



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT - 09
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO II
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

AVALIAÇÃO DE BALANÇO DE PLANTA DE ENERGIA BASEADA EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Rafael H. Camparin *, Patricio R. Impinnisi, Regina M. Jorge, Mauricio P. Cantão, Heloisa N. da Motta

UFPR

LACTEC

UFPR

LACTEC

LACTEC

RESUMO

Para compreender melhor o princípio de funcionamento da célula a combustível estacionária de ácido fosfórico, modelo PC25C fabricada pela UTC Fuel Cells, foi realizado um estudo da principal operação da planta que compreende o *stack*, compartimento que contém as células eletroquímicas. Através da análise do equilíbrio termodinâmico e dos desvios provocados pelas polarizações foi possível calcular as conversões energéticas que ocorrem nas células e explicar o comportamento da curva de consumo de energia elétrica da planta para diferentes potências líquidas de operação.

PALAVRAS-CHAVE

Células a combustível, Termodinâmica, Polarização, Eficiência, Consumo.

1.0 - INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão apresentados os recentes avanços no entendimento do princípio de funcionamento de uma célula a combustível estacionária de ácido fosfórico, modelo PC25C, capaz de fornecer energia elétrica dentro de uma faixa de potência líquida compreendida entre 0 e 200kW. Esta célula está localizada em Curitiba no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC.

Os reagentes utilizados no processo eletroquímico desta planta são o oxigênio atmosférico, no eletrodo catódico, e o hidrogênio, oriundo de um reformador embarcado na planta, no eletrodo anódico. O processo de reforma é adotado para evitar a armazenagem do hidrogênio, o gás que possui a menor densidade dentre todas as substâncias conhecidas. No estado gasoso, necessita de um sistema de armazenamento de grande volume que seja resistente a elevadas pressões e, no estado líquido, precisa que o seu armazenamento utilize sistemas criogênicos em baixíssimas temperaturas (-253°C). Um outro agravante encontrado na sua armazenagem deve-se ao seu elevado poder de difusão, decorrente do seu tamanho molecular, que permite a passagem do mesmo por todas as superfícies, sejam elas metálicas ou não, podendo causar graves danos aos reservatórios como o empoamento (1).

No reformador o combustível, gás natural, juntamente com o vapor d'água em uma relação molar de 1/4, quando submetidos a elevada temperatura, baixa pressão e contato com um catalisador, sofrem um processo reativo que tem o hidrogênio como produto principal e o monóxido e dióxido de carbono como subprodutos. Em virtude da elevada concentração de monóxido de carbono o gás reformado é submetido a uma nova reação, no reator de *shift*, antes de ser alimentado na célula a combustível. Esta etapa intermediária ocorre em temperaturas amenas e praticamente todo monóxido é convertido em gás carbônico, o que diminui o risco de envenenamento do catalisador de platina contido nos eletrodos (2).

Na pilha de células a combustível (*stack*) ocorre a reação eletroquímica entre o oxigênio e o hidrogênio para gerar corrente elétrica. As moléculas de hidrogênio, ao encontrarem o catalisador de platina contido no eletrodo anódico

*Rua Niterói, 1043 - CEP 82 930-240 - Curitiba - PR - BRASIL

Tel.: (041) 226-7912 - Fax: (041) 226-7912 - e-mail: rcamparin@pop.com.br

da célula, sofrem a quebra de suas ligações e liberam dois elétrons para cada ligação rompida. Os íons gerados permeiam por uma solução eletrolítica, neste caso ácido fosfórico, até atingir o eletrodo catódico. Neste, as moléculas de oxigênio, depois de sofrerem o mesmo processo de ruptura das ligações, recebem os elétrons, por intermédio de um condutor externo, e os íons de hidrogênio originados no ânodo para formar moléculas de água. Este processo, além de gerar energia elétrica, libera grande quantidade de calor em virtude das perdas dos sistemas eletroquímicos.

