

# Desenvolvimento de Células a Combustível de Polímero Sólido (PEMFC) para Aplicação em Geração de Energia Elétrica Distribuída.

M. Ellern, AES-Eletropaulo; G. Janólio, G. Ett, V. Ett, A. Ebesui, Electrocell; J. A. Jardini, G. Y. Saiki, EPUSP/ PEA/ GAGTD<sup>1</sup>

## RESUMO

As pressões da sociedade em relação às questões ambientais têm contribuído para o desenvolvimento de formas alternativas para geração de energia elétrica. Um dos campos mais promissores nessa área é a geração de energia elétrica através das chamadas células a combustível. Essas células utilizam os gases hidrogênio e oxigênio para produção de eletricidade e têm como resíduo final a água. O hidrogênio pode ser fornecido puro ou ser obtido através da reforma de produtos ricos nesse elemento, como o gás natural.

Como a produção de eletricidade pode ser realizada no local de consumo ou próximo dele, as células a combustível possuem grande potencial de uso na geração distribuída.

## PALAVRAS-CHAVE

Célula a Combustível, Hidrogênio, Fontes Alternativas, Geração Distribuída.

## I. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída deverá tornar-se uma opção energética importante nos próximos anos devido a um conjunto de fatores: a reestruturação do setor elétrico, a evolução tecnológica, as pressões da sociedade em relação às questões ambientais e o mercado em expansão. Simultaneamente à reestruturação das concessionárias, há, por parte dos consumidores, exigências crescentes quanto à qualidade do fornecimento de energia elétrica e por respostas rápidas na prestação de serviços, no aumento da demanda e na diversificação dos serviços prestados pela concessionária.

O conceito da geração distribuída (elétrica ou térmica) se baseia na geração no próprio local de uso (ou o mais próximo), economizando os custos de transmissão e distri-

buição e proporcionando uma solução energética e economicamente otimizada para cada caso.

As tecnologias para geração distribuída são muito baratas quando comparadas às de geração centralizada, dispensando investimentos em transmissão e distribuição, e podem ser implantadas em curtos prazos, com riscos muitas vezes menores.

A geração distribuída possui diversas aplicações: reserva de potência, co-geração de eletricidade e calor, geração na ponta, reforço de carga e geração isolada.

Os sistemas de geração distribuída também se caracterizam pela flexibilidade em relação ao combustível e abrangem diversas tecnologias. A possibilidade de empregar gás natural e gás de síntese derivado de hidrocarbonetos, de carvão, de biomassa é exemplo dessa flexibilidade.

Nesse trabalho será discutida a utilização de células a combustível para produção de energia elétrica. Esse equipamento utiliza hidrogênio e oxigênio e através dos princípios de eletroquímica produz corrente elétrica.

As concessionárias de energia elétrica que têm demonstrado maior interesse no desenvolvimento das células a combustíveis, são aquelas de âmbito regional e com interesses na geração distribuída. Tal fato se deve aos atrativos proporcionados pelas células a combustível, entre as quais destacam-se:

- alta eficiência tanto em plena carga como em carga parcial, em unidades de pequeno porte;
- nível muito baixo de emissões ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , compostos orgânicos);
- unidades compactas com baixo nível de ruído audível;
- unidades modulares, pré-montadas em fábrica e com baixo tempo de construção;
- flexibilidade operacional; e
- possibilidade de complementar a capacidade existente de operação, reduzindo demanda de pico e perdas.

Apesar dessas vantagens as células a combustível apresentam algumas desvantagens:

- alto custo;
- tecnologia não familiar para a indústria de potência; e
- falta de infraestrutura.

Diversos estudos de mercado, conduzidos a partir do final da década de 80, identificaram a existência de um mer-

<sup>1</sup> M. Ellern (Gerente do Projeto) trabalha na AES-Eletropaulo (mktgc@eletropaulo.com.br) G. Janólio (engenheiro) trabalha na Electrocell (gilberto@electrocell.com.br) G. Ett (engenheiro) trabalha na Electrocell. V. Ett (engenheiro) trabalha na Electrocell. A. M. Ebesui (engenheiro) trabalha na Electrocell (angelo@electrocell.com.br) J. A. Jardini (Coordenador do Projeto), Prof. Dr. Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da USP (jardini@pea.usp.br) G. Y. Saiki (Pesquisador) trabalha na EPUSP/PEA/GAGTD – Grupo de Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia (gysaiki@pea.usp.br).

cado potencial para aplicações na faixa de 3 a 10 kW, para atendimentos residenciais e pequenos comércios.

Entretanto, os mesmos fatores que estão motivando o crescimento da geração distribuída são capazes de modificar as expectativas de entrada no mercado de um tipo específico de célula a combustível de baixa potência.

