

## CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE BAIXA POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES ESTACIONÁRIAS

**Hartmut Wendt**

Wendt Ingenieure, Forsthausstr.35, D-64807 Dieburg - Alemanha

**Marcelo Linardi\*** e **Eliana M. Aricó**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Travessa R, 400, Cidade Universitária, 05508-900 São Paulo - SP

Recebido em 4/5/01; aceito em 19/9/01

LOW POWER FUEL CELLS FOR STATIONARY APPLICATIONS. A paradigmatic shift in developing fuel cell for stationary applications has been occurring in the last ten years. Previously, 100 kW class to a few MW class power plants were preferred but recently, the development has drifted towards units of only a few kW. The motivation is the present market situation, which favors disperse residential electric power generation from natural or liquefied gas. Membrane-type fuel cells are very promising for this application, due to their present state of development in the automobile industry. More recently, small ceramic fuel cells (SOFC) has also been found to be adequate for this application. Considering a family of 4 members, 1 kW (electric) units seem to be optimal for individual residences. This presentation discusses briefly the Brazilian scenario with respect to these units.

Keywords: fuel cells; electrochemistry; power plant.

## INTRODUÇÃO

Há mais de trinta anos estão em desenvolvimento cinco tipos de células a combustível. Estas são: as células de alta temperatura de operação (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell e MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell) e as células de baixa temperatura de operação (AFC: Alkaline Fuel Cell; PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell e a PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell)<sup>1</sup>.

A célula do tipo PEM é a mais apropriada para a tração automotiva e não se prevê, a curto prazo, sua substituição por nenhum outro tipo de célula nesta aplicação. Para a produção de eletricidade em unidades estacionárias o quadro é bastante diferente, sendo que todos os quatro tipos de células têm boas chances.

A estratégia de desenvolvimento para as células estacionárias sofreu uma grande mudança nos anos 90. Unidades das classes de 100 kW e de até alguns MW eram preferenciais. Atualmente este desenvolvimento também está voltado para unidades de alguns kW. A motivação vem da situação favorável do mercado para a aplicação das células no fornecimento de energia elétrica em residências. As células do tipo PEM são bastante promissoras para esta aplicação devido ao seu avançado desenvolvimento para a indústria automotiva. Entretanto pequenas células cerâmicas do tipo SOFC também são adequadas para esta aplicação, possuindo um mercado mais dinâmico que o das grandes instalações deste tipo. Este fato tornou-se claro apenas recentemente.

A empresa suíça Sulzer/Hexis foi a primeira que orientou o desenvolvimento de células cerâmicas na direção deste mercado, prometendo unidades de apenas 1 kW (elétrico) para breve. Várias outras empresas, tanto norte-americanas como japonesas e européias, possuem desenvolvimentos orientados para aplicações domésticas. Essas empresas mantêm programas de desenvolvimento de células a combustível do tipo PEM, para a produção estacionária de eletricidade, para instalações com potência de alguns kW (elétrico) que utilizam gás natural como combustível.

Considerando-se uma família com quatro pessoas, e operação independente da célula a combustível, estima-se uma instalação otimizada de 1 kW (elétrico). Para residências com mais moradores são mais apropriadas instalações de 4 a 5 kW (elétrico). Para a operação simultânea externa de várias residências ainda não existem cálculos econômicos disponíveis. Nesses sistemas a potência otimizada de cada unidade residencial poderá ser bastante superior.

Este trabalho objetiva mostrar recentes mudanças no cenário das células a combustível de potência, de aplicações estacionárias, atualmente mais direcionadas para o desenvolvimento de módulos de baixa potência, visando o mercado de residências e pequenas indústrias, hospitais, escolas, etc. Este novo direcionamento deve servir de base para os projetos de P&D do IPEN.

## CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

A célula a combustível, um transformador de energia eletroquímica, oxida hidrogênio no ânodo, pólo negativo, e reduz oxigênio no cátodo, pólo positivo, por meio de eletrodos de difusão gasosa<sup>1</sup>.

As células a combustível são classificadas segundo o tipo de eletrólito utilizado e conseqüentemente a temperatura de operação. Informações adicionais sobre as reações envolvidas, além de mais dados sobre os tipos de células podem ser vistas na forma de tabela em Wendt *et al.*<sup>1</sup>. Destacam-se dois grupos principais:

As células de baixa temperatura de operação (abreviação do inglês):

- (i) Células alcalinas (AFC), KOH a 80 °C;
- (ii) Células a membrana polimérica trocadora de prótons (PEMFC), atualmente membrana Nafion® a 80 °C;
- (iii) Célula a ácido fosfórico (PAFC), 103% em massa de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> a 200 °C;

As células de alta temperatura de operação:

- (i) Célula a carbonatos fundidos (MCFC), Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-eutético a 700 °C;
- (ii) Células cerâmicas (SOFC), ZrO<sub>2</sub> estabilizadas com Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a 900 °C.

As células alcalinas (i), possuíam um interesse apenas histórico até o ano de 2001, quando teve início o seu desenvolvimento, pela

\*e-mail: mlinardi@net.ipen.br

empresa ZETEK, em Colônia, Alemanha, para aplicações em telecomunicações e afins, com unidades de 1,5 até 4,7 kW.

