

## **ESTUDOS QUANTITATIVOS DA INFLUÊNCIA DE REAGENTES EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO CARBONATO FUNDIDO**

**Elisângela Martins Leal**

Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, Guaratinguetá, SP. 12.516-410  
elisange@feg.unesp.br

**José Luz Silveira**

Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia, campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, Guaratinguetá, SP. 12.516-410  
jose luz@feg.unesp.br

***Resumo.** As células a combustível têm emergido como uma das mais promissoras tecnologias para geração de energia no futuro. A célula a combustível do tipo carbonato fundido (MCFC) utiliza uma matriz cerâmica de aluminato de lítio onde está retida uma mistura de carbonatos alcalinos (geralmente uma mistura de lítio e potássio ou lítio e sódio). Inicialmente são apresentadas algumas informações técnicas sobre os principais tipos de células a combustível operando como unidades de demonstração no mundo. Posteriormente, apresenta-se um estudo da influência do fluxo de reagentes na produção de eletricidade. A seguir, são levantadas curvas de eletricidade e calor gerado e curvas de tensão para a célula MCFC. Como conclusão, a célula de combustível do tipo carbonato fundido pode ser excelente oportunidade para intensificar a produção de energia no Brasil, permitindo alta eficiência operacional, redução de impactos ambientais e confiabilidade no fornecimento de energia.*

**Palavras chave:** célula a combustível, eletricidade, análise termodinâmica, análise eletroquímica.

### **1. Introdução**

Em todo mundo, tornaram-se objetivos prioritários da ciência, engenharia e governos, a necessidade de se economizar energia e buscar novas tecnologias de geração de energia para o futuro, levando-se sempre em consideração os efeitos relacionados com o meio ambiente. O uso da energia em equilíbrio com o desenvolvimento sócio-econômico representa um dos grandes desafios da humanidade. Porém, torna-se importante compreender os processos envolvidos nas transformações energéticas e suas conseqüências. Nesse ponto é oportuno salientar a necessidade de serem revistas as formas de uso da energia, adequando-as ao uso mais eficiente e dentro de limites pré-definidos na produção energética.

As células a combustível podem ser definidas como dispositivos que diretamente convertem energia química de seus reagentes em eletricidade em corrente contínua, de baixa tensão, via reações eletroquímicas, mas sem consumir os materiais que estão contidos em sua estrutura (Hirschenhofer *et al.*, 1994). A Tab. (1) mostra as características dos tipos mais difundidos.

Muitos investigadores têm estudado a viabilidade do uso de sistemas que utilizam células a combustível para produção de eletricidade e calor útil. As células a combustível utilizam hidrogênio puro como combustível, que pode ser produzido por um processo chamado reforma a vapor externa de combustíveis, tais como hidrocarbonetos, álcoois, entre outros. Entretanto, para células a combustível que operam em alta temperatura, tais como a célula a combustível do tipo carbonato fundido (MCFC) e a célula a combustível do tipo óxido sólido (SOFC), o processo de reforma interna a vapor é possível (Cavallaro *et al.*, 1992).

Tabela 1. Principais tipos de células a combustível [Leal, 2000].

<b>Tipo de Célula</b>	<b>Eletrólito</b>	<b>Temperatura de Operação</b>	<b>Reagentes</b>
Alcalina (AFC)	KOH (25-50%)	25 - 80°C	H <sub>2</sub> / O <sub>2</sub>
Membrana de troca de Prótons (PEMFC)	Polímero	70 - 100°C	H <sub>2</sub> de reforma / O <sub>2</sub> (ar)
Ácido Fosfórico (PAFC)	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	180 - 210°C	H <sub>2</sub> de reforma / O <sub>2</sub> (ar)
Carbonato Fundido (MCFC)	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600 - 700°C	Gás natural / carvão
Óxido Sólido (SOFC)	ZrO <sub>2</sub> / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	900 - 1100°C	Gás natural / carvão

A proposta deste trabalho consiste em descrever alguns resultados obtidos, através da aplicação da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, associado a um estudo do sistema eletroquímico, considerando a célula de combustível do tipo carbonato fundido com reforma interna direta a vapor, utilizando gás natural como combustível.

## 2. Célula a combustível do tipo carbonato fundido (MCFC)

As células a combustível do tipo carbonato fundido (MCFC) são consideradas células da segunda geração. Esta tecnologia tem sido extensivamente estudada em várias pesquisas e programas de desenvolvimento. A primeira MCFC foi demonstrada por Broers e Ketelaar na década de 1950. O interesse neste dispositivo se deve a geração de energia elétrica em grande escala. Inclui-se também sua alta eficiência, capacidade de utilizar uma grande variedade de combustíveis, a possibilidade de reforma interna, baixa emissão de poluentes, entre outros.

Em uma célula a combustível convencional, um combustível é alimentado em um processador de combustíveis onde passa por um processo de reforma a vapor para produzir uma mistura de  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$  e  $CO_2$ . A reação no processo de reforma a vapor de combustíveis é endotérmica, portanto necessita de calor para que a reação se processe. O gás resultante deste processo é, então, o gás de alimentação da célula a combustível. Já em células a combustível com reforma a vapor interna, o processo de reforma ocorre dentro da célula, próximo aos locais eletroquimicamente ativos. Este conceito é factível em células a combustível que operam em altas temperaturas (MCFC e SOFC) devido também a reação ser sustentada pela oxidação anódica do hidrogênio, com a ajuda de um catalisador apropriado (Leal & Silveira, 2002).