1.1 Pilha de células a combustível

O *stack* desta planta é formado por células a combustível de ácido fosfórico (cuja sigla em inglês é PAFC). Esta tecnologia é a que apresenta a menor eficiência elétrica dentre todas as tecnologias existentes, em torno de 36 a 40%. O ácido fosfórico, concentrado a 100% em massa, é usado como solução eletrolítica neste tipo de célula que opera com temperaturas entre 150 e 220°C. Dentro desta faixa de temperatura, o catalisador de platina é capaz de suportar 1 a 2% de monóxido de carbono e alguns ppm de óxido sulfuroso. Esta tolerância permite uma flexibilidade na utilização de alguns combustíveis, como o hidrogênio oriundo do processo de reforma do gás natural ou qualquer outro hidrocarboneto. Para temperaturas inferiores a este limite a solução de ácido fosfórico torna-se um péssimo condutor iônico e o monóxido de carbono ataca mais agressivamente o catalisador de platina contido nos eletrodos. O ácido fosfórico apresenta baixa volatilidade e boa estabilidade térmica e conseqüentemente pode trabalhar em uma grande faixa de temperatura (100 – 220°C). A matriz usada para reter este ácido é uma rede de carbetto de silício. A utilização da platina como catalisador, um metal nobre e caro, a baixa eficiência e também o fato de ser pesada e de grandes dimensões são algumas das desvantagens encontradas nesta tecnologia (1,2).

O *stack* da célula a combustível PC25C é composta por 35 *substacks*, sendo que cada um comporta 8 células unitárias, somando um total de 280 células. Estas células estão associadas em série por intermédio de placas bipolares a fim de garantir uma tensão suficientemente grande, que varia entre 165 a 195V. A diferença de potencial de uma única célula unitária está em torno de 0,6 a 0,7V e a corrente elétrica fornecida pelo *stack* atinge mais de 1.000 A (3).

Na seqüência será apresentado o equacionamento utilizado para determinar as conversões energéticas que ocorrem no *stack* através da análise termodinâmica e dos desvios provocados pelas polarizações. A nomenclatura abordada está descrita abaixo:

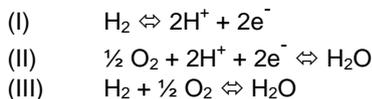
NOMENCLATURA

a_{H_2}	= atividade do hidrogênio (Pa/Pa);
a_{H_2O}	= atividade do vapor d' água (Pa/Pa);
a_{O_2}	= atividade do oxigênio (Pa/Pa);
A	= área superficial da seção catalítica (m^2);
B	= resistência elétrica do eletrólito (Ω);
C_B	= concentração do reagente no seio do eletrólito (mol/m^3);
Cp_{H_2}	= calor específico do hidrogênio ($J/mol * K$);
Cp_{H_2O}	= calor específico do vapor d' água ($J/mol * K$);
Cp_{O_2}	= calor específico do oxigênio ($J/mol * K$);
Cp_R	= calor específico de reação ($J/mol * K$);
D	= coeficiente de difusão do reagente na camada limite mássica (m^2 / s);
E_{EQ}	= diferença de potencial no equilíbrio (V);
E_{OP}	= diferença de potencial de operação (V);
E^0	= diferença de potencial padrão (V);
F	= constante de Faraday (C/mol);
I	= corrente elétrica de uma célula unitária (A);
$i_{L,a}, i_{L,c}$	= densidade de corrente elétrica anódica e catódica limite (A/m^2);
$i_{0,a}, i_{0,c}$	= densidade de corrente elétrica anódica e catódica no equilíbrio (A/m^2);
n	= número de mols de elétrons (mols);
N	= número de células unitárias no Stack;
R	= constante universal dos gases ($J/mol * K$);

