



# Células a Combustível: Energia Limpa a Partir de Fontes Renováveis

H. Mercedes Villullas, Edson A. Ticianelli e Ernesto R. González

Uma das principais forças motivadoras da pesquisa científica e tecnológica é procurar soluções para os problemas que afetam a sociedade, como, por exemplo, a geração de energia. Este artigo define o que são as células a combustível, discute de forma resumida os princípios que determinam o seu funcionamento e apresenta alguns dos mais recentes progressos nas suas aplicações.

► Célula a combustível, geração de energia, células galvânicas ◀

Recebido em 3/12/01, aceito em 22/4/02

28

A produção de energia elétrica vem se tornando um dos aspectos mais cruciais da sociedade moderna. Quando se fala em energia elétrica, costuma-se pensar nas grandes hidrelétricas, que produzem milhares de megawatts, e nas grandes redes de distribuição de energia. Mas, igualmente importante é a energia elétrica produzida por pequenas pilhas e baterias, que acionam equipamentos portáteis, às vezes muito pequenos, como, por exemplo, os relógios de pulso.

O crescimento da produção de energia elétrica ao longo dos tempos tem auxiliado grandemente o progresso da humanidade, mas também tem criado uma séria preocupação, mais evidente em anos recentes: o prejuízo ao meio ambiente.

Nos próximos anos, uma nova tecnologia de geração limpa de energia elétrica deve ganhar espaço para uso em veículos e estações geradoras de energia em residências, hospitais e pequenas indústrias. É a tecnologia das células a combustível (também conhecidas como pilhas a combustível), dispositivos

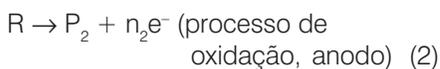
silenciosos que transformam energia química em energia elétrica sem causar danos ao ambiente.

## Conversão eletroquímica de energia

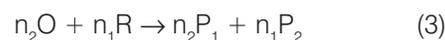
Um sistema eletroquímico prático, na forma mais simples, é constituído por dois eletrodos (condutores eletrônicos) e um eletrólito (condutor iônico) e recebe a denominação de célula unitária (Figura 1). Em um dos eletrodos (anodo) ocorre uma reação de oxidação, enquanto no outro (catodo) ocorre uma reação de redução.

O eletrólito participa no processo global fundamentalmente no transporte da carga elétrica no interior do sistema.

As reações que ocorrem no sistema eletroquímico podem ser escritas, de forma genérica,



e, assim, a reação total resulta



De forma geral, as reações químicas podem ou não ser espontâneas, dependendo da variação de energia de Gibbs ( $\Delta G$ ) associada à reação total de transformação de reagentes em produtos. Os sistemas eletroquímicos

podem ser diferenciados uns dos outros pela forma que funcionam. Quando a reação total de um sistema eletroquímico é espontânea ( $\Delta G < 0$ ), o sistema pode proporcionar trabalho elétrico útil

transformando energia química em energia elétrica, sendo denominado célula galvânica. Em outras palavras, uma célula galvânica é um sistema eletroquímico que pode gerar energia elétrica útil por meio de uma reação química que ocorre espontaneamente no seu interior. O inverso dessa situação ocorre nas células eletrolíticas, onde a energia fornecida por uma fonte externa é utilizada para provocar uma transformação química não espontânea ( $\Delta G > 0$ ). A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as

**Células (ou pilhas) a combustível são dispositivos silenciosos que transformam energia química em energia elétrica sem causar danos ao ambiente**

A seção "Atualidades em Química" procura apresentar assuntos que mostrem como a química é uma ciência viva, seja com relação a novas descobertas, seja no que diz respeito à sempre necessária revisão de conceitos.

## Sistema eletroquímico

Condutor eletrônico	Condutor iônico	Condutor eletrônico
metal	solução eletrolítica	metal
semicondutor	sal fundido	semicondutor
óxido condutor	óxido	óxido condutor
polímero condutor	membrana de intercâmbio	polímero condutor
etc.	etc.	etc.

Figura 1: Representação esquemática da forma mais simples de um sistema eletroquímico prático, constituído por dois eletrodos (condutores eletrônicos) e um eletrólito (condutor iônico).

características das células galvânicas e das eletrolíticas.

