

DESENVOLVIMENTO E ENSAIOS DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE POLÍMERO SÓLIDO (PEMFC) PARA GERAÇÃO ESTACIONÁRIA

MARA ELLERN⁽¹⁾
CYRO VICENTE BOCCUZZI⁽¹⁾
GERHARD ETT⁽²⁾
GERSON YUKIO SAIKI⁽²⁾
GILBERTO JANÓLIO⁽²⁾
JOSÉ ANTÔNIO JARDINI⁽³⁾

⁽¹⁾ ELETROPAULO, São Caetano, SP, Brasil

⁽²⁾ ELECTROCELL, São Paulo, SP, Brasil

⁽²⁾ USP, São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Esse artigo apresenta os resultados de um projeto realizado que teve como objetivo desenvolver e testar uma célula a combustível de polímero sólido (PEMFC) de até 50 kW, com saída 220 V/127 V para geração estacionária.

Células a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) usam reações químicas simples que geram água a partir da combinação do hidrogênio e do oxigênio. Isto funciona como se fosse uma eletrólise reversa. No anodo, moléculas de hidrogênio cedem elétrons, formando íons de hidrogênio (este processo é possível por causa do catalisador de platina). A membrana polimérica permite que somente os prótons a atravessem, não os elétrons. Como resultado o íon de Hidrogênio flui diretamente através da membrana polimérica para o catodo, enquanto os elétrons fluem pelo circuito externo, produzindo corrente elétrica. No catodo, os elétrons e os íons de hidrogênio se combinam com o Oxigênio formando água. Na célula a combustível, a tendência natural do hidrogênio de oxidar-se e formar água produz eletricidade útil. Nenhuma poluição é gerada e os únicos subprodutos são água e calor.

Com o grande desenvolvimento na área de materiais a tecnologia em células a combustível, associada à crescente exigência de baixo impacto ambiental, tornou-se bastante promissora no cenário mundial de energia. Estas representam, já em médio prazo, uma alternativa tanto para motores a combustão (unidades móveis), como para geradores de energia de médio porte (100 kW) e até plantas de alguns MW de potência (unidades estacionárias).

Realizado com a junção das distintas competências de três entidades: USP, Electrocell e AES Eletropaulo, este projeto, que absorveu mais de 1,7 milhões de reais, efetivou com sucesso um sistema nacional de geração distribuída usando células modulares interligadas num sistema de eletrônica de potência dando um passo significativo para o total domínio tecnológico local para a produção comercial de sistemas de geração de energia alternativos usando módulos multicelulares, garantindo assim energia de forma limpa, silenciosa e extremamente eficiente.

ABSTRACT

PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell uses a simple chemical reaction to combine hydrogen and oxygen into water, producing electric current in the process. It works something like reversed electrolysis: At the anode, hydrogen molecules give up electrons, forming hydrogen ions (this process is made possible by the platinum catalyst). The proton exchange membrane allows protons to flow through, but not electrons. As a result, the hydrogen ions flow directly through the proton exchange membrane to the cathode, while the electrons flow through an external circuit. As they travel to the cathode through the external circuit, the electrons produce electrical current. At the cathode, the electrons and hydrogen ions combine with oxygen to form water. In a fuel cell, hydrogen's natural tendency to oxidize and form water produces electricity and useful work. No pollution is produced and the only byproducts are water and heat

The huge advance on materials development combined with the growth demand of lower impact on environment is placing the fuel cells on the top of the most promising technologies world-wide. They are becoming in medium term feasible alternatives for energy generators up to energy plants of few MW.

PALAVRAS CHAVE

Célula a Combustível; Polímero Sólido; Geração Estacionária; Hidrogênio; Geração distribuída.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta os resultados de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado entre a Electrocell, a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a AES Eletropaulo que teve como objetivo desenvolver e testar um protótipo de célula a combustível de polímero sólido (PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell) para posterior fabricação em escala industrial no Brasil. Esse tipo de célula, anteriormente desenvolvido para uso veicular, passou a ser encarado como uma alternativa atrativa para geração estacionária.

O desenvolvimento ficou a cargo da Electrocell, empresa que já havia desenvolvido anteriormente uma célula completa e acabada para 1 kW e que detinha a capacitação e tecnologia para tal projeto. O desenvolvimento foi acompanhado e validado na Universidade de São Paulo através do Departamento de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP-PEA).