P_{EC}	= potência elétrica consumida do Stack (W);
P_{EL}	= potência elétrica nominal ou líquida do Stack (W);
P_{ET}	= potência elétrica total do Stack (W);
P_T	= potência térmica do Stack (W);
P_{H_2}	= pressão parcial do hidrogênio (Pa);
P_{H_2O}	= pressão parcial do vapor d' água (Pa);
$P_{H_2O}^{Sat}$	= pressão parcial do vapor d' água na saturação (Pa);
P_{O_2}	= pressão parcial do oxigênio (Pa);
P_0	= pressão no estado padrão (Pa);
T	= temperatura de operação do Stack (K);
T_0	= temperatura no estado padrão (K);
Símbolos Gregos	
α	= coeficiente de transferência de carga;
δ	= espessura da camada limite mássica (m);
ΔG_R	= energia livre de Gibbs de reação (J/mol);
ΔG_R^0	= energia livre de Gibbs de reação na pressão padrão (J/mol);
ΔH_R	= entalpia de reação (J/mol);
$\Delta H_R^{T_0}$	= entalpia padrão de reação (J/mol);
$\Delta H_{f,H_2O}^{T_0}(\text{líquido})$	= entalpia padrão de formação da água (J/mol);
$\Delta S_R^{T_0}$	= entropia padrão de reação (J/mol * K);
$\mathcal{E}_{Elétrica}$	= eficiência elétrica do Stack;
$\mathcal{E}_{Térmica}$	= eficiência térmica do Stack;
\mathcal{E}_{Total}	= eficiência total do Stack;
$\eta_{Ativ,a}, \eta_{Ativ,c}$	= sobrepotencial por ativação anódico e catódico (V);
$\eta_{Conc,a}, \eta_{Conc,c}$	= sobrepotencial por transferência de massa anódico e catódico (V);
η_{Ohm}	= sobrepotencial por queda ôhmica (V);
η_{Total}	= sobrepotencial total (V);

1.1.1 Análise do Equilíbrio Termodinâmico (4)

As reações que ocorrem nas células eletroquímicas contidas no stack são as seguintes:



As reações (I) e (II) se processam nos eletrodos anódico e catódico, respectivamente. A reação (III) é a equação global do sistema. A diferença de potencial de equilíbrio para este sistema eletroquímico é obtida através da relação:

$$E_{EQ} = - \frac{\Delta G_R}{n * F} \quad (01)$$

onde:

$$\Delta G_R = \Delta G_R^0 - R * T * \ln \left(\frac{a_{H_2} * a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (02)$$

A equação 02 é constituída por duas parcelas. A primeira calcula a energia livre de Gibbs de reação na pressão padrão, considerando que a atividade dos reagentes e dos produtos são unitárias, através da relação:

$$\Delta G_R^0 = \Delta H_R^{T_0} - T * \Delta S_R^{T_0} + \int_{T_0}^T C_{p_R} * dT - T * \int_{T_0}^T \frac{C_{p_R}}{T} * dT \quad (03)$$

A segunda parcela da equação 02 corrige o valor da energia livre de Gibbs para a pressão de operação do *stack* onde os valores das atividades diferem da unidade. As atividades dos componentes envolvidos na reação III são assim representadas:

$$a_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P_0} \quad (04) \quad , \quad a_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_0} \quad (05) \quad e \quad a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^{Sat}} \quad (06)$$

A diferença de potencial para a reação global é obtida substituindo a equação 02 na equação 01. A equação formada é conhecida como equação de Nernst e assume a forma:

$$E_{EQ} = E^0 - \frac{R * T}{n * F} * \ln \left(\frac{a_{H_2} * a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (07)$$

A eficiência de uma célula eletroquímica é dada pela razão entre a energia livre de Gibbs de reação e a entalpia de reação. Uma padronização adotada é a utilização a entalpia de formação padrão da água líquida no lugar da entalpia de reação conforme a relação:

$$\varepsilon_{Total} = \frac{\Delta G_R}{\Delta H_{f, H_2O}^{T_0} \text{ (líquido)}} \quad (08)$$

A equação 08 é bastante utilizada pois permite a comparação entre as diferentes tecnologias de célula a combustível.

1.1.2 Polarizações

Um eletrodo está polarizado quando se verifica uma diferença numérica entre o potencial de equilíbrio termodinâmico e o potencial de trabalho. Esta diferença é conhecida como sobrepotencial.

O processo reativo evidenciado na interface eletrodo-eletrólito pode ser dividido em três etapas. A primeira é a aproximação dos íons do seio do eletrólito até a interface com o eletrodo. Uma vez na superfície, inicia-se a segunda etapa com o processo de transferência de carga, transformando o reagente em produto e finalmente, ocorre um processo migratório dos íons em direção ao eletrodo oposto para compensar a carga transferida. Cada uma destas etapas oferece uma barreira potencial ao processo eletroquímico e a magnitude desta depende das condições do sistema. As polarizações evidenciadas em cada uma destas etapas são, respectivamente, por transporte de massa, por ativação e por queda ôhmica (5).