O potencial de equilíbrio (circuito aberto) da reação de formação de água é de aproximadamente 1,2 V, à temperatura ambiente. Sob solicitação de carga, uma célula unitária pode fornecer uma tensão contínua entre 0,6 e 1,0 V, para densidades de corrente que variam, segundo o tipo de célula, entre 0,15 e 1,0 A cm<sup>-2</sup>.

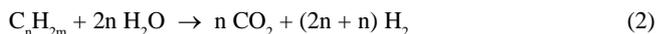
### Combustível

Com exceção da célula direta a metanol (DMFC, Direct Methanol Fuel Cell, também uma PEM), todas as outras têm hidrogênio como combustível. Entretanto, não se utiliza hidrogênio puro, mas sim uma mistura gasosa, que contém além de hidrogênio, um pouco de vapor d'água, CO<sub>2</sub> e CO. Este gás é chamado de gás de reforma e provém da transformação catalítica heterogênea (reforma) de gás natural; hidrocarbonetos ou de também metanol, com vapor d'água, de acordo com as reações totais (1, 2 e 3). Estas reações requerem uma enorme quantidade de energia térmica.

Reforma do gás natural (metano):



Reforma de hidrocarbonetos:



Reforma do metanol:



A reforma de um combustível primário (transformação catalítica heterogênea) pode ocorrer no próprio corpo das células de alta temperatura de operação, principalmente nas SOFC e MCFC, onde se pode aproveitar o calor produzido na célula para as reações químicas. Nas células de baixa temperatura de operação não é possível este aproveitamento, sendo necessário um reator químico separado para a reação de reforma.

## ESTRUTURA DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Os principais componentes de uma célula a combustível são: a camada de eletrólito e os eletrodos de difusão gasosa<sup>1</sup>. No caso das células PEMFC, os eletrodos são compostos de partículas de carvão ativado de cerca de 0,5 mm, dopados com Pt, agregados com Nafion<sup>®</sup>. As células são montadas eletricamente em série e sobrepostas, formando um empilhamento ("stack"). Utiliza-se a denominada placa bipolar, que separa o anodo de uma célula do catodo da célula seguinte. As unidades de célula são normalmente dispostas verticalmente.

### A camada de eletrólito

As células PAFC e MCFC utilizam eletrólitos na forma líquida, fixados por uma fina camada de pó de SiC (para PAFC) e de pó de LiAlO<sub>2</sub> (para MCFC). Tanto as partículas de SiC e LiAlO<sub>2</sub> possuem o diâmetro de partícula da ordem de frações de micrometro. As células PEMFC e SOFC utilizam eletrólitos sólidos. O eletrólito da célula PEMFC constitui-se de uma camada delgada (100 a 150 μm de espessura) de um polímero condutor protônico (membrana Nafion<sup>®</sup>) bastante resistente quimicamente. O eletrólito da SOFC constitui-se de uma camada (50 a 100 μm de espessura) de zircônia estabilizada com ítria.

### Eletrodos de difusão gasosa

Eletrodos de difusão gasosa são camadas de alta porosidade, cuja espessura depende do tipo de célula e pode variar de 20 μm até alguns centésimos de milímetro. Na célula PAFC e PEMFC esses eletrodos são confeccionados por partículas de carvão ativo dopadas com platina. Essas partículas são recobertas por fibras microscópicas de PTFE ou, no caso da PEMFC, do próprio material da membrana, formando um agregado poroso. Uma parte dos poros entre os flocos de carvão ativo está totalmente preenchida pelo material do eletrólito. Uma parte considerável dos poros é mantida hidrofóbica, pois nestes poros as partículas estão recobertas com uma fina camada de PTFE e estão disponíveis para a difusão dos gases no eletrodo.

A construção de eletrodos de difusão gasosa para células de alta temperatura é, comparativamente, mais fácil. Utiliza-se para o anodo de células SOFC um cermet, ou seja, partículas de níquel e zircônia da ordem de micrometros. O catodo compõe-se de uma camada significativamente mais espessa de manganito de lantânio dopado com estrôncio. Os conjuntos eletrodo/eletrólito/eletrodo (MEA's) possuem espessuras que podem variar de frações de milímetros até alguns milímetros, constituindo-se então em componentes extremamente delicados da célula.

### Placa bipolar

As placas bipolares devem ser estáveis quimicamente tanto em atmosfera redutora quanto oxidante. Além disso, devem ser boas condutoras de eletricidade e resistir ao ataque químico do eletrólito. Para células de baixa temperatura de operação utiliza-se carbono ou um composto de polímero e carbono. Em células de alta temperatura de operação a escolha mais apropriada recai sobre aços inoxidáveis especiais ou ainda, como no caso das células SOFC, cromito de lantânio sinterizado.

## SISTEMAS PERIFÉRICOS

### Unidade de processamento de gás

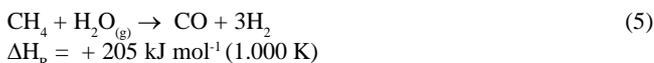
A reação global de oxidação do metano (gás natural) é dada pela Equação (4), possuindo um ΔH<sub>R</sub> de - 806,4 kJ mol<sup>-1</sup> (Lower Heating Value).



Entretanto para a utilização de gás natural como combustível primário de uma usina de células a combustível, deve-se conduzir sua reforma numa instalação de processamento de gás, onde o gás natural é convertido numa mistura gasosa composta de aproximadamente 4/5 de H<sub>2</sub> e 1/5 de CO<sub>2</sub> com menos de 1% de CO (desconsiderando-se o excesso de vapor d'água). Para células de baixa temperatura de operação deve-se manter a concentração de CO bastante baixa, pois o monóxido de carbono envenena o eletrocatalisador, desativando a célula.