Neste artigo foi analisada uma célula a combustível de carbonato fundido (MCFC) com reforma interna direta a vapor (RID). O princípio básico de uma MCFC é mostrado na Fig. (1). Este dispositivo utiliza um eletrólito de carbonato (uma mistura de carbonatos alcalinos) e opera a temperaturas de  $600^\circ C$  e  $700^\circ C$ . A principal reação anódica, que ocorre dentro da célula, é a oxidação do hidrogênio (Leal & Silveira, 2002):



A reação global no catodo é a redução do oxigênio e dióxido de carbono:



A reação eletroquímica global é a oxidação do hidrogênio em água, com a transferência de dois elétrons do anodo para o catodo.

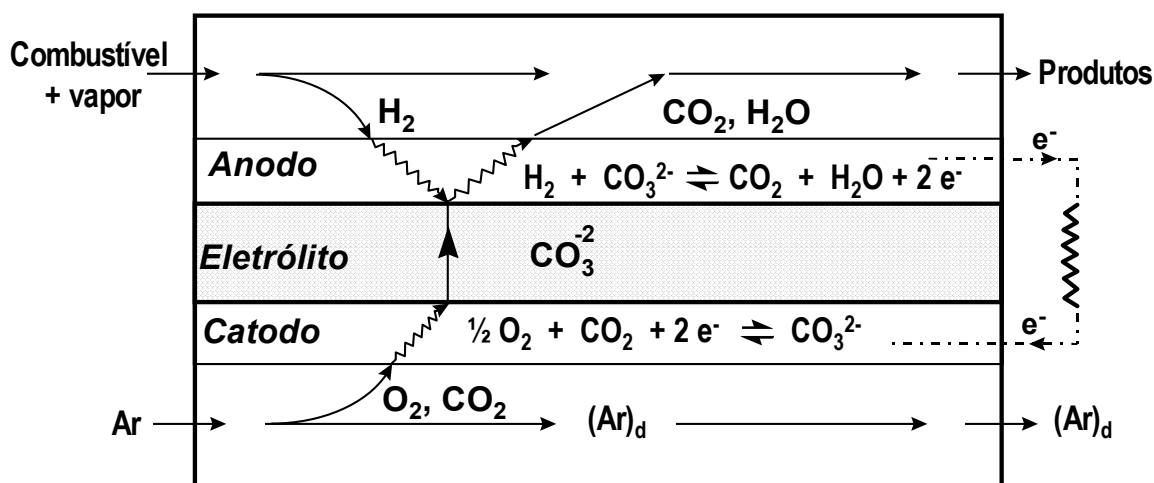


Figura 1. Esquema de uma célula de combustível do tipo carbonato fundido (Leal & Silveira, 2002).

## 3. Reforma a vapor de combustíveis

De acordo com Gardner (1997), a oxidação eletroquímica de um hidrocarboneto combustível não é, ainda, uma opção prática. Muitas reações químicas, competindo com a oxidação eletroquímica, ocorrem mais facilmente. Algumas destas reações conduzem à formação de carbono não desejado e resulta em danos tais como envenenamento catalítico, obstrução a passagem de gás, entre outros. Vapor é adicionado ao hidrocarboneto combustível para prevenir a formação de carbono. Dependendo da natureza catalítica do eletrodo, vapor reagirá com o combustível formando  $H_2$ ,  $CO$  e  $CO_2$  em células a combustível de alta temperatura, sem a necessidade de haver um reformador externo a célula.

As reações químicas envolvidas na reforma a vapor do gás natural (composição indicada na Tab. (2)) são:



Sendo a equação (8) a reação de simples troca água-gás.

Na reforma do vapor são necessárias temperaturas entre 500°C e 750°C. A temperaturas menores, a reação reversa é mais favorável termodinamicamente. Portanto, paralelamente as reações apresentadas pelas equações (3) a (8), outras reações químicas também ocorrerão no sistema; as mais relevantes são as reações de quebra com hidrogênio dos hidrocarbonetos. Ou seja:



Tabela 2. Composição do Gás Natural (Silveira *et al.*, 2001).

Componente	%vol.	%mas.
CH <sub>4</sub>	89,35	80,92
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8,03	13,64
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,78	1,94
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,07	0,23
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,01	0,04
CO <sub>2</sub>	0,48	1,20
N <sub>2</sub>	1,28	2,03
Total	100,00	100,00

A conversão de hidrocarbonetos em hidrogênio no processo de reforma a vapor é favorecida pelo aumento da razão vapor/carbono. Este parâmetro é usualmente expresso como a razão molar entre a quantidade de átomos de carbono presente no combustível e o vapor de reforma. A Fig. (2) mostra a composição de equilíbrio no processo de reforma a vapor de 1 mol gás natural, variando-se a razão vapor/carbono entre 2,0 e 3,0. Nesta Fig. nota-se que quanto maior a razão vapor/carbono, maior será a produção de hidrogênio, que é o principal reagente para a produção de eletricidade na célula.