A polarização por transporte de massa ocorre quando a concentração do reagente é pequena ou a corrente elétrica é elevada. Desta forma, o fluxo iônico poderá levar a um esgotamento da espécie reagente na superfície do eletrodo e, assim, a velocidade do processo passará a ser determinada pela velocidade de chegada da espécie reagente à superfície. Como consequência, o potencial do eletrodo desviar-se-á de seu valor de equilíbrio (5,6). Este sobrepotencial é uma consequência da primeira Lei de Fick e pode ser determinado pela relação:

$$\eta_{Conc} = \frac{R * T}{n * F} * \ln \left(1 - \frac{I}{i_L * A} \right) \quad (09)$$

onde:

$$i_L = \frac{n * F * D * C_B}{\delta} \quad (10)$$

A polarização por ativação é evidenciada quando a concentração dos reagentes é elevada e a corrente elétrica do sistema é baixa. Neste caso, a reação de transferência de elétrons entre o eletrodo e a espécie, que analogamente aos processos convencionais é limitada por uma barreira de energia de ativação, poderá tornar-se a etapa determinante da velocidade. Esta polarização é evidenciada no eletrodo anódico e no catódico (5,6). Uma correlação semi-empírica que calcula o sobrepotencial decorrente da polarização por ativação, conhecida como equação de Tafel, é a seguinte:

$$\eta_{Ativ} = \frac{R * T}{\alpha * n * F} * \ln\left(\frac{I}{i_0 * A}\right) \quad (11)$$

Quando a concentração dos íons responsáveis pelo transporte de carga é pequena, a condutividade do eletrólito é baixa ou a corrente elétrica é muito elevada, pode haver dificuldade na manutenção da eletroneutralidade da solução provocando um retardo do processo eletroquímico global. Este fenômeno, conhecido como polarização por queda ôhmica, é governado pelas leis da condutância eletrolítica (lei de Ohm) que resulta em um afastamento do potencial medido de seu valor de equilíbrio (5,6). Este sobrepotencial é determinado pela fórmula:

$$\eta_{Ohm} = B * I \quad (12)$$

A equação geral que determina a potencial de operação de uma célula eletroquímica é a seguinte:

$$E_{OP} = E_{EQ} - \eta_{Total} \quad (13)$$

onde:

$$\eta_{Total} = \eta_{ConcA} + \eta_{ConcC} + \eta_{Ativ,A} + \eta_{Ativ,C} + \eta_{Ohm} \quad (14)$$

As potências elétrica total e térmica, que corresponde a taxa total de calor gerado, do *stack* podem ser determinadas através das fórmulas :

$$P_{ET} = N * I * E_{EQ} \quad (15) \quad e \quad P_T = N * I * \eta_{Total} \quad (16)$$

As respectivas eficiências são obtidas pelas relações:

$$\varepsilon_{ET} = \varepsilon_{Total} * \frac{P_{ET}}{P_{ET} + P_T} \quad (17) \quad e \quad \varepsilon_T = \varepsilon_{Total} * \frac{P_T}{P_{ET} + P_T} \quad (18)$$

A potência elétrica consumida pela planta pode ser obtida pela diferença entre a potência elétrica total e a potência elétrica nominal, líquida, através da relação:

$$P_{EC} = P_{ET} - P_{EL} \quad (19)$$

Com esta relação será determinada a faixa de operação que garante a máxima eficiência da planta.

2.0 - CONVERSÕES ENERGÉTICAS DO STACK

Os parâmetros necessários para determinar as conversões energéticas que ocorrem no *stack* e as respectivas fontes de referência estão listados na Tabela 1.

TABELA 1: Entrada de dados.