As células galvânicas fornecem uma maneira segura e compacta para o armazenamento de energia química, que pode ser liberada como energia elétrica de forma controlada; ou seja, como uma corrente elétrica gerada por uma diferença de potencial. Um grande número de reações eletroquímicas pode ser usado em dispositivos práticos, sendo que a escolha é influenciada pela disponibilidade e custo dos materiais, sua estabilidade, a temperatura de operação, a energia total armazenada por unidade de massa e fatores relativos à segurança. As pilhas e as baterias que permitem o funcionamento de muitos dos aparelhos utilizados no nosso dia-a-dia são células galvânicas e foram objeto de um artigo detalhado nesta revista (Bocchi *et al.*, 2000).

As células a combustível são também dispositivos de conversão de energia química em energia elétrica,

como as pilhas e as baterias. A diferença principal em relação às pilhas e baterias é que, nas células a combustível, os reagentes não estão contidos no interior do sistema, mas sim armazenados externamente. A célula a combustível produz energia elétrica à medida que os reagentes são introduzidos no sistema. O combustível é oxidado de forma contínua no anodo, enquanto oxigênio é reduzido no catodo. Assim, a reação que ocorre na célula a combustível é uma verdadeira reação de combustão. A circulação de elétrons através do circuito externo permite que se complete a reação e produz o trabalho elétrico.

As células a combustível constituem uma nova tecnologia que, após muitos anos de pesquisa e desenvolvimento, está atingindo a fase de comercia-

**A célula a combustível como sistema de conversão de energia foi inventada por sir William Grove no século XIX. Na época, as fontes primárias de energia eram abundantes, irrestritas e baratas; esse fato não motivou o desenvolvimento das células a combustível**

lização.

A célula a combustível como sistema de conversão de energia foi inventada por sir William Grove no século XIX. Na época, as fontes primárias de energia eram abundantes, irrestritas e baratas; portanto, não havia forças motivadoras para um desenvolvimento significativo das células a combustível. Já no começo do século XX, a conversão de energia química em energia elétrica tornou-se mais importante devido ao aumento do uso da eletricidade, mas as aplicações práticas das células a combustível apareceram somente nos últimos quarenta anos. Durante a última década, entretanto, a tendência a uma maior flexibilidade na geração de energia e o crescimento da população mundial contribuíram para o aumento do interesse no desenvolvimento de plantas geradoras de energia de maior potência e descentralizadas.

Mais recentemente, a crescente preocupação em relação ao impacto

negativo no ambiente da utilização de combustíveis fósseis para a geração de eletricidade e para a propulsão de veículos tem sido o principal fator que influencia o desenvolvimento das células a combustível. Essas células são dispositivos de conver-

são de energia limpos e podem ajudar a reduzir as emissões de poluentes na atmosfera.

### Princípios básicos

As células a combustível são células galvânicas nas quais a energia de Gibbs de uma reação química é transformada em energia elétrica (por meio da geração de uma corrente).

Com a tecnologia atual, o único combustível que proporciona correntes de interesse prático é o hidrogênio, apesar de já existirem células que utilizam diretamente metanol como combustível. Mas, neste caso, as correntes obtidas ainda são relativamente baixas.

A estrutura básica de todas as células a combustível é semelhante: a célula unitária consiste em dois eletrodos porosos, cuja composição depende do

Tabela 1: Comparação das células galvânicas e eletrolíticas.

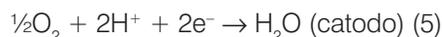
Parâmetro	Célula galvânica	Célula eletrolítica
Transformação	química → elétrica	elétrica → química
Tendência termodinâmica	espontânea	não espontânea
$\Delta G$	<0	>0
Polaridade dos eletrodos		
Anodo	-	+
Catodo	+	-
Tipo de célula	auto-impulsionada	impulsionada

tipo de célula, separados por um eletrólito e conectados por meio de um circuito externo. Os eletrodos são expostos a um fluxo de gás (ou líquido) para suprir os reagentes (o combustível e o oxidante). Um esquema de uma célula a combustível hidrogênio/oxigênio é apresentado na Figura 2. O hidrogênio gasoso (o combustível) penetra através da estrutura porosa do anodo, dissolve-se no eletrólito e reage nos sítios ativos

**As células a combustível são muito mais eficientes na conversão em trabalho da energia liberada na reação de combustão, porque não são dispositivos térmicos**

da superfície do eletrodo, liberando elétrons e formando prótons ( $H^+$ ). Os elétrons liberados na oxidação do hidrogênio chegam ao catodo por meio do circuito externo e ali participam da reação de redução do oxigênio. Os prótons formados no anodo são transportados ao catodo, onde reagem formando o produto da reação global da célula a combustível: água.