O método de cálculo das composições de equilíbrio é baseado na minimização da função de Gibbs (este é o método utilizado pela NASA em seu programa de equilíbrio químico). O número de moles das espécies  $i$  em equilíbrio é dado por  $x_i$  (sendo que  $i$  vai de 1 a  $m$ ). A energia livre de Gibbs  $G$  de uma mistura, a pressão  $p$ , é dada por (Wark Jr., 1998):

$$\frac{G}{RT} = \sum_{i=1}^m \left( \frac{x_i G_i^0}{RT} + x_i \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + x_i \ln p \right) \quad (12)$$

$G_i^0$  é a energia livre molar das espécies  $i$  a 1 atmosfera e  $\sum x_i$  é o número total de moles na mistura. No equilíbrio,  $G/RT$  é mínimo, sujeito à composição elementar que é fixa. Para cada elemento  $j$  de 1 a  $l$ :

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_i - b_j = 0 \quad (13)$$

Sendo:  $b_j$  a concentração molar total de átomos do elemento  $j$  (esta concentração é fixa pela concentração dos reagentes) e  $a_{ij}$  é o número de átomos do elemento  $j$  na espécie  $i$ .

A minimização de  $G/RT$  está sujeita pelas condições impostas na equação (13). Para resolução deste caso, introduz-se os multiplicadores de Lagrange  $\lambda_j$  ( $j$  vai de 1 a  $l$ ) e define-se uma função  $F$ , tal que:

$$F = \sum_{i=1}^m x_i \left( \frac{G_i^0}{RT} + \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + \ln p \right) - \sum_{j=1}^l \lambda_j \sum_{i=1}^m (a_{ij} x_i - b_j) \quad (14)$$

A solução da equação (14) para a função  $F$  será dada quando  $F$  for mínimo para todo  $i$  de 1 a  $m$ . As equações são resolvidas utilizando recursos computacionais (software de resolução de sistema de equações, tais como o EES).

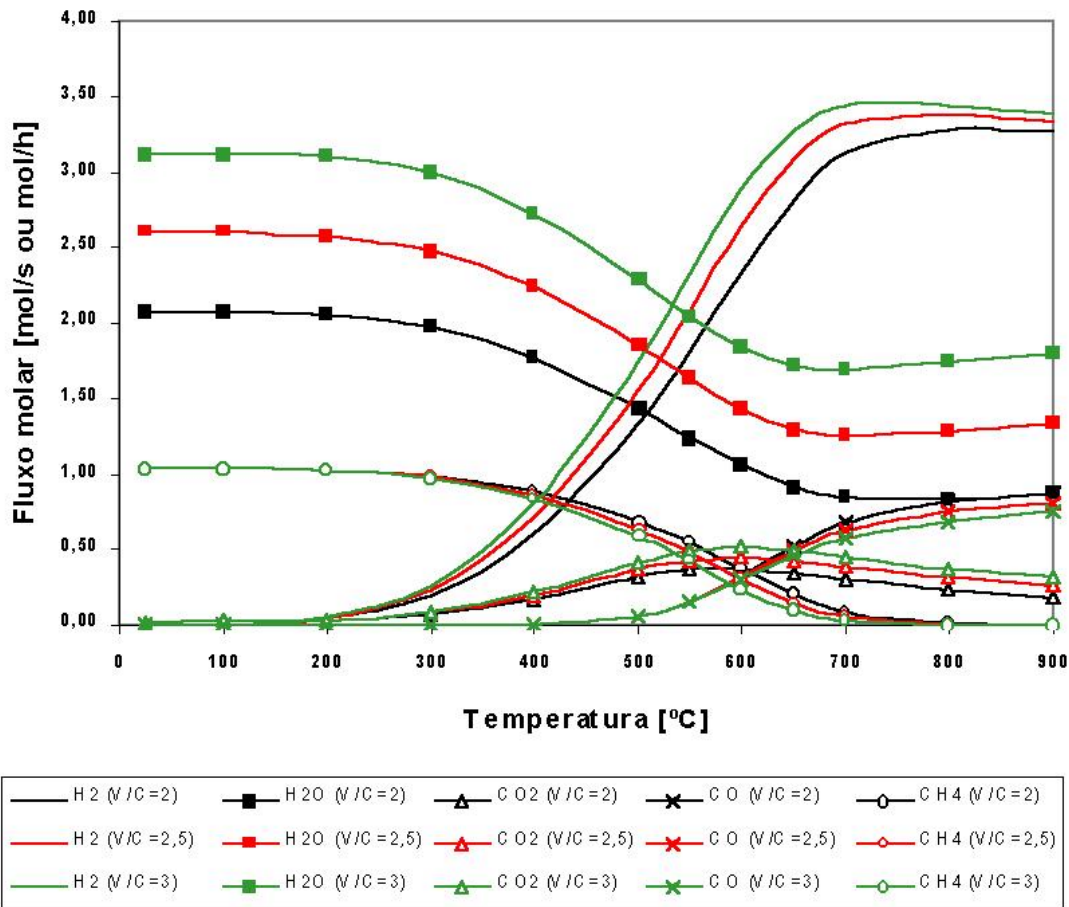


Figura 2. Composições de equilíbrio para mistura metano / vapor.