As células a combustível são, em princípio, baterias (pilhas) químicas, ou seja, dispositivos que convertem energia química diretamente em energia elétrica e térmica, possuindo, entretanto uma operação contínua, graças à alimentação constante de um combustível. [1]

Ao ser utilizado como fonte de energia numa célula a combustível, o hidrogênio libera energia e não gera poluentes (ver tabela comparativa – tabela I - abaixo). A reação química resultante da operação gera, além de energia, calor e água pura.

TABELA I
GERAÇÃO DE ENERGIA X IMPACTO AMBIENTAL (FONTE MCT - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA) [2]

Tipo de geração de energia	Impacto Ambiental (Valores em Kg de poluentes por MWh)			
	Combustão a gás	Combustão a óleo	Combustão a carvão	Célula a combustível
Particulados	0,2	0,2	0,2	0,000045
Nox	0,3	0,5	1,1	0,028 a 0,2
SOx	-	1,2	1,9	0,00036
Fumaça	Opacidade	Opacidade	Opacidade	Desprezível

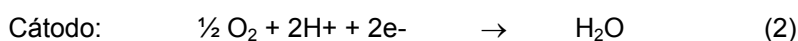
O hidrogênio pode ser obtido a partir da eletrólise da água, da reforma de vapor de hidrocarbonetos leves (cadeias carbônicas situadas entre o metano e a nafta), da gaseificação de resíduos agrícolas e, da dissociação do metanol, etanol e do gás natural.

O reformador é um equipamento que "quebra" a molécula do combustível liberando os átomos de hidrogênio (H₂). Ele trabalha com vapor de água em temperaturas relativamente elevadas e, para tanto, utiliza parte da energia do combustível que geralmente é da ordem de 20%.

O início da pesquisa de células a combustível ocorreu há mais de 150 anos, por Sir William Grove. Com o grande desenvolvimento na área de materiais nos últimos 15 anos, a tecnologia em células a combustível, associada à crescente exigência de baixo impacto ambiental, tornou-se bastante promissora no cenário mundial de energia. Estas representam, já em médio prazo, uma alternativa tanto para motores a combustão (unidades móveis), como para geradores de energia de médio porte (100 kW) e até plantas de alguns MW de potência (unidades estacionárias). O estudo e

desenvolvimento de célula a combustível associam outras áreas de conhecimento, como, por exemplo, a produção de hidrogênio a partir da reforma de outros combustíveis (fósseis, de biomassa, etc.), incluindo-se aí o etanol, estratégico para o Brasil.

Esta conversão ocorre por meio de duas reações eletroquímicas parciais de transferência de carga em dois eletrodos separados por um eletrólito apropriado, ou seja, a oxidação de um combustível no ânodo e a redução de um oxidante no cátodo. Escolhendo-se, por exemplo, hidrogênio como combustível e oxigênio (do ar ambiente) como oxidante, tem-se na denominada célula ácida, a formação de água e produção de calor, além da liberação de elétrons para um circuito externo, que podem gerar trabalho elétrico. As reações nos eletrodos são:



Um esquema simplificado de uma célula a combustível de eletrólito polimérico sólido é apresentado na figura 1. Os prótons produzidos na reação anódica são conduzidos pelo eletrólito até o cátodo, onde se combinam com o produto da redução do oxigênio, formando água.

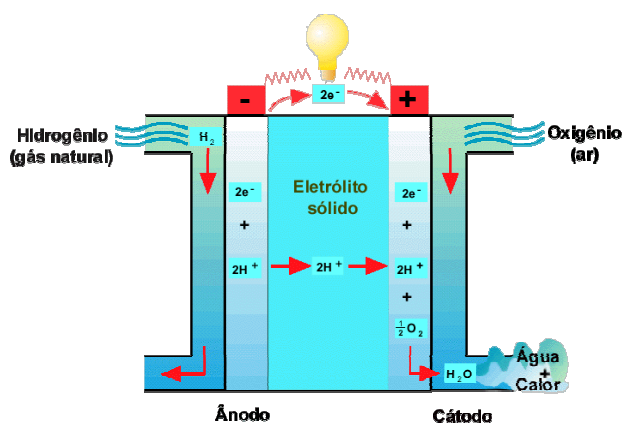


Fig. 1 Desenho Esquemático de uma Célula a Combustível

Existem vários tipos de células a combustível, classificados segundo o eletrólito que utilizam, o qual define a temperatura de operação.