Em outras palavras, nessa célula a combustível a reação que ocorre no anodo é a oxidação de hidrogênio e a reação que ocorre no catodo é a redução de oxigênio, usualmente do ar. Em meio ácido as reações são:



Conseqüentemente, a reação global da célula a combustível é:



A variação de energia de Gibbs

( $\Delta G^0$ ) de uma reação redox relaciona-se com a diferença de potencial da célula ( $\Delta E^0$ ):

$$\Delta G^0 = -nF\Delta E^0 \quad (7)$$

sendo  $n$  o número de elétrons envolvidos na reação,  $F$  a constante de Faraday e  $\Delta E^0$  o potencial termodinâmico de equilíbrio (na ausência de fluxo de corrente; para reagentes e produtos em seus estados-padrão).

Para a reação global dada pela equação (6) a  $25^\circ C$ ,  $\Delta G^0 = -237 \text{ kJ/mol}$ . Portanto, o potencial termodinâmico de equilíbrio da célula a combustível (para reagentes e produtos em seus estados-padrão) é

$$\Delta E^0 = -\frac{\Delta G^0}{nF} = 1,23 \text{ V} \quad (8)$$

valor que corresponde à diferença dos potenciais de equilíbrio do catodo ( $E^0_C$ ) e do anodo ( $E^0_A$ ):

$$\Delta E^0 = E^0_C - E^0_A \quad (9)$$

A voltagem da célula a combustível corresponde à diferença de potencial dos eletrodos (catodo e anodo). Essa voltagem, em condições de circuito aberto, é igual ao valor do potencial termodinâmico de equilíbrio. Quando circula uma corrente, o sistema realiza trabalho elétrico e a voltagem da célula a combustível desvia-se do potencial de equilíbrio. Esse desvio em relação ao valor de equilíbrio é denominado so-

brepotencial. Uma das causas do aparecimento do sobrepotencial é a velocidade finita das reações eletroquímicas que ocorrem nos eletrodos; em outras palavras, as reações eletroquímicas levam um certo tempo para ocorrer, não são instantâneas. Em meio ácido, a contribuição ao sobrepotencial associada à cinética das reações é mais importante no catodo, devido à cinética muito lenta da reação de redução de oxigênio. Desvios adicionais são produzidos pela resistência interna do sistema (principalmente devida à resistência do eletrólito, dos eletrodos e dos contatos elétricos) e pela velocidade finita do transporte das espécies reagentes (combustível e oxidante) no interior da célula.

À medida que os potenciais dos eletrodos são afetados pela velocidade finita das reações, pelos componentes resistivos do sistema e pela velocidade finita do transporte de massa, a voltagem da célula a combustível desvia-se do valor ideal e diminui com o aumento da corrente. As variações de voltagem com a corrente são mostradas em forma esquemática na Figura 3.

### Eficiência

Na geração termoelétrica, um combustível é simplesmente queimado para produzir calor, que é usado para gerar o vapor que movimenta as turbinas que acionam os geradores elétricos. A eficiência global da conversão de energia química em trabalho foi melhorada até alcançar valores próximos a 35%, mas não se esperam melhoras significativas nesse processo. A percentagem de eficiência teórica das turbinas a vapor e de dispositivos simi-

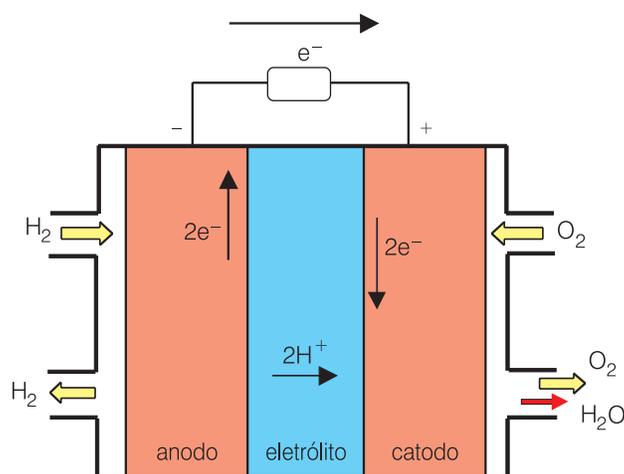


Figura 2: Esquema de uma célula a combustível hidrogênio/oxigênio.

