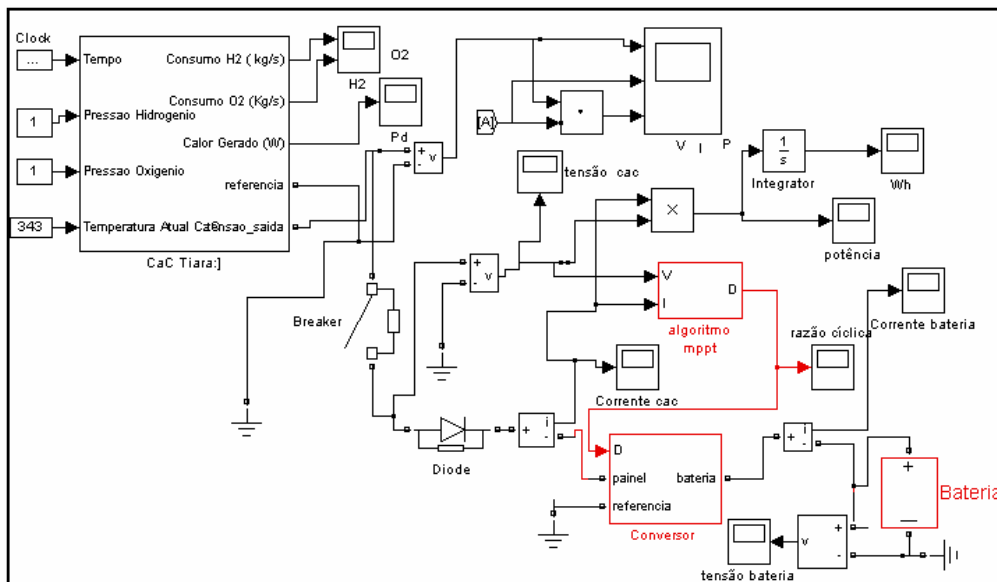


Figura 19 - CaC associada a uma bateria através do módulo MPPT.

As Fig. 20, 21 e 22 apresentam respectivamente a tensão, a corrente e a potência na bateria para o caso de tensão nominal igual a 48V. São representadas as curvas para o caso da bateria alimentada diretamente da CaC e para o caso em que a bateria é alimentada pela CaC através do MPPT.

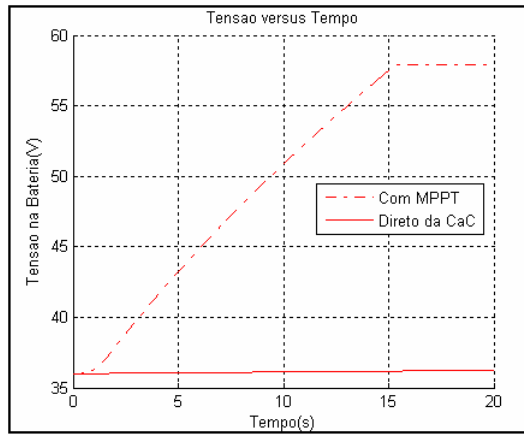


Figura 20 – Tensão na Bateria de 48V.

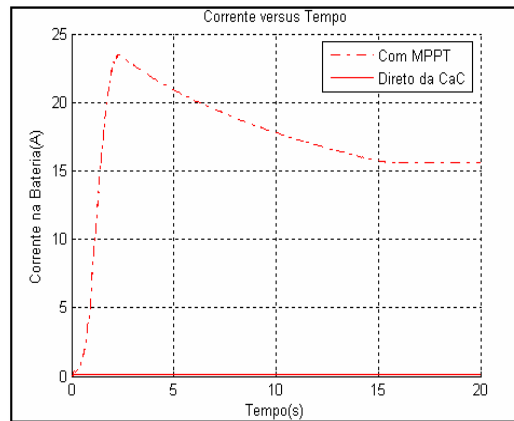


Figura 21 – Corrente na Bateria de 48V.