O gás natural, antes do processo de reforma, deve passar por um processo de descontaminação de enxofre por adsorção, de modo a proteger o catalisador do processo de reforma e o eletrocatalisador da célula. Em instalações comerciais (maiores que 100 kW elétrico) utiliza-se óxido de zinco como adsorvedor de enxofre (processo Claus).

A reforma se processa alimentando-se o gás natural com vapor d'água em um reator aquecido do tipo coluna de enchimento de alto desempenho (reformador), preenchido com catalisador de níquel, segundo a reação de reforma a vapor:



O reator aproveita a energia do gás do anodo de saída, que ainda contém cerca de 20% do hidrogênio alimentado originalmente e traços de metano não convertido. Este gás residual é queimado completamente para a produção de calor para o reformador, somando cerca de 85 % da energia necessária para a reação de reforma. A etapa seguinte consiste na conversão catalítica do monóxido de carbono em  $\text{CO}_2$  em um reator análogo ao anterior (coluna de enchimento), entretanto, desta vez com resfriamento, segundo a reação de conversão de deslocamento:



Desta forma, aproveita-se o CO produzido na reforma, reação (5), para a produção de mais hidrogênio. A reação (6) ocorre de 200 a 300 °C, sendo este calor aproveitado para o pré-aquecimento dos gases de alimentação em células de alta temperatura de operação.

A reação (6) não é total e deixa cerca de 1% de CO na alimentação. Este teor não chega a afetar o desempenho das células do tipo PAFC, pois estas operam a 200 °C. Entretanto, para células PEMFC, que operam a cerca de 80 °C, este teor de CO ainda é muito alto. Neste caso, deve-se adicionar mais uma etapa após a reação de conversão (6), denominada Conversão PROX (Preferential Oxidation). Nesta conversão, adiciona-se à mistura gasosa uma pequena quantidade de ar e o CO é oxidado cataliticamente a  $\text{CO}_2$  em platina, de modo que a mistura assim obtida, chamada gás de reforma, contenha no máximo 100 ppm de CO (preferencialmente 10 ppm).

A reforma de outros combustíveis primários para a produção de hidrogênio, como metanol, etanol, gasolina, biogás, etc. pode ser considerada. Entretanto, para aplicações estacionárias, apenas a reforma do gás natural tem-se mostrado viável. No caso especial do Brasil, deve-se salientar o nosso imenso potencial para a utilização de combustível proveniente da biomassa como, por exemplo, o etanol, embora ainda seja necessário muito estudo nesta direção<sup>6</sup>.

### Inversor

O inversor é responsável pela conversão da corrente contínua produzida no conjunto de células a combustível a corrente alternada, geralmente trifásica, nas especificações de tensão e frequência desejadas. Este pode funcionar de modo autônomo ou monitorado. Para instalações de célula de pequena potência, a corrente de saída será bifásica.

### Trocador de calor

O calor gerado pelas células a combustível pode ser trocado com óleo, água ou ar, como fluido refrigerante. Uma parte desta troca de calor é feita pelo próprio gás do catodo, que se aquece ao passar pela célula, elevando sua temperatura da ambiente até a temperatura da célula. Nas células tipo PAFC da firma IFC são dispostas placas refrigeradoras a cada conjunto de 5 células unitárias. O calor assim retirado do conjunto de células é trocado em um circuito secundário, com água, ou é utilizado diretamente para aquecimento residencial, se for o caso. Um gerenciamento energético entre a instalação de processamento de gás e o conjunto de células é fundamental para a eficiência global da instalação. Por exemplo, o calor da mistura gasosa de saída do reformador pode servir para a produção de vapor d'água, necessária para a reação (5). Nas Figuras 1 e 2 são mostrados os diagramas de blocos do processo de reforma de um combus-

tível primário associado a células a combustível do tipo PAFC. A Figura 1 inclui os fluxos de massa e energia do processo. Na Figura 2 observa-se a inclusão de uma etapa adicional (PROX) de purificação do gás para células PEMFC.

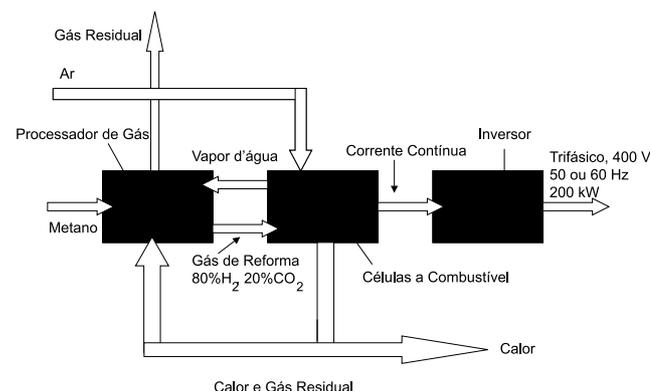


Figura 1. Diagrama de blocos de um sistema de células a combustível do tipo PAFC (IFC PC25A e PC25C) com fluxos de massa e energia

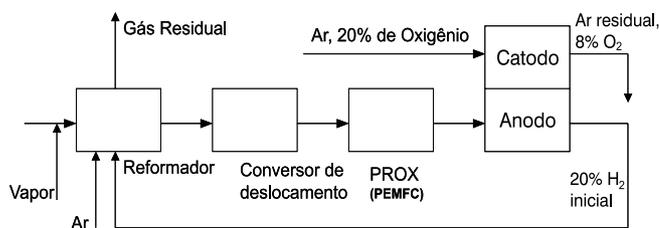


Figura 2. Diagrama de blocos de um sistema de reforma do gás natural em células a combustível do tipo PEMFC

### Sistema operacional

O sistema operacional de uma célula de potência consiste em todos os dispositivos de acionamento e controle, bem como de segurança, que permite uma operação das células como as especificações, dependendo da sua aplicação.