#### 4. Análise termodinâmica

A célula a combustível é um dispositivo que opera em sistema aberto. Estas produzem trabalho elétrico através de uma reação química *controlada*. Quando um sistema envolve o consumo de reagentes ou formação de produtos, um balanço sobre o meio reacional é necessário. O balanço de cada espécie química no sistema será (Dunbar *et al.*, 1991):

$$\sum_{\text{sai}} N_j = \sum_{\text{entra}} N_j + N_p \quad (15)$$

Sendo:  $N_j$  o fluxo molar do componente  $j$  e  $N_p$ , o fluxo dos produtos da reação [mol/tempo].

Aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica para regime permanente, considerando desprezíveis as mudanças de energia cinética e energia potencial, tem-se (Wark Jr., 1995):

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_i (N_{ij} h_j)_R - \sum_i (N_{ij} h_j)_P = 0 \quad (16)$$

Sendo:  $\dot{Q}_{vc}$  a taxa de transferência de calor,  $\dot{W}_{vc}$  o trabalho transferido e  $h_j$  a entalpia molar do componente  $j$  e  $N_{ij}$  o fluxo molar do componente  $j$  no fluxo  $i$ .

O balanço de entropia para a célula pode ser escrito como (Wark Jr., 1995):

$$\frac{\dot{Q}_{vc}}{T} - \sum_i (N_{ij} s_j)_R - \sum_i (N_{ij} s_j)_P + \dot{\sigma}_{vc} = 0 \quad (17)$$

Sendo:  $s_j$  a entropia molar do componente  $j$ ,  $T$  a temperatura e  $\dot{\sigma}_{vc}$  a taxa de geração de entropia.

Combinando as equações (16) e (17) e assumindo que a reação eletroquímica está baseada por unidade de fluxo molar do combustível:

$$\dot{W}_{vc} = - \left[ \sum_i (N_{ij} g_j)_P - \sum_i (N_{ij} g_j)_R \right] - T \dot{\sigma}_{vc} = 0 \quad (18)$$

Sendo:

$$g_j(T, p_j) = h_j(T) - T s_j(T, p_j) \quad (18a)$$

$$g_j(T, p_j) = g_j^0(T, p_j) + RT \ln \left( \frac{p_j^I}{p_0} \right) \quad (18b)$$

$g_j$  é a função molar de Gibbs.

Uma vez que não há trabalho mecânico envolvido na célula a combustível,  $\dot{W}_{vc}$  é naturalmente o trabalho elétrico produzido pela célula a combustível. Ou seja (Wark Jr., 1995):

$$\dot{W}_{el} = z F E = - \left[ \sum_i (N_{ij} g_j)_P - \sum_i (N_{ij} g_j)_R \right] - T \dot{\sigma}_{cv} = 0 \quad (19)$$

$$z F E = - \Delta G^0 - \left[ \sum_i \left( N_{ij} RT \ln \frac{p_j^I}{p_0} \right)_P - \sum_i \left( N_{ij} RT \ln \frac{p_j^I}{p_0} \right)_R \right] - T \dot{\sigma}_{cv} = 0 \quad (20)$$

$$\Delta G^0 = R T \ln K \quad (21)$$

Sendo:  $z$  o número de mol's de elétrons envolvidos na reação eletroquímica,  $F$  a constante de Faraday (96.487,3 C.mol<sup>-1</sup>),  $E$  a tensão de operação da célula,  $R$  a constante universal molar de cada gás,  $p_j^I$  é a pressão parcial inicial do componente  $j$ ,  $p_0$  é a pressão total do fluxo,  $\Delta G^0$  é a variação da função de Gibbs no estado de referência ( $T = 298,15$  K e  $P = 1$  atm) e  $K$  é a constante de equilíbrio da reação.

Para uma célula a combustível operando com hidrogênio como combustível, com pressões conhecidas dos reagentes e produtos (Chan *et al.*, 2001):

$$E = \frac{R T}{2F} \ln K - \frac{R T}{4F} \ln \left[ \frac{(p_{H_2O}^I)^2 p_0}{(p_{H_2}^I)^2 p_{O_2}^I} \right] - \frac{\sigma_{cv} T}{2F} \quad (22)$$

Sendo (Chan *et al.*, 2001):

$$\frac{\sigma_{cv} T}{2F} = \alpha_{ativ} + \alpha_{ohm} + \alpha_{conc} = \alpha_{anodo} + \alpha_{catodo} \quad (23)$$

O primeiro termo no lado direito da equação (22) mostra o efeito da temperatura sobre a tensão da célula enquanto o segundo termo mostra o efeito da pressão dos reagentes e produtos sobre a tensão de célula. A irreversibilidade na queda de tensão é considerada no terceiro termo da equação e é expressa pelas sobretensões por ativação ( $\alpha_{ativ}$ ), por queda ôhmica ( $\alpha_{ohm}$ ) e por concentração ( $\alpha_{conc}$ ) (Chan *et al.*, 2001).

A quantidade de calor gerado pelas células será (Berger, 1968):

$$\dot{Q}_{vc} = n_{cel} i \left( \frac{-\Delta H}{n_e F u} - E \right) \quad (24)$$

Sendo:  $\Delta H$  a variação de entalpia da água no intervalo de interesse,  $n_e$  o número de elétrons envolvidos por molécula reagida,  $i$  a densidade de corrente,  $u$  a fração da reação que está ocorrendo eletroquimicamente na célula e  $n_{cel}$  o número de células do dispositivo.