A tabela II relaciona os tipos de célula a combustível considerados hoje os mais promissores para aplicações terrestres com suas características principais, a sua temperatura de operação, e suas aplicações mais relevantes. Estas células possuem materiais constituintes distintos e técnicas de construção diversas.

TABELA II
TIPOS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL[3]

Célula Combustível (Tipo)	Eletrólito	Temperatura (°C)	Eficiência Típica (%)	Aplicação	Disponibilidade	Custo previsto para 5 ou 10 anos (2005/2010) (US\$/kW)
AFC (Alcalina)	KOH (OH ⁻)	50 a 120	55 a 60	Veículos	Demonstração	US\$ 750 / 550
PAFC (Ácido Fosfórico)	H ₃ PO ₄ (H ₃ O ⁺)	180 a 210	42 a 47	Geração Estacionária	Comercial	US\$ 1.400 / 1.275
PEMFC (Polímero Sólido)	Membrana (H ⁺)	60 a 110	45 a 65	Veículos	Pré-comercial	US\$ 250 / 100
				Geração Estacionária	Pré-comercial	US\$ 1.500 / 1.000
DMFC (Metanol Direto)	Membrana (H ⁺)	45 a 100	50 a 55	Veículos	Pré-comercial	US\$ 750
MCFC (Carbonato Fundido)	(CO ₃ ²⁻)	630 a 650	55 a 60	Geração Estacionária	Demonstração	US\$ 1.900 / 1.600
SOFC (Óxido Sólido)	ZrO ₂ (O ²⁺)	800 a 1000	40 a 45	Geração Estacionária	Pesquisa	US\$ 1.450 / 1.250
					Pré-comercial	

Como se trata de uma tecnologia pouco utilizada a quantidade de dados relativos ao seu uso comercial ainda são poucos.

A primeira unidade comercial disponível internacionalmente foi a PC-25 desenvolvida pela International Fuel Cells Corporation (IFC) em 1991. Trata-se de uma célula tipo PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) de 200 kW, 480/277 V, 60 Hz e 400/230 V a 50 Hz. A eficiência dessa célula está em torno de 40% e chegando à aproximadamente 80% com aplicações em co-geração. Uma unidade acumulava em agosto/2000 mais de 50.000 horas de operação. Uma das unidades montadas no exterior alcançou operação ininterrupta de 9.500 horas.

2. OBJETIVOS

Esse projeto teve como objetivo desenvolver um protótipo de Célula a Combustível de Polímero Sólido (PEMFC) para posterior fabricação em escala industrial no Brasil buscando-se um elevado grau de nacionalização.

O projeto inicial previa a construção de 5 módulos ("stacks") de até 10 kW cada, porém diversos fatores impediram o alcance desse objetivo. Alguns fornecedores de serviços inicialmente previstos para a usinagem dos eletrodos não tinham disponibilidade de ferramental para a realização do serviço, desta forma foi necessária a auto-capacitação da própria Electrocell para a realização deste trabalho. Outro ponto relevante é que o aumento do valor do dólar da fase de projeto até a montagem encareceu em muito o custo dos MEAS previstos no início do projeto – orçado em reais - sendo que foi inicialmente previsto o uso de 40 MEAs por stacks (total 200 MEAs). Ao final, foram adquiridos 180 MEAs para uso nos 3 módulos efetivamente montados da célula a combustível

Mesmo com o projeto reduzido para 3 módulos, manteve-se ainda o objetivo global do protótipo/pesquisa. O maior objetivo proposto pelo projeto de desenvolvimento de sistema de geração distribuída a partir de células combustíveis foi o domínio local de capacitação nesta tecnologia de geração alternativa. Este seria um efetivo primeiro passo para o futuro desenvolvimento de aplicações sustentáveis de geração distribuída a partir da tecnologia de célula combustível, tipo PEM já reconhecida como a mais adequada a sistemas de geração distribuída. Este reconhecimento foi ratificado por diversos artigos e projetos que ao redor do mundo, o mais recente tivemos contato com foi um projeto Iraniano de 5kW de potência coordenado pelo Sr.