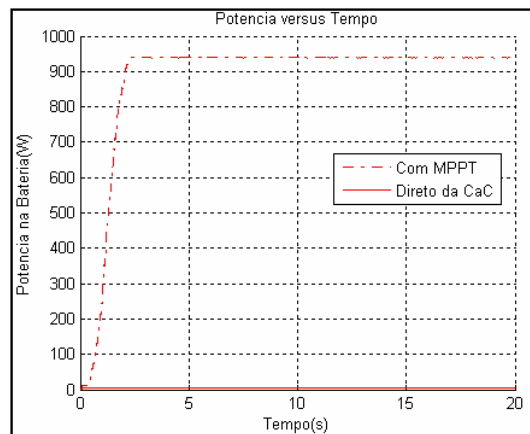


Figura 22 – Potência na Bateria de 48V.

A corrente na bateria com o MPPT atingiu valores significativos e passou a decrescer a partir do valor máximo de corrente, contribuindo para o crescimento da tensão à medida que seu valor decrescia, confirmando o comportamento da CaC. O fluxo de corrente foi suficiente para aumentar a tensão e carregar a bateria completamente, atingindo um valor de até 20% maior que o nominal. Neste caso a bateria carregou rapidamente, atingindo cerca de 57V em 15 segundos.

Para o caso da bateria alimentada diretamente da CaC, a corrente foi muito pequena no instante inicial, e passou a ser menor ainda com o tempo, não contribuindo para um crescimento significativo da tensão. Assim, para esta situação, a bateria não chegou a carregar completamente, atingindo cerca de 37V em 20 segundos.

Essa diferença de carga ocorreu porque, no caso com o MPPT, a CaC trabalha no ponto de máxima potência, cerca de 970W, fornecendo uma corrente de aproximadamente 65A (ver Fig. 13). Sem o MPPT, a CaC trabalha com uma tensão diretamente imposta pela bateria, fornecendo assim para 36V uma corrente inicial muito pequena, e que se reduzirá com o aumento da tensão da bateria.

As Fig. 23, 24 e 25 representam respectivamente a tensão, a corrente e a potência na bateria para o caso de tensão nominal igual a 12V. São representadas as curvas para o caso da bateria alimentada diretamente da CaC e para o caso em que a bateria é alimentada pela CaC através do MPPT.

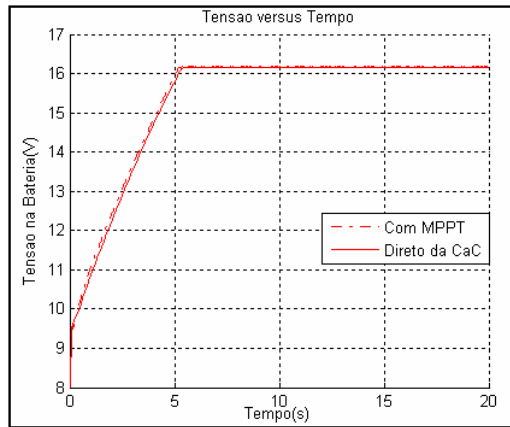


Figura 23 – Tensão na Bateria de 12V.

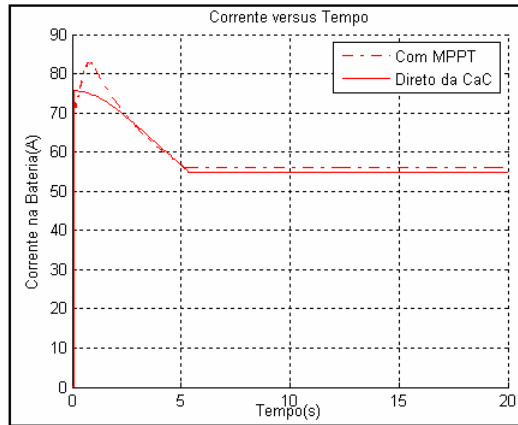


Figura 24 – Corrente na Bateria de 12V.