$a_{H_2} = 0,7 \text{ Pa/Pa}$ (*);	$R = 8,314 \text{ J/mol} * K$ (7);
$a_{H_2O} = 1,0 \text{ Pa/Pa}$ (*);	$P_0 = 1,0E5 \text{ Pa}$ (7);
$a_{O_2} = 0,5 \text{ Pa/Pa}$ (*);	$T = 450 \text{ K}$ (*);
$Cp_R = f(T) \text{ J/mol} * K$ (8);	$T_0 = 298K$ (7);
$E_{OP} = f(Pot.) V$ (*);	$\alpha = 0,5$ (3);
$F = 96500 \text{ C/mol}$ (7);	$\Delta S_R^{T_0} = -44,43 \text{ kJ/mol}$ (7);
$I = f(Pot.) A$ (*);	$\Delta H_R^{T_0} = -241,8 \text{ kJ/mol}$ (7);
$n = 2 \text{ mols}$;	$\Delta H_{f,H_2O(líquido)}^{T_0} = -285,8 \text{ J/mol}$ (7).
$N = 280 \text{ células}$;	

(*) - dado obtido experimentalmente;
(ref.) – fonte de referência.

O valor encontrado para a energia livre de Gibbs de reação, através da equação 02, foi de $-218,7 \text{ kJ/mol}$. Substituindo este valor na equação 01 foi obtida uma diferença de potencial de equilíbrio de $1,133 \text{ V}$. A eficiência total, calculada pela equação 08, foi de $76,5\%$. Conhecendo a diferença de potencial de operação e o potencial de equilíbrio foi possível obter o sobrepotencial total através da equação 13. Os valores da corrente elétrica, das diferenças de potencial de equilíbrio e de operação e do sobrepotencial de uma célula unitária para cada potência nominal de operação da planta estão listados na Tabela 2.

TABELA 2: Propriedades de uma célula unitária.

Potência Nominal (kW)	Corrente [*] (A)	E _{EQ} (V)	E _{OP} [*] (V)	η_{TOTAL} (V)
0 (IDLE)	425	1,133	0,694	0,439
40	661	1,133	0,657	0,476
80	689	1,133	0,655	0,478
120	760	1,133	0,646	0,487
150	991	1,133	0,629	0,504
200	1413	1,133	0,589	0,544

A análise da Tabela 2 mostra que o sobrepotencial de uma célula eletroquímica aumenta com o aumento da corrente elétrica que circula no sistema gerando uma redução no potencial de operação. Os valores das potências elétrica total e térmica, obtidas pelas equações 15 e 16, e das respectivas eficiências, através das equações 17 e 18, estão na Tabela 3.

TABELA 3: Propriedades do stack.

Potência Nominal (kW)	P _{ET} (kW)	ξ_{ET} (%)	P _T (kW)	ξ_T (%)
0 (IDLE)	82,6	46,9	52,2	29,6
40	121,6	44,3	88,1	32,2
80	126,4	44,2	92,2	32,3
120	137,6	43,6	103,5	32,9
150	174,4	42,4	140,0	34,1
200	233,0	39,8	215,3	36,7

A maior eficiência elétrica do stack foi evidenciada no modo *IDLE* de operação, que corresponde a uma potência elétrica nominal de 0 kW , porque os desvios provocados pelas polarizações são pequenos para baixas correntes elétricas, conforme a Tabela 3. Nesta condição toda energia elétrica gerada está sendo utilizada para manter o funcionamento da unidade.

3.0 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA UNIDADE

Como mencionado anteriormente, a planta PC25C pode operar em um intervalo de potência elétrica nominal, líquida, compreendida entre 0 e 200 kW. Para cada valor de potência estipulado existe um conjunto de parâmetros de controle que se ajustam automaticamente para garantir o *set point* de operação. O posicionamento dos atuadores das válvulas de controle e do ejetor, a rotação dos motores e o acionamento dos aquecedores e ventiladores elétricos são exemplos das variações sofridas durante uma alteração de potência. Além da potência líquida, disponível, a planta deve gerar uma quantidade adicional de energia elétrica necessária para o seu próprio consumo. Esta demanda de energia elétrica pode ser obtida pela equação 19. O comportamento da potência elétrica consumida pode ser observado no Gráfico 1.