Morteza Lotfikian que a 2 anos atrás iniciou-se com a tecnologia de ácido fosfórico e a agora está sendo desenvolvido com a tecnologia PEM por causa dos resultados esperados.

Além do domínio local de capacitação tecnológica o projeto tinha por objetivo a criação de aplicação que viesse garantir mínimo impacto ambiental – permitindo a criação de fontes de geração alternativas que evitem os problemas comuns dos geradores a diesel (poluição sonora e ambiental - resíduos sólidos no ar e líquidos no solo, necessidade de espaços restritos e com condições especiais, e principalmente riscos de explosão e incêndio).

Foi requerida também a possibilidade de operação com cargas isoladas sem alteração de performance. A configuração modular, tanto dos stacks como o do sistema total, deveria permitir evitar os problemas de transporte e as paradas pelas manutenções freqüentes exigidas pelos geradores a diesel. Além disso, o requisito da saída trifásica em estrela 220V permitiria a futura conexão em paralelo com a rede, permitindo que o sistema funcionasse futuramente como um “no-break” e um retificador de forma de onda oferecida à carga tirando picos e eventuais quedas de nível de tensão, tornando a aplicação ideal para situações onde a energia elétrica é bastante crítica.

3. METODOLOGIA

O projeto foi dividido em módulos executados independentemente até a integração total da unidade. Do processo de fabricação dos dispositivos foram contratados os serviços de detalhamento dos circuitos de hardware e processo de confecção das placas de circuito impresso. Durante o projeto obteve-se a captação local para a execução dos serviços de corte e usinagem dos eletrodos.

O projeto detalhado do sistema e a montagem dos circuitos de hardware, stack, exaustão, tubulação e instalação elétrica foi executado pela equipe da Electrocell.

Os módulos de células a combustível desenvolvidos foram compostos por 180 MEAs (Membrane Electrode Assembly - Conjunto de Membrana – Eletrodo) que fornecem tensão e corrente contínuas, por isso é necessário um módulo de eletrônica de potência (inversor) para que ela possa fornecer tensão e corrente alternadas. Esse módulo consiste de um inversor formado por pontes de IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor – Transistor Bipolar de Porta Isolada), filtros e transformador.

Os módulos independentes do projeto foram os seguintes:

- Módulo 1 (Bateria + Filtro)
- Módulo 2 (Módulo de potência auxiliar, pré-regulador)
- Módulo 3 (Inversor PWM)
- Módulo 4 (Transformador de saída)
- Módulo 5 (Stack modular para até de 30kW) composto de
 - 1º. Stack de até 10 kW para execução de testes preliminares de aprovação composto de 40 MEAs
 - 2o. e 3o. Stacks de até 10 kW cada, montados sucessivamente até a conclusão do módulo total, sendo que o segundo possui 80 MEAs e o terceiro 60 MEAs.
- Módulo 6 (Sistema de controle e segurança)
- Módulo 7 (Unidade de tratamento de gases)
- Módulo 8 (Rack)
- Módulo 11 (Proteção eletrônica)

A figura 2 apresenta uma foto do sistema construído.



Fig. 2 Rack fechado (4m²) e aberto com Células a Combustível (direita), módulo de controle (centro) e módulo de eletrônica de potência (esquerda)

A figura 3 apresenta a configuração física simplificada das células, eletrônica de potência e transformador na configuração inicial de 5 módulos de até 10 kW cada. Na configuração final testada os Stacks 4 e 5 ficaram em vazio.