As células a combustível denominadas de membrana polimérica (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC, ou Solid Polymer Fuel Cell – SPFC), anteriormente desenvolvidas para uso veicular, passaram a ser encaradas como uma alternativa atrativa para a geração estacionária destinada ao mercado mencionado. O grande esforço de pesquisa e desenvolvimento empreendido pelos grandes fabricantes de veículos no sentido de reduzir os custos de fabricação das PEMFCs, aumentar a durabilidade, reduzir o nível de emissões atmosféricas e aumentar a potência específica (W/kg) tem, de forma indireta, ampliado à possibilidade de empregar PEMFCs de baixa potência (<50 kW) para uso estacionário.

## II. CÉLULA A COMBUSTÍVEL

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.

Ao ser utilizado como fonte de energia numa célula a combustível, o hidrogênio libera energia e não gera poluentes. A reação química resultante da operação gera, além de energia, calor e vapor de água pura.

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

O reformador é um equipamento que “quebra” a molécula do combustível liberando os átomos de hidrogênio (H<sub>2</sub>). 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 das pesquisas 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 (combustível da célula a combustível) a partir da reforma de outros combustíveis (fósseis, de biomassa, etc.), incluindo-

do-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:

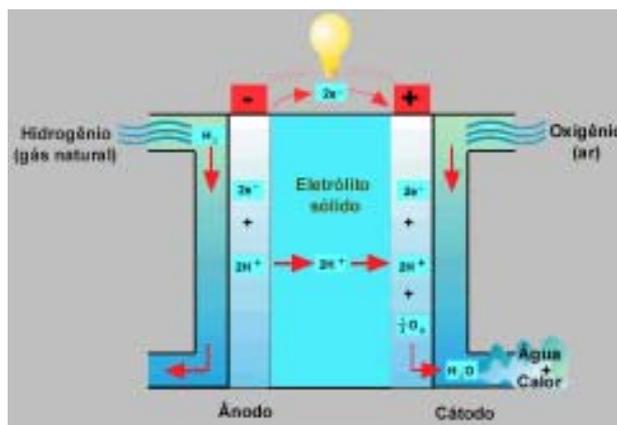


FIGURA 2 – Desenho Esquemático de uma Célula a Combustível

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.

## III. APLICAÇÕES

A eficiência das células a combustível está na faixa de 40% a 55% para as células de baixa temperatura de operação. Para as células que operam em temperaturas mais altas a eficiência pode ultrapassar 70% se o calor gerado for utilizado para cogeração ou aquecimento.

A eficiência, isoladamente, não é a principal vantagem de sistemas de geração de energia com célula a combustível, mas sim, o seu inerente fator ecológico, com baixíssima geração de poluentes, além de silenciosas, compactas e de fácil manutenção. Por estas razões, vislumbra-se um mercado para sistemas de célula a combustível para geração de energia, com aplicações localizadas de até alguns MW de potência, como, por exemplo, em hospitais, condomínios residenciais, repartições públicas, etc. As vantagens das células a combustível aumentam quando se tem por finalidade a geração de energia móvel, caso das células de baixa temperatura, onde a sua eficiência fica bem acima dos motores convencionais.

A aplicação deste tipo de célula a combustível é, então, a tração automotiva. Em menor escala, as células a combustível poderão ser utilizadas para alimentar equipamentos eletrônicos, de comunicações, laptops, etc.

#### IV. GERAÇÃO ESTACIONÁRIA

Uma das características das células a combustível está no fato de que a sua eficiência não é praticamente afetada pelo seu tamanho. Isso significa que plantas pequenas e relativamente eficientes podem ser desenvolvidas, evitando o alto custo associado ao desenvolvimento de grandes plantas. Com isso, inicialmente o desenvolvimento de células a combustível para geração estacionária está focada na capacidade de algumas centenas de kW até poucas dezenas de MW.

#### V. TIPOS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Existem vários tipos de células a combustível, classificadas segundo o eletrólito que utilizam, o qual define a temperatura de operação. A tabela 1 relaciona os tipos de célula a combustível considerados hoje os mais promissores para aplicações terrestres com suas características principais, vantagens e desvantagens atuais e suas aplicações mais relevantes. Os vários tipos de célula a combustível existentes, classificados segundo a sua temperatura de operação, envolvem materiais constituintes distintos e técnicas de construção diversas.

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 foi a PC-25 desenvolvida pela International Fuel Cells Corporation (IFC). 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 cogeração. Uma unidade acumulava em agosto de 2000 mais de 50.000 horas de operação. Uma das unidades alcançou operação ininterrupta de 9.500 horas.

#### VI. PROJETO DESENVOLVIDO

Esse projeto tem como objetivo final desenvolver protótipos de Células a Combustível de Polímero Sólido (PEMFC) para posterior fabricação em escala industrial no Brasil com elevado grau de nacionalização visando vários mercados principalmente o da ELETROPAULO.