Sistemas operacionais para aplicações móveis são mais sofisticados e precisam ser muito mais rápidos que os sistemas operacionais para aplicações estacionárias, devido à própria dinâmica dos automóveis. Este artigo se limita a descrever as funções e características de sistemas operacionais para instalações estacionárias, escolhendo como exemplo o sistema da instalação IFC. Num curto intervalo de tempo (da ordem de minutos), o sistema abrange todos os parâmetros de operação de todas as partes da instalação, analisa-os, gerencia a instalação química segundo a solicitação de potência elétrica e reconhece, em tempo, perturbações e falhas nos parâmetros de processo. O sistema dispara, primeiramente, um alarme, quando da ocorrência de falhas e, em seguida, procede automaticamente o desligamento da célula de maneira ordenada e suave. O sistema também pode avisar sobre mudanças de solicitação de potência, se programado pelo operador, e efetuar a mudança. Dados importantes são, atualmente, armazenados por cerca de 24 horas e podem ser transmitidos a outro sistema de dados, facilitando um tardio diagnóstico ou busca de falha. Uma importante premissa para a utilização de instalações de células a combustível para aplicações residenciais é a utilização de um sistema operacional confiável e de baixo preço.

## UTILIZAÇÃO E MERCADO DOS DIVERSOS TIPOS DE CÉLULAS

As células a ácido fosfórico são, atualmente, as únicas disponíveis comercialmente. Esta tecnologia vem sendo testada já há mais de 15 anos e possui mais de 225 unidades vendidas e mais de 400 encomendas. Trata-se da célula IFC, norte-americana, das séries PC25A, B e atualmente C, cujas potências nominais são de 0,2 MW (elétrico) e cerca de 0,2 MW (térmico) a um custo de US\$ 600.000,00/unidade. A empresa relata uma eficiência elétrica da ordem de 40 %. Recentemente, a empresa japonesa Fuji Electric também colocou no mercado unidades deste tipo de tecnologia.

As unidades IFC são, todavia, ainda muito caras, custando mais de US\$ 3.000/kW, dificultando o crescimento das vendas e encontrando mercado apenas em projetos de demonstração e de aplicações sem interrupção do fornecimento de energia, como por exemplo, instalações militares, centros computacionais de bancos, etc. A Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL) está adquirindo três unidades deste tipo de célula PAFC, que serão as primeiras unidades deste porte no Brasil. A Petrobrás estuda, atualmente, a compra de outra unidade.

Em contrapartida, as células do tipo PEMFC se desenvolveram muito rapidamente nos últimos anos, havendo, atualmente, mais de 15 fornecedores no mundo, com potência variando de frações de kW a vários kW até no máximo 100 kW (Alston). A razão para este desenvolvimento rápido é a adequação das PEMFC para a geração de eletricidade móvel e o interesse dos fabricantes de veículos em desenvolver automóveis de baixa ou nenhuma emissão. Como será discutida a seguir, esta técnica também se tornou interessante para a geração de eletricidade estacionária, descentralizada e dispersa numa região.

A empresa norte-americana Westinghouse desenvolveu o conceito tubular de célula cerâmica SOFC já há mais de 20 anos, como será discutido mais adiante. Atualmente atingiu-se um tal amadurecimento deste conceito, que entraram em operação as primeiras usinas geradoras de 100 kW (elétrico) na Califórnia e nos Países Baixos. O desenvolvimento da tecnologia e do mercado está abrigado, nos dias de hoje, no aglomerado Westinghouse-Siemens. Com a finalidade de se atingir altos índices de eficiência do sistema para até 70%, planeja-se a junção de turbinas de gás às células, sob pressão. Entretanto, não foi atingida ainda a meta de custos na faixa de US\$ 1.000/kW a US\$ 2.000/kW, não sendo possível, temporariamente, a conquista de mercado. Recentemente a empresa Sulzer-Hexis mostrou que pequenos sistemas de células SOFC planares, de apenas 1 kW (elétrico), também podem ser utilizados para a cogeração de eletricidade/calor em residências, sendo este mercado bastante interessante.

As células a carbonatos fundidos têm aplicações semelhantes às das células cerâmicas. As metas de desenvolvimento foram, recentemente, redirecionadas para unidades relativamente pequenas, de algumas dezenas de kW. Almeja-se o mercado de produção de eletricidade/calor industrial, onde pode-se obter temperaturas de processo de algumas dezenas de graus Celsius.

Mais informações sobre protótipos, instalações e recentes desenvolvimentos com diversas possibilidades de aplicações podem ser obtidas na Internet<sup>7,8</sup>.