Para quantificar as perdas por polarizações na célula a combustível do tipo carbonato fundido, pode-se usar modelos de eletrodos porosos ou correlações empíricas baseadas em medidas experimentais. De acordo com Yuh & Selman (1991), as sobretensões catódica ( $\alpha_{\text{catodo}}$ ) e anódica ( $\alpha_{\text{anodo}}$ ) podem ser descritas como:

$$\alpha_{\text{anodo}} = 2,27 \cdot 10^{-5} (p_{\text{H}_2})^{-0,42} (p_{\text{CO}_2})^{-0,17} (p_{\text{H}_2\text{O}})^{-1,00} \exp\left(\frac{53.500}{RT}\right) \quad (25)$$

$$\alpha_{\text{catodo}} = 7,505 \cdot 10^{-6} (p_{\text{O}_2})^{-0,43} (p_{\text{CO}_2})^{-0,09} \exp\left(\frac{77.300}{RT}\right) \quad (26)$$

## 5. Resultados e discussão

As seguintes considerações foram feitas para a análise termodinâmica pretendida:

- Um valor de 50% e 75% de utilização do gás no catodo e anodo, respectivamente.
- Pressão em todo o processo constante e igual a 1 atm (Bedringås *et al*, 1997).
- Admite-se que o ar tem comportamento de gás ideal e composição mostrada na Tab. (3) (Bedringås *et al*, 1997).
- Composição do gás no catodo composta de 60% de CO<sub>2</sub> e 40% de ar (Selman, 1993).

Tabela 3. Fração molar dos componentes no ar atmosférico (Bedringås *et al*, 1997).

Componente	Fração Molar ( $x_i$ )
N <sub>2</sub>	0,7567
O <sub>2</sub>	0,2035
H <sub>2</sub> O	0,0303
CO <sub>2</sub>	0,0003
Ar	0,0092

A Fig. (3) mostra a curva tensão *versus* densidade de corrente, para temperaturas entre 600 e 700°C e razão vapor/carbono de 3,0, calculada a partir da combinação das equações (22), (23), (25) e (26). A partir da Fig. (2) pode-se notar que quanto maior a temperatura, maior será a fração molar de hidrogênio no fluxo de combustível, ocasionando uma maior tensão no dispositivo. Para uma densidade de corrente de 1000 A/m<sup>2</sup> existe uma diferença de 89% na tensão para as temperaturas de 600 e 650°C e 85%, para temperaturas de 600 e 700°C. Além desta observação, as duas maiores contribuições responsáveis pela mudança na tensão da célula com a temperatura são a polarização por queda ôhmica e a polarização nos eletrodos. Essas duas contribuições tendem a ser menores com o aumento de temperatura o que ocasionará em um aumento de tensão, quando comparados a uma mesma densidade de corrente.

A Fig. (4) mostra a curva densidade de energia (calculada a partir de  $\dot{W}_{el} = E \cdot i$ ) *versus* densidade de corrente, para temperaturas entre 600 e 700°C e razão vapor/carbono de 3,0. Nota-se que há aumento da densidade de energia produzida pela célula com o aumento da temperatura. Isto se deve a menor contribuição das perdas por polarização com o aumento da temperatura, já discutido anteriormente.

De acordo com Dunbar *et al.*, (1991) a temperatura média de trabalho de uma célula a combustível do tipo carbonato fundido é de 650°C. A Fig. (5) mostra a curva densidade de energia *versus* calor gerado, para razão vapor/carbono de 3,0, calculada a partir das equações (22) a (26).

A Fig. (6) mostra a curva densidade de energia *versus* consumo de gás natural, para razão vapor/carbono de 3,0. Nesta figura, foi considerado a densidade do gás natural a 20°C igual a 0,55 kg/m<sup>3</sup>. Nota-se através desta figura que há um aumento no consumo de combustível com o aumento da eletricidade gerada pelo dispositivo.