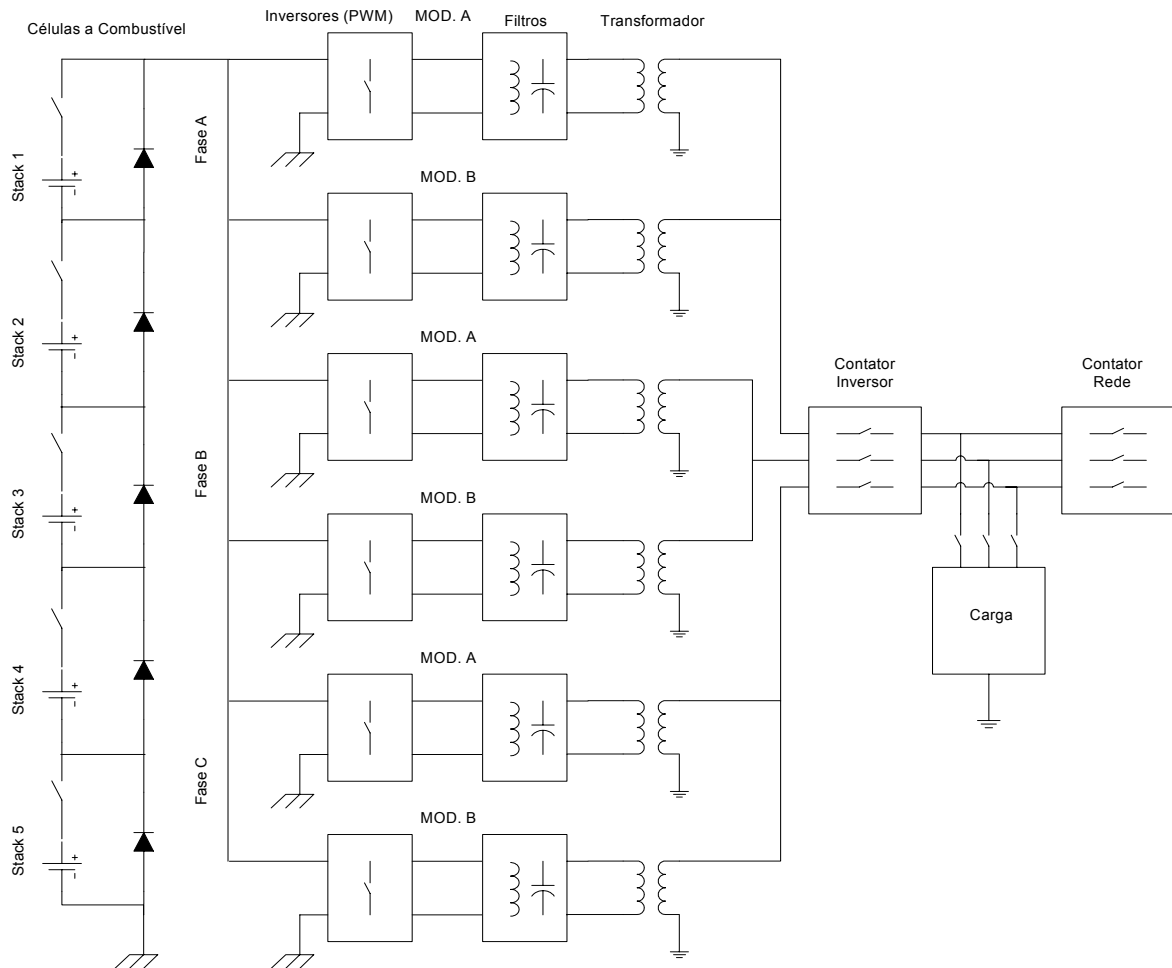


Fig. 3 Esquema simplificado (célula + eletrônica de potência) da configuração inicial

4. RESULTADOS

O sistema desenvolvido consiste em célula a combustível, inversor e transformador. Devido a essa modularidade e também ao fato de que esses itens foram construídos em períodos diferentes, os testes foram efetuados para cada parte do sistema.

Primeiro foram efetuados os ensaios no transformador. Esses ensaios foram os de vazio e de curto-circuito, para se determinar os valores das reatâncias de magnetização, perdas no ferro e equivalentes. Após os testes no transformador foram efetuados os testes no módulo de eletrônica de potência. Esse módulo é composto por um inversor e filtros de harmônicos. Esses ensaios determinaram o rendimento do módulo, as formas de onda de corrente e tensão para diferentes cargas. Em seguida foram efetuados os ensaios da célula a combustível que utilizaram o sistema completo, ou seja, célula a combustível, módulo de eletrônica de potência e transformador.

Os ensaios foram realizados utilizando-se um, dois ou três stacks. Em alguns ensaios foi necessária a utilização de baterias em série com a célula devido à necessidade de uma tensão mínima de funcionamento do módulo de eletrônica de potência.