### INSTALAÇÕES DA CLASSE DE 100 KW

#### Células a ácido fosfórico PAFC da IFC PC25

As células do tipo PAFC da firma IFC foram as primeiras instalações de células a combustível a serem disponibilizadas no merca-

do, já no começo da década de 80. A firma japonesa Fuji Electric também desenvolveu instalações de 100, 200 e 500 kW (elétrico) de potência, denominadas BHKW. A baixa volatilidade do eletrólito possibilita uma temperatura de operação de cerca de 200 °C, sendo uma das vantagens o aproveitamento do calor produzido, por exemplo, para a produção de vapor de processo. Esta temperatura de operação torna o eletrocatalisador praticamente insensível ao envenenamento por CO, diminuindo as exigências de purificação do gás de reforma. Teores de CO de até 1% na alimentação são toleráveis. Na Figura 3 é mostrado um esquema da construção da mais moderna instalação da empresa ONSI, a PC25C, com 200 kW (elétrico).

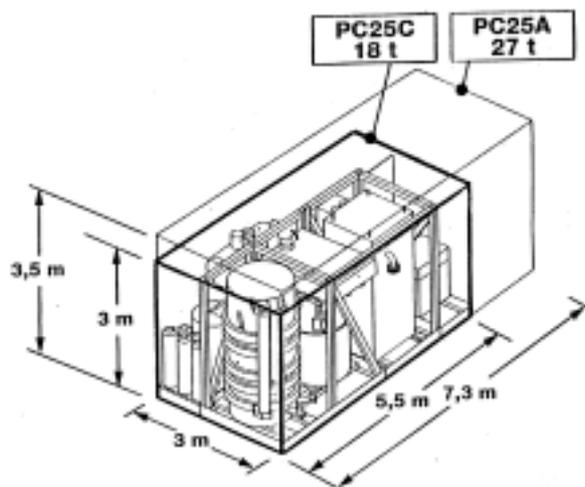


Figura 3. Esquema da construção da instalação ONSI PC25C de 200 kW (elétrico)

Atualmente, a firma IFC constrói e vende instalações de 200 kW para aplicações onde a produção de energia elétrica não pode ser interrompida como hospitais, bancos, empresas de processamento de dados, etc. Para aplicações residenciais estas unidades são, entretanto, ainda muito caras (cerca de US\$ 3.000,00/kW), devendo ter seu preço reduzido pela metade para este fim. A empresa Alstom desenvolve, há 2 anos, uma instalação de 100 kW com células PEM, cuja eficiência é comparável às instalações da empresa IFC.

#### Células cerâmicas SOFC da Siemens-Westinghouse

A Westinghouse, hoje Siemens/Westinghouse, desenvolve, já desde os anos 70, o conceito de SOFC tubular. A célula é montada sobre o manto externo de um tubo poroso suporte, onde é depositada uma camada porosa delgada do catodo de  $\text{La,Sr-MnO}_3$ . Sobre esta camada é formada uma membrana fina de zircônia e é depositada uma camada de uma mistura composta de óxido de níquel e zircônia finamente dispersa, que é reduzida, sob a atmosfera redutora do gás de anodo, na operação, a Cermet de  $\text{Ni/ZrO}_2$ . O anodo e a membrana são interrompidos ao longo de uma faixa longitudinal e substituídos pelo interconector – cromito de lantânio sinterizado não poroso, que se sobrepõe ao catodo neste lugar. Este material é um bom condutor eletrônico, além de ser estável quimicamente tanto sob a atmosfera redutora do anodo como a oxidante do catodo. Ele tem a função da placa bipolar dos conjuntos planos e possibilita a ligação elétrica do catodo de uma célula tubular com o anodo da célula seguinte, através de um filme de níquel deformável plasticamente.

As células tubulares podem ser conectadas paralelamente ou em série pelo contato de níquel. Os tubos possuem um diâmetro de 3 cm e um comprimento de aproximadamente 1 m. Várias unidades de 100 kW estão sendo testadas, com sucesso, pela Siemens/

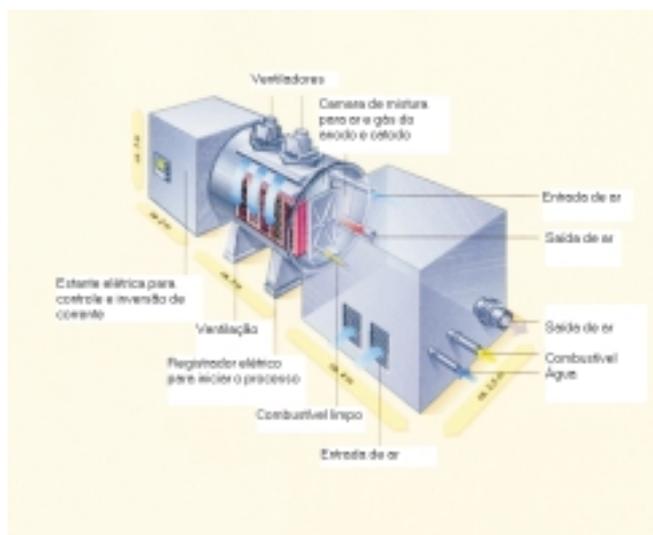
Westinghouse atualmente. Uma instalação deste tipo é mostrada na Figura 4. Estão previstas tanto aplicações para geração de calor, como industriais para estas instalações. Espera-se, num futuro próximo, alcançar uma eficiência total de até 70% com a operação sob pressão e acoplamento a turbina de gases para o aproveitamento do gás do anodo.