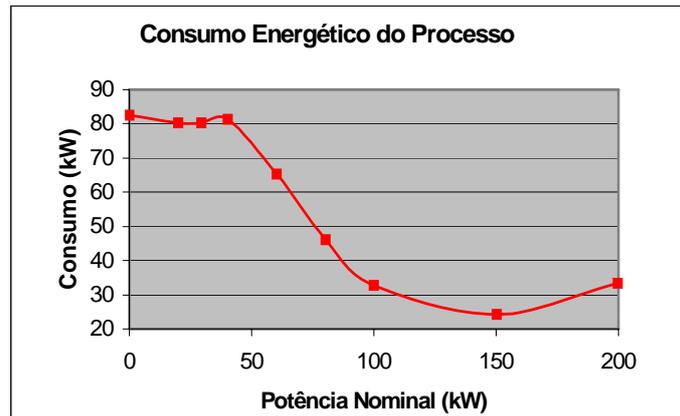


GRÁFICO 1

Quando a planta está operando em um intervalo de potência elétrica nominal compreendido entre 0 e 100 kW é evidenciado um grande consumo de energia elétrica, conforme mostrado no Gráfico 1. Isto ocorre porque a demanda térmica da unidade está sendo suprida por aquecedores elétricos. À medida que a potência de geração é elevada, a taxa de calor liberado pelo *stack* torna-se maior dispensando a utilização freqüente dos aquecedores. Para a faixa de potência nominal compreendida entre 150 e 200kW o consumo sofre novo aumento, que é ocasionado pelo aumento da rotação do motor do ciclo de refrigeração e pelo acionamento mais freqüente dos ventiladores de resfriamento que rejeitam para o exterior a energia térmica remanescente no processo.

Para avaliar a tendência do consumo de energia elétrica com o aumento a potência elétrica nominal foi calculada a razão entre a potência elétrica consumida e a potência elétrica total (P_{EC} / P_{ET}) do processo. Os valores encontrados estão no Gráfico 2.

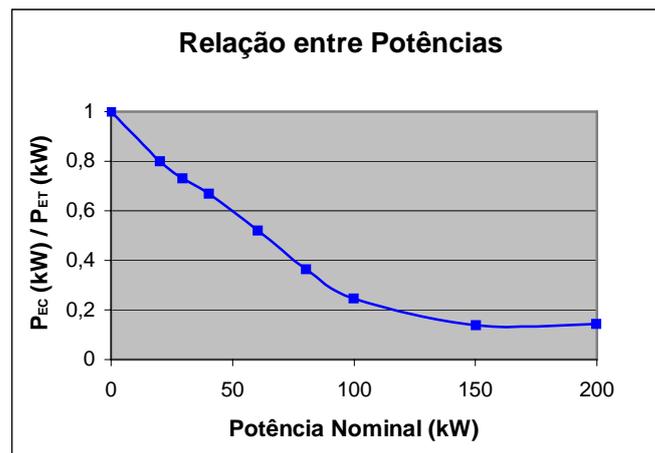


GRÁFICO 2

Com este gráfico fica evidente que a razão do consumo de energia elétrica pela energia elétrica total decresce com o aumento da potência líquida de 0 até 150kW. Entre 150kW e 200kW esta razão se mantém praticamente constante indicando uma região onde o consumo de energia elétrica é minimizado. Nesta faixa de potência o aproveitamento da energia elétrica é de 86%.

4.0 - CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível verificar como as conversões energéticas ocorridas no *stack* influenciam no comportamento da planta PC25C. Foi constatado que o aumento a potência elétrica de geração promove um aumento no aproveitamento energético da unidade, ocasionado pela redução do consumo de energia elétrica, e uma redução na eficiência elétrica do *stack* em virtude do aumento do sobrepotencial.

A máxima eficiência elétrica encontrada no *stack* foi de 46,9%, para uma potência nominal de operação de 0 kW, enquanto que a melhor condição de operação da planta PC25C foi de 86%, que representa a parcela disponível da energia elétrica total do *stack*, para uma faixa de potência nominal compreendida entre 150 a 200kW. Portanto, o *setpoint* de potência nominal mínimo que garante o maior rendimento da planta é de 150kW.