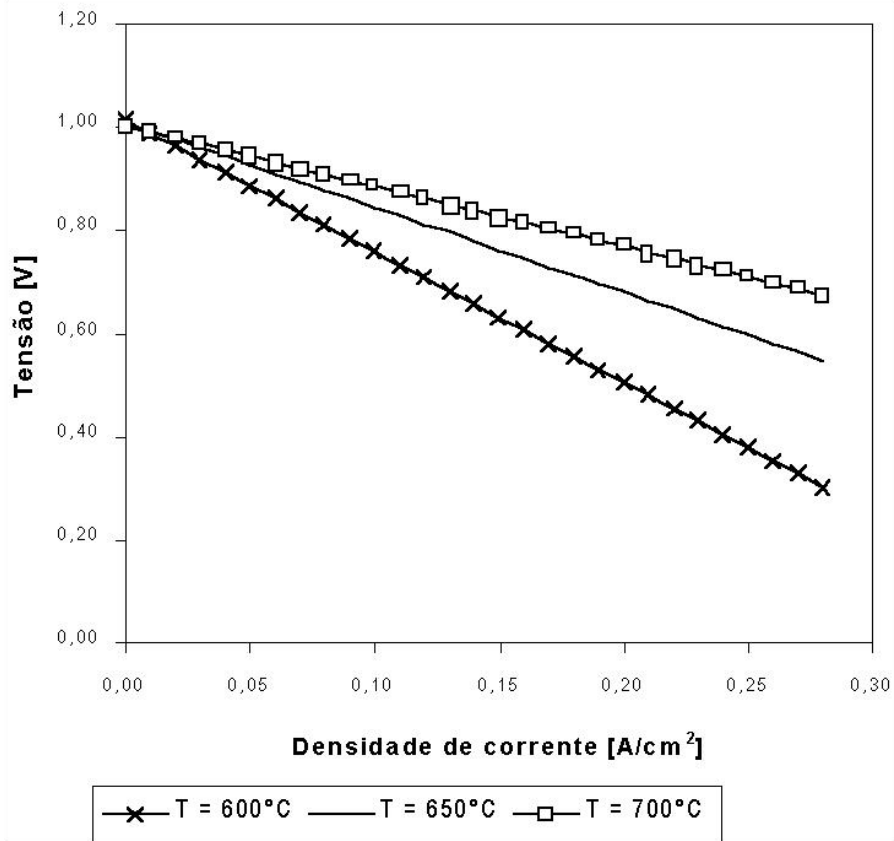


Figura 3. Curva tensão *versus* densidade de corrente ( $600 \leq T \leq 700^\circ\text{C}$ , razão V/C = 3,0).

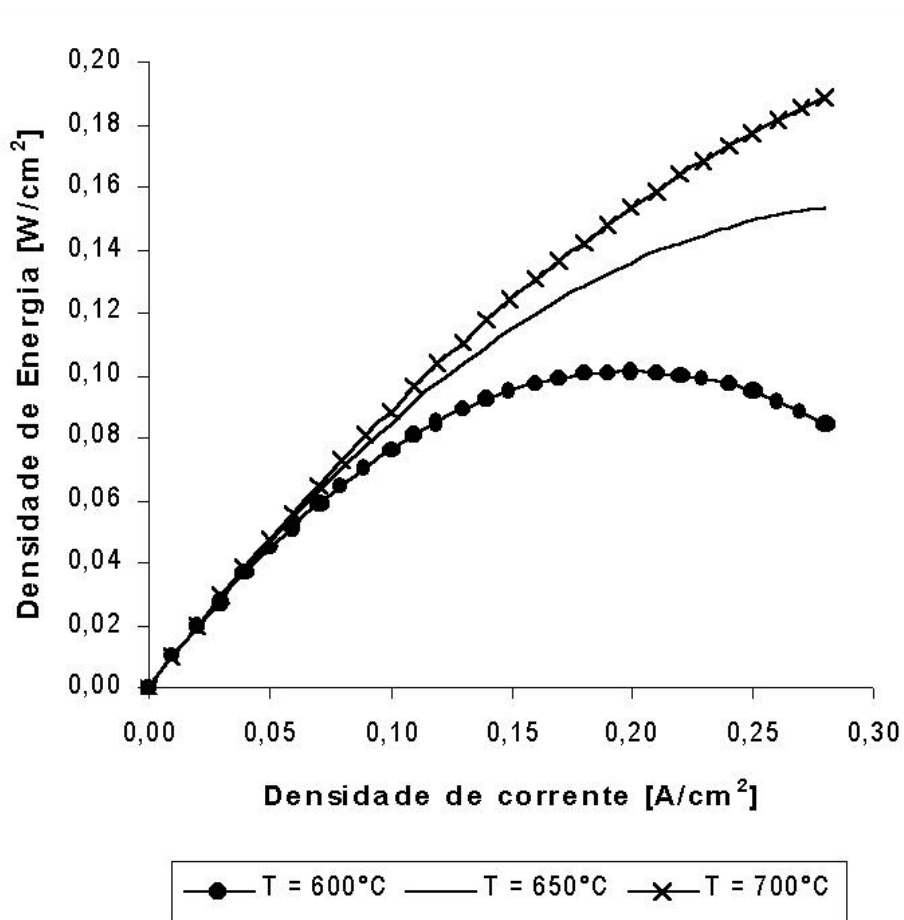


Figura 4. Curva densidade de energia *versus* densidade de corrente ( $600 \leq T \leq 700^\circ\text{C}$ , razão V/C = 3,0).