Foram medidos: a potência elétrica resultante da célula, a potência fornecida às cargas, o consumo de hidrogênio e oxigênio e as temperaturas dos gases.

Os primeiros testes foram realizados com apenas um stack alimentado com ar do ambiente. Em seguida esse stack foi alimentado com oxigênio e verificou-se com isso um aumento na potência fornecida pela célula. Os demais testes foram realizados alimentando-se a célula com oxigênio e utilizando mais de um stack que foram ligados em série.

Como carga foram utilizados 12 lâmpadas halógenas (potência total de 6 kW), um forno elétrico (4 kW) e uma prensa (2,4 kW). Com essas cargas foi possível testar desde a condição em vazio (célula a combustível alimentando apenas sistemas auxiliares) até a potência de 11.540 W. Dos ensaios na célula a combustível obteve-se os rendimentos elétricos e químicos apresentados a seguir.

A figura 4 apresenta uma foto das lâmpadas sendo alimentadas através da energia elétrica gerada pela célula a combustível.

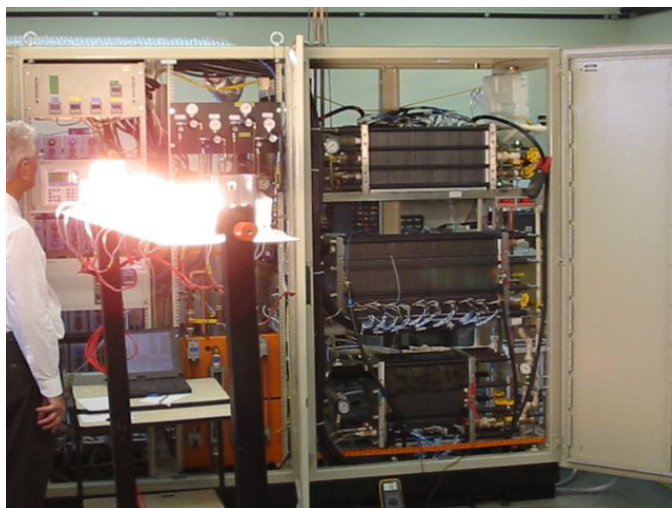


Fig. 4 Célula a combustível alimentando lâmpadas.

A. Desempenho Elétrico

Os ensaios realizados foram utilizados para determinar o desempenho elétrico da célula a combustível. Para isso foram medidas a corrente e tensão geradas pela célula e a potência fornecida à carga.

A tabela III apresenta alguns desses valores. As duas primeiras colunas apresentam a tensão e a corrente geradas pelos stacks mais baterias. Já a quarta e quinta colunas apresentam a tensão e corrente dos stacks.

Tabela III Desempenho Elétrico

Total			Na célula			Potência Carga (W)	Rendimento (%)	Stacks Usados
V _{CC} (V)	I _{CC} (A)	P _{CC} (W)	V _{CC} (V)	I _{CC} (A)	P _{CC} (W)			
93,7	74,6	6.990	49,7	74,6	3.707	6.520	93,3	2
91,0	86,2	7.844	47,6	86,2	4.103	7.416	94,5	2
113,1	84,9	9.602	43,1	84,9	3.659	9.151	95,3	2
79,8	144,7	11.547	39,0	144,7	5.643	11.540	99,9	2
73,2	111,3	8.147	78,5	111,3	8.737	6515	84,0	1, 2 e 3

A figura 5 apresenta a curva V x I dos ensaios realizados. No eixo das ordenadas são apresentados os valores das tensões em cada MEA da célula a combustível.

Observa-se, para os casos com stack 2 e 3, que há um aumento no rendimento para o caso em que as reações eletroquímicas são realizadas com oxigênio em relação às que são realizadas utilizando-se apenas ar.