Este estudo é parte integrante de um projeto de P&D desenvolvido em parceria com a COPEL Geração, no âmbito do Programa de P&D da ANEEL e complementa o projeto de demonstração de células a combustível desenvolvido há 4 anos pelo LACTEC e pela COPEL Distribuição. A avaliação do balanço de planta é uma das etapas de aquisição de conhecimento necessário à fabricação de plantas de energia baseadas em hidrogênio e células a combustível. A tecnologia de fabricação de células a combustível de ácido fosfórico é madura e dominada pelos EUA e pelo Japão. No Brasil, grupos de pesquisa já desenvolveram sistemas com este eletrólito, mas os estudos foram abandonados quando as primeiras células comerciais foram lançadas.

O grande desafio tecnológico para a fabricação destas plantas no Brasil e no mundo é o alto custo da planta, em torno de US\$ 4,000 a US\$ 5,000 por kW instalado. O preço não vem caindo com o volume produzido, criando a visão de que a tecnologia PAFC não tem futuro comercial. No entanto, a operação e manutenção destas plantas mostram que nas condições brasileiras o custo pode ser reduzido, uma vez que os custos da mão de obra e dos componentes nacionais (válvulas, motores, atuadores, sensores, tubulação, entre outros) são menores que nos países mais desenvolvidos. Um estudo do LACTEC para utilização destas plantas em substituição à rede elétrica residencial e aquecimento por GLP indica que o preço competitivo das células se encontra entre US\$ 2,360 (caso pessimista) e US\$ 4,900 (caso otimista). O caso mais provável (durabilidade do *stack* de 7 anos e US\$ 1 = R\$ 3,00) indica competitividade ao preço de US\$ 3,600 por kW.

A análise dos custos de manutenção revela que várias peças da planta podem ser obtidas no mercado nacional. Uma estimativa conservadora de nacionalização mostra que 32% das peças podem ser substituídas por similares nacionais, dado obtido da lista de componentes e consulta a fornecedores nacionais. Substituindo o valor do produto nacional teríamos um custo de US\$ 3,500 por kW. É fácil concluir que plantas semelhantes fabricadas no Brasil teriam um preço bastante competitivo em certos nichos de mercado.

O Brasil domina algumas tecnologias necessárias à fabricação destas plantas: eletrônica de potência e de controle, fabricação de peças e componentes, montagem, catalisadores para reforma do gás natural e projeto de sistemas. As tecnologias faltantes são a de fabricação do *stack* e o balanço de planta. Ao final deste projeto, o LACTEC espera ter adquirido conhecimento relevante em balanço de planta. Quanto à fabricação do *stack*, os desafios são menores que outras tecnologias mais em voga, tais como as células de eletrólito polimérico (PEMFC), ainda com problemas de durabilidade, e as células de óxido sólido (SOFC), ainda com preço proibitivo. A tecnologia PAFC é durável e pode ter custo reduzido, com os investimentos adequados em pesquisa, em desenvolvimento tecnológico e em engenharia avançada.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) www.brasilh2.com.br;
- (2) HIRSCHENHOFER, J. H., STAUFFER, D.B. "Fuel Cell Handbook"; USDOE, 5^a Edição, 2000;
- (3) Manual de operação da planta PC25C da UTC Fuel Cells;
- (4) LARMINIE, J., DICKS, A. "Fuel Cell Systems Explained"; Editora Wiley, 2^a Edição, 2003;
- (5) TICIANELLI, E. A., GONZALEZ, E. R. "Eletroquímica"; Editora USP, 1^a Edição, 1998;
- (6) VARGAS, J. V. C., BEJAN, A. "Thermodynamic optimization of internal structure in a fuel cell"; International Journal of Energy Research, Editora John Wiley & Sons, 2003;
- (7) SMITH, J. M., VAN NESS, A. C. "Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química"; Editora LTC, 5^a Edição, 2000;
- (8) PRAUSNITZ, J. M., REID, R. C. "The Properties of Gases & Liquids"; Editora McGraw-Hill, 4^a Edição, 1987.
- (9) CANTÃO, M. P. "Células a Combustível de Ácido Fosfórico: Experiência e Perspectivas". 2^o Workshop de Células a Combustível. AGRENER, Campinas, 2004. <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/2workshop/>