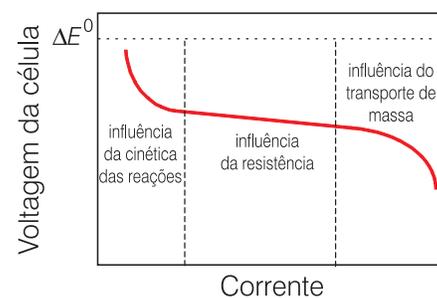


Figura 3: Representação esquemática das variações de voltagem com a corrente de uma célula a combustível.

lares é intrinsecamente limitada pela natureza do processo e pode ser calculada pela expressão

$$\varepsilon(\%) \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\% \quad (10)$$

onde  $T_1$  é a temperatura (em kelvins) do vapor que entra na turbina e  $T_2$  a temperatura do vapor que sai da turbina. Na prática,  $T_1$  e  $T_2$  são aproximadamente 800 K e 400 K, respectivamente. Portanto, a eficiência teórica máxima esperada é próxima a 50%. Efeitos no transporte de calor e atritos mecânicos resultam em um valor de eficiência prática muito menor.

Em contraste, as células a combustível são muito mais eficientes na conversão em trabalho da energia liberada na reação de combustão, porque não são dispositivos térmicos. A energia total liberada em uma reação química e o trabalho útil máximo que pode ser obtido relacionam-se à variação da entalpia ( $\Delta H$ ) e à variação de energia de Gibbs da reação ( $\Delta G$ ), respectivamente:

$\Delta H$  = energia total liberada

$\Delta G$  = trabalho útil máximo

Portanto, a fração da energia química dos reagentes que é transformada em energia elétrica está dada pela relação

$$\varepsilon = \frac{\text{energia disponível para realizar trabalho}}{\text{energia total liberada}} \quad (11)$$

Ou seja, a eficiência termodinâmica de conversão eletroquímica é

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (12)$$

Para a célula a combustível  $H_2/O_2$  tomada como exemplo a 25 °C, e considerando a formação de água líquida,  $\Delta H^0 = -286$  kJ/mol, o que resulta em:

$$\begin{aligned} \varepsilon_T(\%) &= \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} 100\% = \\ &= \left( \frac{-237 \text{ kJ/mol}}{-286 \text{ kJ/mol}} \right) 100\% = 83\% \end{aligned}$$

Nas situações práticas, quando circula corrente, a voltagem da célula a combustível é menor que o potencial de equilíbrio termodinâmico (1,23 V), resultando, portanto, em eficiências

menores que as teóricas. Em condições práticas de operação, a voltagem da célula a combustível se aproxima de 0,7 V, o que se traduz em uma eficiência prática ao redor de 50%.

Embora a alta eficiência das células a combustível seja uma vantagem marcante em relação a outras formas de transformar energia química em energia elétrica, é importante salientar outros aspectos positivos das células a combustível. O resultado do funcionamento da célula é a geração de eletricidade, água como produto e calor gerado pela dissipação do sistema.

Em muitos sistemas, o calor gerado também pode ser aproveitado (a utilização simultânea da eletricidade e do calor produzidos pela célula se denomina co-geração). Ou seja, as células a combustível são dispositivos geradores de energia eficientes e essencialmente não poluentes. Portanto, podem ser instaladas sem prejuízo ambiental em regiões com alta densidade populacional, evitando-se o alto custo de instalação de redes de transmissão em longas distâncias. Além disso, as células a combustível utilizam poucas partes móveis e, conseqüentemente, produzem também menor poluição sonora.

### Tipos de células

A classificação das células a combustível é feita, de forma geral, em função do eletrólito que utilizam, mas elas também podem ser classificadas segundo a temperatura de operação.