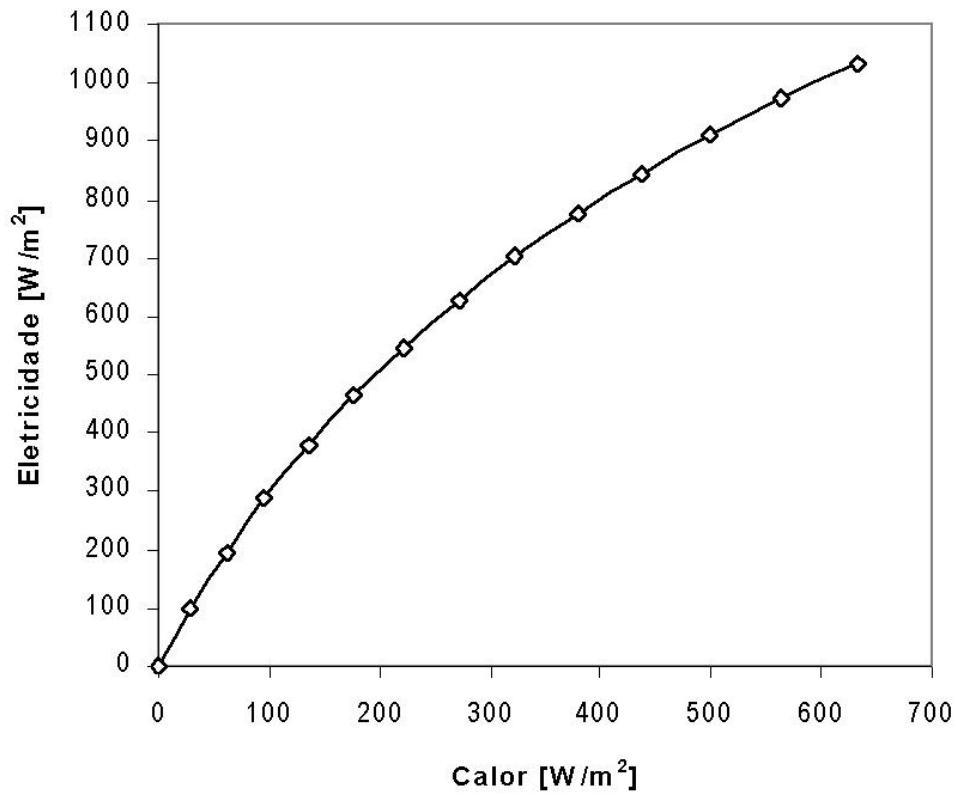


Figura 5. Curva densidade de energia *versus* calor gerado.

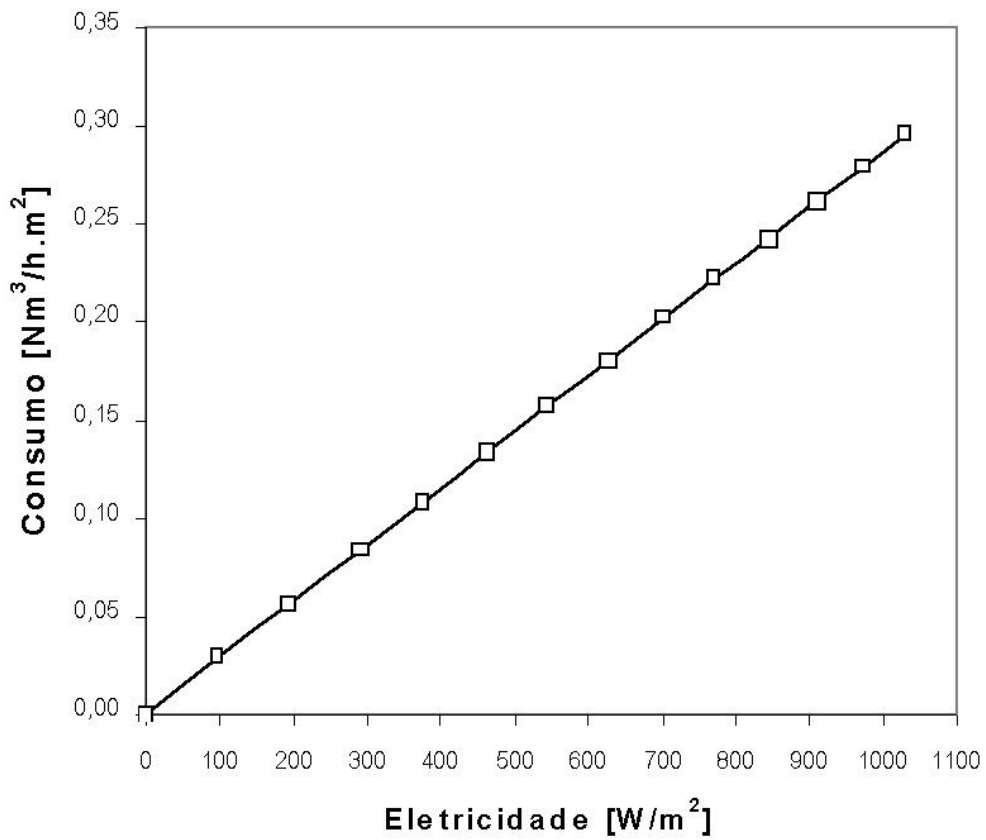


Figura 6. Curva consumo de gás natural ( $\rho = 0,55 \text{ kg/m}^3$  a  $T = 20^\circ\text{C}$ ) *versus* densidade de energia.



## 6. Conclusões

A alta eficiência associada aos baixos níveis de emissão de poluentes em comparação aos sistemas convencionais de atendimento, faz da célula de combustível uma tecnologia atrativa para a geração de energia. Para células atualmente disponíveis, não é possível converter toda energia contida em um combustível, o que significa que a utilização eletroquímica dos combustíveis pode atingir valores máximos de 85%. Além disso, para evitar a formação de carbono, vapor é adicionado ao fluxo de entrada do combustível. Este processo juntamente com o acúmulo de produtos de reação, dilui o potencial químico do combustível, diminuindo a produção de trabalho elétrico.

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas utilizando metano como combustível no processo de reforma a vapor. Entretanto, a evolução da demanda energética mundial levará a busca de combustíveis alternativos, tais como o gás natural, biogás, hidrocarbonetos pesados ou álcoois (metanol, etanol, entre outros), uma vez que algumas aplicações práticas são privilegiadas pelo uso de combustíveis localmente disponíveis ou que podem ser transportados e reformados facilmente se comparados ao metano.