**Figura 4.** Instalação de células a combustível Siemens-Westinghouse de 100 kW de potência nominal (fotografia gentilmente cedida pela empresa)

#### Células a carbonatos fundidos MCFC do tipo HOT MODULE

A empresa norte-americana ERC foi, até meados dos anos 90, líder na área de desenvolvimento de células do tipo MCFC. Atualmente, a firma MTU desenvolve esta tecnologia, na Europa, sob licença da ERC. A empresa MTU se concentra em instalações de 300 kW de potência elétrica, caracterizadas por simplicidade do processamento de gases e dos materiais de construção. O assim chamado HOT MODULE, cujo esquema é mostrado na Figura 5, é posicionado verticalmente dentro de um tonel de aço deitado, ao contrário da instalação da ERC. O empilhamento é feito com um mínimo de vedações. A instalação, que conta atualmente com três unidades montadas, inclui o processo de reforma de gases e o inversor. Três instalações já foram construídas e encontram-se em fase de testes. Este módulo deve fornecer uma eficiência elétrica total máxi-



**Figura 5.** Esquema do chamado HOT MODULE da empresa MTU, Friedrichshafen, Alemanha

ma de 50% e pode gerar calor de processo de até 600 °C. O módulo é planejado para aplicações industriais e pode ser utilizado onde for necessária cogeração numa relação 1/1.

#### Células a membrana polimérica trocadora de prótons

Tanto a Ballard canadense, como uma série de firmas norte-americanas e do Japão, oferecem células a combustível do tipo PEMFC ou ainda sistemas de células a combustível deste tipo. A firma italiana De Nora desenvolve células do tipo PEMFC desde o início dos anos 90 e, na Alemanha, uma subsidiária da DaimlerChrysler e Ballard desenvolve PEMFC para veículos automotores e outras aplicações.

No Brasil, a recém criada empresa ELECTROCELL, de São Paulo, SP, desenvolve células e sistemas de células a combustível do tipo PEMFC<sup>5</sup>, direcionada para as características do sistema elétrico brasileiro. A empresa promete instalações na faixa de 25 a 100 kW (elétrico) de potência, para serem conectadas à rede, em regime de despacho de potência constante. O combustível escolhido numa primeira etapa é o hidrogênio. Entretanto a empresa planeja o uso de gás natural com reforma para um futuro próximo. Uma outra empresa brasileira no setor é a UniTech, de Cajobi, SP, que promete para breve unidades de células PEMFC para residências e pequenas indústrias, utilizando gás natural como combustível<sup>5</sup>.

Estes dados mostram que a tecnologia de células a membrana polimérica pode concorrer com as células a ácido fosfórico e já existem várias unidades na fase de comprovação de instalações de até 250 kW (elétrico) (Alstom-Ballard).

#### PEMFC E SOFC PARA APLICAÇÕES RESIDENCIAIS

No início da década de 90 descobriu-se a adequação da tecnologia de células a combustível para aplicações residenciais. A célula do tipo PAFC, entretanto, não tem nenhum papel importante neste aspecto. Muitas empresas têm-se restringido ao desenvolvimento de pequenas instalações de células PEMFC na faixa de 5 a 10 kW (elétrico). As células PEMFC têm sido preferidas devido ao fato de que quase todas as grandes montadoras de veículos automotivos têm seus programas de veículos movidos a PEMFC e conseqüentemente espera-se uma redução significativa dos custos deste tipo de célula. A meta de custo das células para autotração é de aproximadamente US\$ 100/kW (elétrico). Por outro lado, a meta de custo para sistemas residenciais é de US\$ 500/kW (elétrico).

A empresa suíça Sulzer desenvolve, há 10 anos, a instalação chamada HEXIS, com apenas 1 kW, com células cerâmicas do tipo SOFC. Esta empresa espera uma redução nos custos de US\$ 5.000/kW para somente US\$ 500/kW, num futuro próximo. As instalações para residências devem se dimensionadas de modo a poder cobrir cerca de 80% da demanda de eletricidade. Com uma relação calor/eletricidade variando de 1 a 2, estas instalações fornecem mais calor que a demanda de uma residência, dependendo do clima da região considerada. Em regiões tropicais e subtropicais este calor pode ser aproveitado também para a refrigeração. A instalação de células a combustível é equipada com sistema de processamento de gás, podendo ser operadas com gás naturais ou mesmo com metanol. Pode-se citar algumas vantagens para o usuário:

- flexibilidade na escolha do material combustível (várias qualidades de gases, álcool, gás liquefeito, óleo, etc.);
- possibilidade de utilização contínua;
- alto grau de utilização do combustível (mais de 80%, considerando-se a eletricidade e o calor);
- nenhuma restrição para a licença de operação em relação às emissões;
- operação de baixa manutenção;

- possibilidade de controle remoto da operação, por exemplo, pela empresa pública de geração.

### PEMFC de baixa potência para aplicações residenciais

A firma alemã Heingas conduz o desenvolvimento de instalações de células a combustível para residências já há alguns anos. A célula é fabricada pela empresa Dais Analytic Corporations e possui em potência de 3 kW (elétrico) e 8 kW (térmico). Todos os outros componentes periféricos são fornecidos pela empresa alemã Hamburger Gaswerke (HGW). A instalação é mostrada na Figura 6. O conjunto de células a combustível ocupa um espaço relativamente pequeno de toda a instalação.