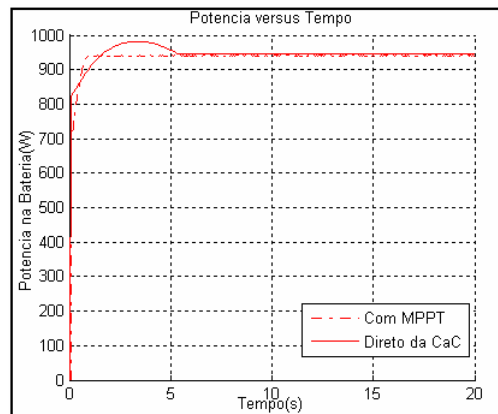


Figura 25 – Potência na Bateria de 12V.

Diante da nova situação (bateria de 12V), os resultados da simulação do carregamento de baterias diretamente da CaC e com o MPPT foram bem próximos. Como a tensão da bateria é de 12V, a corrente é bem diferente daquela da bateria de 48V (equivalente a uma corrente quase que nula), cerca de 62A (ver Fig. 12). Assim, mesmo sem o MPPT, a CaC trabalha num ponto muito próximo do ponto de máxima potência, proporcionando uma carga da bateria bem rápida, cerca de 5 segundos. O tempo de carga da bateria é o mesmo tanto para a carga direta quanto para a carga auxiliada pelo MPPT.

Assim, fica verificado que o modelo da CaC funcionou adequadamente na simulação de carga de uma bateria, podendo ser integrada e utilizada em ambiente simulink.

5 CONCLUSÕES

A partir da observação do comportamento predominante dos componentes de um sistema com células a combustível, foi possível preparar módulos operacionais das diversas partes que podem ser empregadas na implementação de um sistema de aproveitamento de energia gerada por células a combustível. Os módulos permitem estudar, com boa aproximação, o comportamento real do dispositivo que emula. Resultados de simulação envolvendo diversas combinações mostraram a importância do sistema para estudos de desenvolvimento de máximo aproveitamento energético das células a combustível. A modularidade permite que o usuário do ambiente adicione facilmente outras funcionalidades ao sistema.

Agradecimentos

Ao CNPq, pela bolsa IC de Tiara R.S. Freitas dentro do PIBIC CNPq/UFES.

REFERÊNCIAS

- LEE/UERJ (1999). Curso de Simulink 2.0, 1a edição. Programa Prodege / Sub-Programa Reenge Universidade do Estado do Rio de Janeiro, pdf gerado em 19/10/1999, acessado em 18/04/2007, em <http://www.lee.eng.uerj.br>.
- The MathWorks - MATLAB® and Simulink® for Technical Computing, em www.mathworks.com.
- G. Walker, "Evaluating MPPT Converter Topologies using a Matlab PV Model", Australasian Universities Power Engineering Conference 2000 - AUPEC'00, Vol. 1, Brisbane, pp. 138-143.
- Serra, E. T., Furtado J. G. M., Soares, G. F. W., Codeceira Neto, A. Células a combustível: uma alternativa para geração distribuída e sua inserção no mercado brasileiro. Rio de Janeiro: CEPEL, 2005.
- Costa, Rodolfo Antônio. Modelagem Computacional e Análise do Comportamento de Células a Combustível de Membrana Polimérica em Regime Estático e Dinâmico de Carga. Dissertação de Mestrado. Uberlândia, 2005.
- J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, and P. R. Roberge. Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell, I. Mechanistic model development. J. Electrochem. Soc., vol. 142, no. 1, pp. 1-8, Jan. 1995.
- M. Brumatti, M. Binda, D. Simonetti, J. Bruinsma. Ambiente de Simulação para Máximo Aproveitamento Energético de Painéis Solares, II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2007.
- J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha, M. G. Simões. An Electrochemical-Based-Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, pp. 1103-1112.

SIMULATION MODULES FOR FUEL CELLS STUDIES

Abstract. *This paper describes a MATLAB/SIMULINK® Fuel Cells simulation environment. In the developed simulation environment, block diagrams implement the fuel cell. The fuel cell's characteristic curves are used to validate the model, and the developed module is used incorporated on other systems, for example, a battery charging. In this aspect the simulation results of the battery directly charged from the cell, and by using a MPPT approach are compared. The module is easefully incorporated in other systems using the same software.*

Key words: Renewable Energy, Fuel Cell, Simulation.