As aplicações tecnológicas das MCFC's estão estritamente relacionadas a utilização de combustíveis que podem ser facilmente convertidos em hidrogênio. Logo, torna-se interessante a investigação do uso de outros combustíveis, tais como o etanol, em um sistema que possui a MCFC para a produção simultânea de eletricidade e calor. Este tipo de investigação poderá ser realizada e seus resultados divulgados em outro artigo.

Em relação à análise apresentada neste trabalho, os resultados mostraram que existe um aumento de tensão no dispositivo em relação a temperatura. Este comportamento pode ser explicado devido a polarização por queda ôhmica e polarização nos eletrodos apresentarem menores valores com o aumento da temperatura. Para temperaturas entre 600 e 700°C, razão vapor/carbono de 3,0, utilização de combustível e oxidante de, respectivamente, 75% e 50% e densidade de corrente de 1000 A/m<sup>2</sup>, existe uma diferença de 89% na tensão calculada para temperatura de 600°C em relação a tensão calculada para a temperatura de 650°C e uma diferença de 85% na tensão calculada para temperatura de 600°C em relação a tensão calculada para a temperatura de 700°C.

O crescente aumento da demanda de energia elétrica no Brasil associada com o crescente risco de déficit implica em grandes impactos ambientais ocasionados pela construção de grandes centrais geradoras de energia. As células a combustível vem surgindo como uma modalidade tecnológica de geração de energia que está sob pesquisa intensiva e representa produção de energia com alta eficiência, necessitando de uma maior divulgação no país, assim como um maior apoio fiscal e financeiro para implantação e manutenção destes sistemas.

## 7. Agradecimentos

Os autores desejam expressar seu reconhecimento ao apoio financeiro da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) através do processo n° 99/08851-0.

## 8. Referências

- Bedringås, K. W.; Ertesvåg, I. S.; Byggstøyl, S. and Magnussen, B. F., 1997, "Exergy Analysis of Solid-Oxide Fuel-Cell (SOFC) Systems", *Energy*, Vol. 22, pp.403-412.
- Berger, C., *Handbook of fuel cell technology*. Prentice-Hall. New Jersey. 607p.
- Chan, S. H., Khor, K.A. and Xia, Z.T., 2001, "A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness", *Journal of Power Sources*, Vol. 93, pp. 130-140.
- Cavallaro, S., Freni, S., Cannistraci, R., Aquino, M. e Giordano, N., 1992, "Steam reforming of various fuels". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 17, n° 3, pp. 181 – 210.
- Dunbar, W.R., Lior, N., Gaggioli, R.A., 1991, "Combining Fuel Cells with Fuel-Fired Power Plants for Improved Exergy Efficiency", *Energy*, Vol. 16, n.º10, pp. 1259-1274.
- Gardner, F.J., 1996, "Thermodynamics Process in Solid Oxide and other Fuel Cells". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Journal of Power and Energy*, Vol. 211, pp.367-380.
- Hirschenhofer, J. H., Stauffer, D. B. and Engleman, R. R., 1994, "Fuel cells: a handbook". Gilbert and Commonwealth, Inc., Philadelphia, U.S.A. 510 p.
- Leal, E. M., 2000, "Análise técnico-econômica de sistemas de co-geração utilizando células a combustível: estudo de casos", *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- Leal, E. M.; Silveira, J. L., 2002, "Study of fuel cell co-generation systems applied to a dairy industry", *Journal of Power Sources*, Vol. 106(1-2), pp. 102-108.

Selman, J.R., 1993, "Research, Development and Demonstration of Molten Carbonate Fuel Cell Systems". In: Blomen, L. J. M. J. and Mugerwa, M. N. (Eds.) Fuel Cell Systems. 1 ed., New York: Plenum Press, Cap.9, p.345-463.

Silveira J.L., Leal E.M. and Ragonha, L.F., 2001, "Analysis of a molten carbonate fuel cell: cogeneration to produce electricity and cold water". Energy, Vol. 26, pp. 891 - 904.

Wark Jr., K., 1995, "Advanced Thermodynamics for Engineers", 1<sup>a</sup> ed, McGraw-Hill, New York, 557p.

## **QUANTITATIVE STUDIES OF THE INFLUENCE OF REACTANTS IN FUEL CELL COGENERATION SYSTEMS**

### **Elisângela Martins Leal**

Department of Energy, College of Engineering, Campus of Guaratinguetá. São Paulo State University.

Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, Guaratinguetá, SP. 12.516-410

elisange@feg.unesp.br

### **José Luz Silveira**

Department of Energy, College of Engineering, campus of Guaratinguetá. São Paulo State University.

Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, Guaratinguetá, SP. 12.516-410

joseluz@feg.unesp.br

**Abstract.** Fuel cells have been emerging as one of the most promising technologies for energy generation in the future. The molten carbonate fuel cell (MCFC) uses a ceramic matrix of lithium aluminate, where a mixture of alkaline carbonate is retained (usually a mixture of lithium and potassium or lithium and sodium). In this paper, some technical information about the main types of fuel cells operating in the world, is presented. Later, a study of the reactants flow influence in the production of electricity, is showed. Following, curves of electricity, generated heat and voltage for the MCFC, is presented. As conclusion, the molten carbonate fuel cell can be an excellent opportunity to intensify the energy production in Brazil, allowing high operational efficiency, reduction of environmental impacts and reliability in the energy supply

Keywords: fuel cell, electricity, thermodynamic analysis, electrochemistry analysis.