**Figura 6.** Instalação de células PEMFC da empresa HGW/Heingas de potências nominais de 3 kW (elétrico) e 8 kW (térmico) para aplicações residenciais (fotografia gentilmente cedida pela empresa)

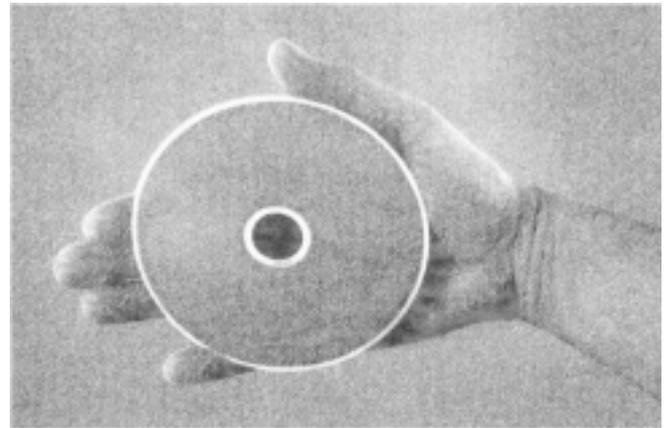
A empresa Vaillant desenvolve instalações de células a combustível para cogeração com potência de 4,6 kW (elétrico) para pequenas empresas como restaurantes, hotéis, etc. A maior parte do volume da instalação consiste no sistema de processamento de gases, ou seja, reformador, conversor, reator catalítico PROX, ventilação e trocador de calor.

A empresa canadense Ballard desenvolveu nos EUA/Canadá uma instalação de células a combustível para residências com uma potência de 7,5 kW (elétrico). Esta empresa promete colocar esta unidade no mercado nos próximos anos.

A baixa temperatura de operação da célula de, atualmente, 80 °C consiste num problema tecnológico de solução complicada, pois os equipamentos de processamento de gás e as células estão ligados termicamente, sendo que os primeiros operam a uma temperatura muito mais elevada que aquela em que ocorre a reação da célula. O gerenciamento de calor da unidade como um todo requer soluções criativas dos diversos fabricantes, a fim de se obter eficiências globais elevadas.

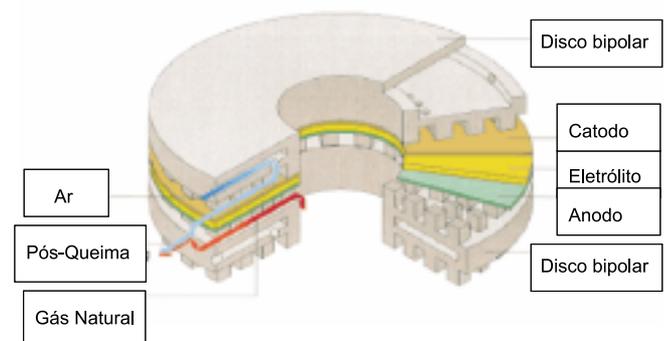
### SOFC de baixa potência Sulzer HEXIS

O conceito Sulzer-HEXIS utiliza células circulares relativamente pequenas, mostradas na Figura 7, formando empilhamento de poucas células unitárias. Esta empresa já vem desenvolvendo este sistema há mais de 8 anos, demonstrando a operação confiável e funcional de pequenas instalações. A empresa Sulzer pretende começar a comercialização já no ano de 2002.



**Figura 7.** Célula unitária do tipo SOFC HEXIS, composta de eletrodos e eletrólito, na forma de disco, da empresa Sulzer

As células circulares unitárias têm um diâmetro de aproximadamente 10 cm. As placas bipolares são feitas de aço inoxidável e funcionam também como trocadores de calor para pré-aquecimento do ar do catodo. A alimentação de ar é feita radialmente de fora para o interior da célula. Na vizinhança da furação central o ar já se encontra aquecido à temperatura de operação, 950 °C, deixando a região do trocador de calor, e entra na região do catodo, fluindo radialmente de dentro para fora. O ar assim alimentado fornece o oxigênio, cerca de 20%, para a redução catódica, saindo desta região com cerca da metade deste valor. Na saída, o ar residual encontra-se com o gás de anodo (combustível) não consumido. Na Figura 8 pode-se observar o esquema do sistema HEXIS.



**Figura 8.** Esquema do sistema HEXIS da empresa Sulzer

O pequeno diâmetro do empilhamento (“stack”) e o conceito escolhido para a alimentação dos gases propiciam uma distribuição de temperatura radial na célula, relativamente constante no raio. Devido à apropriada troca de calor entre o ar frio e o combustível quente, em contra corrente, surge na periferia da célula um gradiente de temperatura linear que, aliado a um bom isolamento térmico, reduz as perdas de calor a um mínimo, tanto por condução como por radiação.

O empilhamento constitui-se de 70 células unitárias sobrepostas, com potenciais individuais de 0,55 V e fornece um potencial de cerca de 39 V e uma corrente elétrica de 27 A, resultando numa potência de cerca de 1 kW (elétrico). O conceito Sulzer não tem como meta sistemas de eficiências extremamente altas, obtendo eficiência elétrica de célula de cerca de 43% e total de cerca de 33%. A faixa de

potência de 1 kW (elétrico) cobre, em média, a demanda elétrica de uma residência e até no máximo 30% das necessidades de calor, considerando-se o clima europeu. O sistema foi testado nos últimos anos por 6 consumidores independentes, atestando alta confiabilidade e desempenho. Na Figura 9 é apresentada uma vista desta instalação.