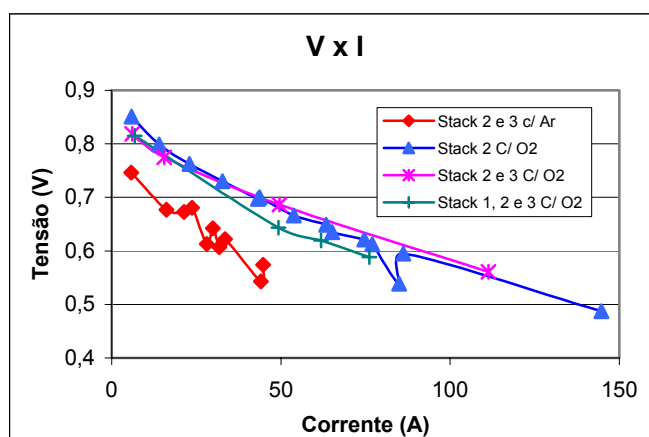


Fig. 5 Curva V x I de todos os ensaios.

B. Rendimento Químico

O objetivo do cálculo do rendimento químico é verificar qual a vazão necessária para geração de uma determinada quantidade de potência elétrica.

Para isso foram medidas as vazões de hidrogênio e oxigênio, e a potência elétrica gerada. O cálculo da vazão de hidrogênio estequiométrico é dado por:

$$V_{H_2} = 1,05 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s}$$

onde:

P_e é a potência elétrica resultante; e

V_c é a tensão média por célula unitária.

V_c=0,56V (em fase inicial de ativação)

Densidade do H₂ = 0,084 kg/m³

logo:

$$V_{H_2} = 0,0075 \times \frac{P_e}{V_c} \text{ l/min}$$

A tabela IV apresenta os valores das vazões dos gases e a potência elétrica gerada pelos stacks para os casos em que apenas um stack foi utilizado. A sexta coluna apresenta a vazão teórica para a potência elétrica obtida. A sétima coluna apresenta a potência que deveria ser obtida com a vazão utilizada.

Tabela IV Rendimento Químico (1 stack)

Vazão H ₂ (l/min)	Vazão O ₂ (l/min)	I _{CC} (A)	V _{CC} (V)	Pot. Célula (W)	Vazão H ₂ Teórico (l/min)	Pot. Teórica para Vazão Utilizada (W)	Rendimento (%)
85	68	77,0	49,0	3.773,0	50,5	6.347	59,4
70	80	86,2	47,6	4.103,1	55,0	5.227	78,5
95	90	84,9	43,1	3.659,2	49,0	7.093	51,6
135	130	144,7	39,0	5.643,3	75,6	10.080	56,0

Nos testes o valor recomendado para ajuste de vazão deve ser 20% acima do recomendado para não faltar combustível e umidificação nas últimas células do stack. Este fator diminui a eficiência no consumo de gás.

5. DISCUSSÃO

O projeto não atingiu completamente o objetivo técnico proposto. Do módulo de 80 MEAs esperava-se 50 Volts com 200 Ampères sendo que o maior valor obtido foi 39V e 145A. Isso se deve em parte ao fato de que os testes foram efetuados com as células ativadas há pouco tempo e parte devido a eficiência obtida no projeto. Com o procedimento de ativar e desativar as células (ciclagem) há um aumento da tensão fornecida (aumento de 0,5 V a 1 V a cada ciclagem). Um outro fator se deve ao fato de que o Stack 1 encontra-se com baixa eficiência por ter sido utilizado demasiadamente com as experiências iniciais de construção do protótipo da célula.

Mesmo não tendo sido possível atingir o objetivo inicial do projeto (5 x 50 kW) todas as fases da pesquisa foram cumpridas e avaliadas. Além disso, os rendimentos elétrico e químico estão próximos do esperado embora nos testes foi utilizado hidrogênio em excesso.

6. CONCLUSÕES

O conjunto de célula a combustível e eletrônica de potência funcionaram adequadamente suprindo tensões de 127/220V inclusive para cargas isoladas.

Dos ensaios e testes e a partir da experiência acumulada durante as diversas etapas do projeto uma grande carga de conhecimento foi adquirida. Seguem alguns exemplos de experiências acumuladas que garantem o incremento da relação custo/ benefício de novos projetos:

- Deve-se sempre finalizar a etapa de ativação do catalisador antes da operação para se obter a potência máxima da célula, visto que a cada nova medida tem-se obtido uma melhor eficiência.
- É importante o uso de um sistema de purificação de hidrogênio, para podermos utilizar o hidrogênio comercial que custa um quinto do preço do grau 4.0 utilizado no projeto. Além disso, deve-se inserir um compressor na saída dos Stacks para reaproveitar todo o gás excedente.
- O sistema de resfriamento deve garantir o aproveitamento do calor gerado para fornecimento de água quente para sistemas de utilidades como esterilização ou ar condicionado

- Deve-se sempre garantir a possibilidade de ligação em paralelo a rede para suprir melhores resultados na aplicação em geração distribuída e mesmo garantir que o sistema funcione como um no-break permitindo o fornecimento não só de uma energia limpa, silenciosa e segura, mas também de excelente qualidade em termos de forma de onda e nível de tensão.