O desenvolvimento ficará a cargo da Electrocell, empresa que já desenvolveu uma célula completa e acabada para 1 kW e detêm a capacitação e tecnologia. O desenvolvimento será acompanhado e validado pela Universidade de São Paulo (USP).

A empresa Electrocell está desenvolvendo uma célula a combustível de 50 kW e 250 V<sub>CC</sub>. Essa célula é composta por cinco módulos (“stacks”) de 10 kW e 50 V<sub>CC</sub> cada um, que fornece 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.

Por ocasião da confecção desse artigo ainda não tinha sido terminada a construção do primeiro módulo (stack) de 10 kW, por isso não há nenhum teste para as células a combustível. Já o módulo de eletrônica de potência (inversor) e o transformador estavam prontos e com isso os ensaios foram realizados com esses equipamentos.

TABELA 1

Tipos de Células a Combustível

TIPO (*)	ELETRÓLITO	T (°C)	VANTAGENS	DESvantagens	APLICAÇÕES
PEMFC	Polímero condutor de prótons.	20-120	Alta densidade de potência Operação flexível, Mobilidade.	Custo da membrana. Contaminação do catalisador com CO	Veículos, Espaçonaves, Unidades estacionárias, pequena potência
PAFC	Ácido Fosfórico 90-100% (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	160-220	Maior desenvolvimento tecnológico. Tolerância a CO (até 1%).	Vida útil limitada pela corrosão.	Unidades estacionárias.
AFC	KOH concentrado	70-80	Alta eficiência	Vida útil limitada por contaminação do eletrólito com CO <sub>2</sub>	Unidades estacionárias. Veículos
MCFC	Carbonatos fundidos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	550-660	Tolerância a CO/CO <sub>2</sub> Eletrodos à base de Ni. Reforma interna.	Corrosão do cátodo. Interface trifásica de difícil controle	Unidades estacionárias Cogeração de eletricidade / calor
SOFC	ZrO <sub>2</sub> (zircônia dopado)	850-1000	Alta eficiência (cinética favorável). Reforma interna.	Problemas de materiais. Expansão térmica	Unidades estacionárias Cogeração de eletricidade/calor. Veículos.

(\*) PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), AFC (Alkaline Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) e SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)

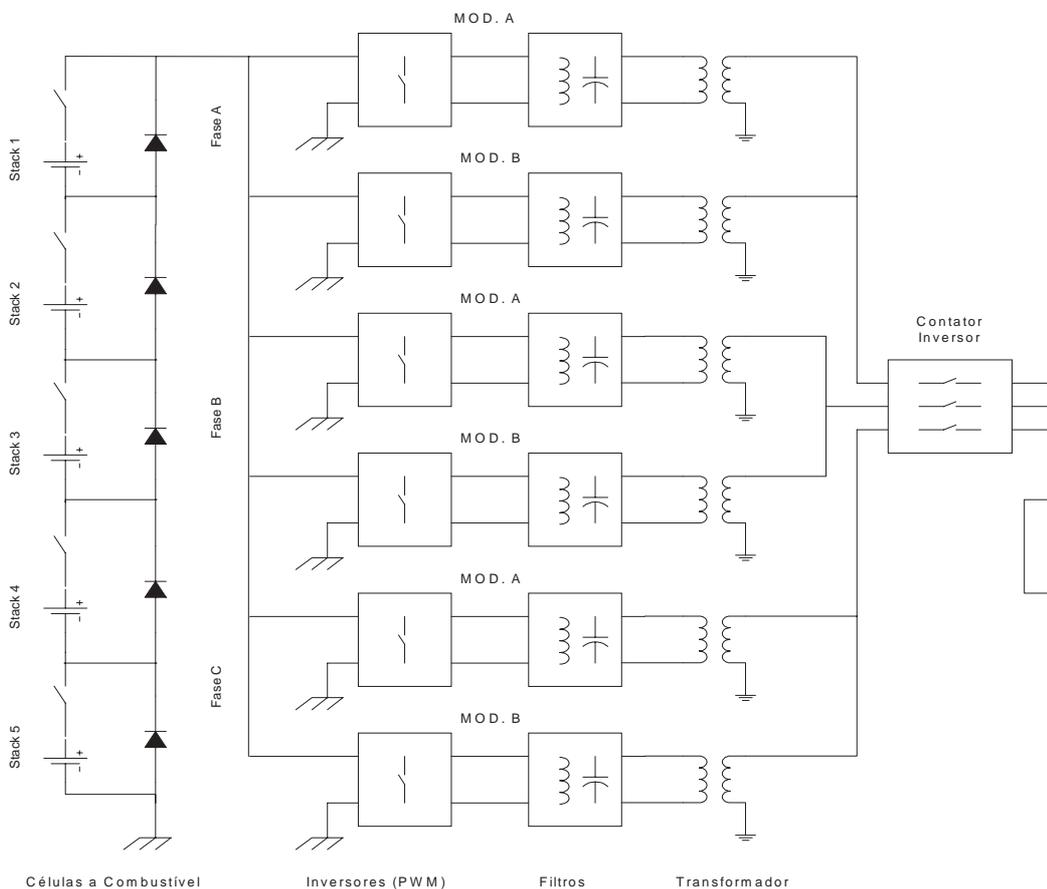


FIGURA 2 - Esquema simplificado (célula + eletrônica de potência + transformador)