**Figura 9.** Instalação de 1 kW de potência nominal da empresa suíça Sulzer (fotografia gentilmente cedida pela empresa)

A empresa salienta que a instalação apresenta as seguintes características:

- simples preparação do combustível;
- alta eficiência elétrica;
- bom aproveitamento do calor;
- valores de emissão extremamente baixos, devido à combustão eletroquímica (sem chama) do combustível;
- ausência de componentes móveis, como bombas e ventiladores;
- fácil e confiável operação.

## ESTUDOS ECONÔMICOS PARA UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM RESIDÊNCIAS

Existem relativamente poucos trabalhos detalhados publicados, até aproximadamente meados do ano 2000, a respeito da viabilidade econômica de sistemas de células a combustível para residências. Este artigo refere-se a publicações recentes<sup>2,3,4</sup>, independentes, que, de uma maneira muito interessante, chegam a conclusões semelhantes, discutidas a seguir.

### Dimensionamento da potência para uso residencial

Devido ao custo ainda muito elevado de instalações de células a combustível em relação aos sistemas de aquecimento convencionais (5 a 6 vezes maior, por enquanto), considera-se apenas a demanda de eletricidade no dimensionamento deste novo energético, que, em uma residência de aproximadamente 100 m<sup>2</sup>, tem um consumo médio de 4.500 kWh.

Para um investimento econômico, a instalação de células deve ter uma potência nominal a mais próxima possível da demanda média da residência. Nos intervalos onde a potência nominal é inferior à demanda, deve-se suprir esta diferença da rede de distribuição convencional. O calor gerado pode ser sempre aproveitado para aquecimento de água, para uso diverso, dependendo aqui do clima da região ou país considerado. Para condomínios de apartamentos, o dimensionamento da instalação deve considerar os mesmos critérios acima.

Considerando-se uma demanda de consumo entre 1,8 e 2,0 kW nos horários de pico pode-se avaliar que a potência ótima da instalação de células a combustível, sob o ponto de vista econômico, está entre 1 e 2 kW. Entretanto, este valor ótimo depende do custo da eletricidade extra comprada, bem como do custo da própria instalação de células, levando-se em conta a amortização do capital investido. Para condomínios, determina-se o valor ótimo da potência da instalação proporcionalmente ao número de famílias ou moradores, podendo chegar a até aproximadamente 200 kW.

### Perspectivas econômicas

Pequenas instalações de células a combustível para aplicações residenciais abrirão um novo mercado no ramo de serviços de energia e de fornecimento de gás, se o custo da instalação for suficientemente competitivo. Mesmo a preços um pouco acima dos convencionais, esta tecnologia já pode assegurar um mercado específico e promissor, onde suas características principais (como baixo impacto ambiental e melhor aproveitamento do combustível) passam a ter um papel relevante na escolha final.

Uma outra observação importante leva à outra conclusão sobre um novo mercado de energia. Observa-se que nos períodos do dia de menor consumo nas residências, o excesso de energia produzido nas instalações residenciais pode ser incorporado à rede pública ou privada, dependendo do caso ("peak shaving"). Este fato pode ser lucrativo para o gerenciador da rede, que vê no conjunto de instalações de células a combustível uma grande reserva de energia. Este conjunto de instalações individuais, controladas separadamente, pode ser vista como uma grande usina de energia virtual. Entretanto, esta tecnologia deve apresentar ao público amadurecimento e confiabilidade, sem ultrapassar certos limites de custo de aproximadamente US\$ 2.500,00/kW.

### CONCLUSÕES

Seguramente ainda existe um longo caminho para se alcançar as metas de redução de custos, mas pode-se dizer que, considerando-se a presente fase de desenvolvimento tecnológico/científico, a interação entre Universidades, Institutos de Pesquisa e Empresas, além da participação dos futuros usuários, será decisiva neste desenvolvimento. Não menos importante, será a mudança na estratégia de geração de energia de, atualmente, centralizada para distribuída.

Pode-se também afirmar, devido aos grandes investimentos nessa área e segundo o exposto neste artigo, que, dentro de poucos anos, haverá uma competitividade nos custos para instalações de células a combustível de baixa potência para aplicações residenciais, possivelmente, até antes do carro elétrico movido a célula.

### REFERÊNCIAS

1. Wendt, H.; Götz, M.; Linardi, M.; *Quim. Nova* **2000**, *23*, 4.
2. Kruhl, J.; *Tese de Doutorado*, FB Maschinenbau der Universität Hannover, Hannover, Alemanha, 1999.
3. Hutter, C.; Krammer, T.; Relatório, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Prof. U. Wagner); Munique, Alemanha, 2000.
4. Köhler, D.; Relatório, Forschungsstelle für Energiewirtschaft; Munique, Alemanha 1999.
5. Oliveira, M.; Vasconcelos, Y.; *Revista Pesquisa FAPESP* **2001**, *65*, 58.
6. Goldemberg, J.; *Seminário Internacional USP-Petrobras sobre Biomassa para Produção de Energia*, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
7. <http://www.dodfuelcell.com/helpfulsites.html>, acessada em Julho 2001.
8. <http://www.hfcletter.com>, acessada em Julho 2001.