Os resultados alcançados e os esforços dedicados ao projeto de desenvolvimento de sistema de geração distribuída a partir de células a combustível na tecnologia PEM garantiram que um verdadeiro salto fosse dado na capacitação tecnológica local não só na aplicação de células a combustível em si, mas também no conjunto de partes, acessórios e módulos complementares necessários para garantir que as aplicações em células combustíveis tornem-se economicamente viáveis para geração distribuída.

7. AGRADECIMENTOS

A autora agradece profundamente as contribuições do Prof. Dr. José Antônio Jardini e a de seus colaboradores da Escola Politécnica da USP, que, além de disponibilizarem toda a sua experiência em projetos de pesquisa e desenvolvimento e conhecimentos em sistema de eletrônica de potência, superaram todas as expectativas existentes no que se refere a criatividade, a flexibilidade, a diligência, e competência na coordenação do projeto.

Agradecem também o espírito de luta e perseverança que os profissionais da Electrocell demonstraram em todo o trajeto. É gratificante para o nosso país contar com cientistas como Gilberto Janólio, Gerhardt Ett, Ângelo Massatoshi Ebessui e Volkmar Ett, isto para citar apenas alguns dos 40 excelentes profissionais envolvidos no projeto.

Também agradecemos ao Consultor Especialista Edson A. Ticianelli pela sua eficiente colaboração recebida durante a elaboração deste projeto e documento.

Nosso reconhecimento fica também declarado a todo o corpo diretivo da AES Eletropaulo, especialmente na figura do Sr. Cyro Boccuzzi, e de toda a sua equipe de coordenação de projetos de pesquisa e desenvolvimento, especialmente o Sr. Sunny Jonathan que com efetivo entusiasmo abraçaram um projeto de tão longo prazo e com tão grandes desafios tecnológicos.

Por último agradecemos especialmente Dr. Aderbal de Arruda Penteado Junior e o Sr. Luis Vicente do Grupo Técnico e de Concessões da Comissão de Serviços Públicos de Energia – CSPE e o professor José Eduardo Pinheiro Santos Tanure da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Estes profissionais conseguiram demonstrar sem sombra de dúvida o papel contributivo do órgão regulador. Talvez o maior valor deste projeto esteja num bem totalmente intangível mas que foi demonstrado por todos os profissionais mencionados acima: a certeza que somente com empenho, entusiasmo, força e cooperativismo é que se consegue superar obstáculos e promover verdadeiros saltos tecnológicos para um futuro melhor, mais limpo, seguro e, definitivamente, mais humano.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Website da SERC - How the PEM Fuel Cell Works - <http://www.humboldt.edu/~serc/fc.html>
- [2] Website do Ministério da Ciência e tecnologia
- [3] Website do Grupo Electrocell - www.electrocell.com.br
- [4] BLOMEN L J M J, JOHANSON T B "Fuel Cells" Lund University Press 1989
- [5] EG&G Services Parsons, Inc., Science Applications International Corporation, "Fuel Cell Handbook" - Fifth Edition, October 2000, U. S. Department of Energy.
- [6] NYSERDA New York State Research and Development Authority. "220 kW Fuel Cell Monitoring and Evaluation Program; Providing Independent Performance Data on Phosphoric Acid Fuel Cells- Final Report 97-3" fevereiro 1977
- [7] Silva, W. M.; Paula, P. P.; Janólio, G; Ebessui, A. e Ett, G. "Design and Operation of a Fuel Cell System Prototype for Electric Vehicles" EPE2001- European Power Electronics Conference.
- [8] Pinheiro, J. L. P. "O suprimento de energia através das células de combustível", MSc. dissertation, Dept. Energia e Automação, University of São Paulo, Escola Politécnica, 1998.