## VII. ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios do módulo de eletrônica de potência (inversor) da célula a combustível foram realizados no Laboratório de Máquinas do IEE-USP (Instituto de Eletrotécnica e Energia – Universidade de São Paulo).

Esses ensaios consistiram em aplicar uma tensão contínua fornecida por um retificador pertencente ao IEE para simular a célula a combustível e verificar o comportamento do módulo de eletrônica de potência para diferentes cargas (resistiva, capacitiva e indutiva) e determinar o rendimento do conjunto inversor e transformador. Foram também analisados alguns tipos de transitórios.

Também foram realizados os ensaios do transformador existente no módulo. Os ensaios foram o de vazio e o de curto-circuito.

O esquema simplificado da célula juntamente com o inversor e transformador é apresentado acima.

## VIII. RESULTADOS

Os testes realizados no transformador foram todos bem sucedidos (ensaio em vazio e curto-circuito).

Os testes no módulo inversor são apresentados na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Ensaio do módulo inversor

CASO	VCC(V)	CARGA
1	250	Vazio
2	240	Resistiva – 5.081 W
3	236,5	Resistiva – 10.220 W
4	231	Resistiva – 15.110 W
5	226	Resistiva – 20.380 W
6	245	Resistiva – 25.230 W
7	220	Vazio
8	208	Resistiva – 10.220 W
9	231	Resistiva – 20.320 W
10	240	Resistiva – 30.630 W
11	238	Resistiva – 40.470 W
12	244	Resistiva – 47.440 W
13	163	Resistiva – 15.040 W
14	227	RL – 19.360W e 16.210 Var
15	219	RC – 19.560W e –7.137 Var

Como carga foram utilizadas resistências, capacitores e indutores. Os casos 1 a 6 foram realizados utilizando-se meio sistema, ou seja, apenas metade da potência. Com isso para cada fase foi utilizado apenas um enrolamento do transformador. Os demais casos foram realizados utilizando-se o sistema completo. Também foram realizados alguns ensaios de transitórios, como por exemplo a inserção

de uma carga indutiva para simular a partida de um motor. As respostas do módulo inversor para esses ensaios foram muito boas, não apresentando nenhuma reação fora do esperado.

Para alguns casos também foi medida a distorção harmônica total (THD). Para o caso 12, por exemplo, a THD para corrente foi de 2,39% e para tensão foi de 2,16%.

Através desses ensaios foi possível determinar o rendimento do módulo inversor juntamente com o transformador. O rendimento obtido está na faixa de: 29,86% para o caso 1 e 88,6% para o caso 12. Os casos 1 e 7 (vazio) não apresentam rendimento zero pois é gerada uma quantidade de corrente CA (alternada) para alimentar os equipamentos de medição e controle do inversor.

O módulo inversor e o transformador se comportaram muito bem nesses ensaios realizados. Como a célula a combustível ainda não está montada ficam faltando os testes da célula isoladamente e os testes do sistema completo (célula a combustível + inversor + transformador).

O primeiro módulo da célula (10kW) está previsto para ficar pronto no final de julho de 2003.

## IX. SUMÁRIO FINAL

As células a combustível apresentam uma ampla gama de utilização, como automóveis, geração distribuída, computadores portáteis, e outros equipamentos elétricos. Como grande vantagem temos um nível muito baixo de emissões. Trata-se de uma tecnologia de grande potencial mundial e por isso o desenvolvimento de um protótipo nacional é de grande importância.

## X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BLOMEN L J M J, JOHANSON T B "Fuel Cells" Lund University Press 1989.
- [2] CLEGHORN S J C et al "PEM fuel cells for transportation and stationary power generation applications" Int Hydrogen Energy v 22, n 12, 1997.
- [3] Figueiredo, N. A. - Gas Net; [www.gasnet.com.br/artigos/artigos\\_view2.asp?cod=91&idio=1](http://www.gasnet.com.br/artigos/artigos_view2.asp?cod=91&idio=1).
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] Serra, E. T. "Uso de Células Combustíveis em Residências e Estabelecimentos Comerciais". Revista Eletricidade Moderna, Maio de 2003.