Nas denominadas *células a combustível de ácido fosfórico*, também conhecidas como PAFC (do inglês - phosphoric acid fuel cell), o eletrólito é ácido fosfórico concentrado (90-100% m/m). Essas células operam a temperaturas entre 160 °C e 220 °C. Comparadas com outros tipos de células, as células a combustível de ácido fosfórico são as que se encontram em estado mais avançado de desenvolvimento. Por outra parte, nas *células a combustível alcalinas*, ou AFC (alkaline fuel cell), utiliza-se como eletrólito uma solução concentrada de KOH (30-50%

m/m). Essa célula opera a temperaturas próximas a 80 °C. No estado atual de desenvolvimento, as células a combustível alcalinas são as que apresentam os melhores desempenhos. Porém, são afetadas pela contaminação com  $CO_2$  atmosférico, que reage com o eletrólito formando carbonato.

Como se mostra na Figura 1, o eletrólito em um sistema eletroquímico nem sempre é uma solução eletrolítica, podendo também ser uma membrana condutora iônica. Esse é o caso das denominadas *células a combustível de eletrólito polimérico sólido*, ou

**A alta eficiência das células a combustível é uma vantagem marcante em relação a outras formas de transformar energia química em energia elétrica**

PEFC (polymer electrolyte fuel cell), nas quais o eletrólito é uma membrana polimérica, como por exemplo Nafion® (desenvolvida pela E.I. DuPont). A membrana de Nafion® é um polímero fluorado que contém grupos sulfônicos fixados na cadeia polimérica. É quimicamente inerte em meios oxidantes ou redutores, e a alta condutividade que apresenta está associada ao transporte de prótons. As PEFC geralmente operam a temperaturas entre 85 °C e 105 °C.

Os três tipos de célula a combustível descritos pertencem ao grupo das células de baixa temperatura. Outras células operam a temperaturas elevadas. Nas denominadas *células a combustível de óxido sólido*, ou SOFC (solid oxide fuel cell), o eletrólito é um óxido condutor de íons. O material utilizado usualmente é zircônia ( $ZrO_2$ ), ou um óxido misto contendo 90% de  $ZrO_2$  e 10% de  $Y_2O_3$  (ítria). O portador de carga no eletrólito é o íon  $O^{2-}$ . As SOFC operam a temperaturas da ordem de 800 °C a 1.000 °C.

Um outro tipo de célula que opera a altas temperaturas é a chamada *célula a combustível de carbonatos fundidos*, ou MCFC (molten carbonate fuel cell), que opera entre 600 °C e 800 °C. O eletrólito é uma mistura de carbonatos de sódio, de lítio e potássio.

Embora o principal combustível seja o hidrogênio, os problemas relativos aos seus armazenamento e distribuição têm levado à procura de combustíveis alternativos que facilitem a

utilização nas células. Vários combustíveis podem, em princípio, ser oxidados no anodo, mas o metanol é atualmente a opção mais atrativa, porque pode ser produzido a partir de gás natural ou de recursos renováveis, como a biomassa, e porque se considera que é possível adaptar a infra-estrutura existente para os combustíveis derivados do petróleo para armazenar e distribuir o metanol. A denominada *célula a combustível de metanol direto*, ou DMFC (direct methanol fuel cell), constitui uma exceção à classificação das células baseada no eletrólito que utilizam. Nesse caso, a denominação da célula deve-se ao fato de que o combustível utilizado é metanol, que é introduzido diretamente no anodo. A Figura 4 apresenta um esquema de uma célula a combustível de metanol direto. As células a combustível de metanol direto são células baseadas na tecnologia das PEFC, ou seja, o eletrólito que usam é uma membrana, e operam a temperaturas baixas, entre 60 °C e 120 °C.

A Tabela 2 resume as características dos diferentes tipos de células a combustível.

A natureza dos materiais que constituem os eletrodos das células a combustível é um detalhe importante, porque é na superfície dos eletrodos que as reações eletroquímicas ocorrem. Portanto esses materiais devem apresentar uma alta atividade eletrocatalítica, ou seja, devem favorecer a cinética das reações eletroquímicas parciais. Também é necessário que sejam estáveis nas condições práticas de operação.

**Embora o principal combustível seja o hidrogênio, os problemas relativos aos seus armazenamento e distribuição têm levado à procura de combustíveis alternativos que facilitem a utilização nas células**

Os materiais utilizados dependem do tipo de célula. Na atualidade, as células a combustível que operam a baixas temperaturas geralmente utilizam anodos e catodos nos quais o material ativo é Pt na forma de nanopartículas ancoradas sobre carbono. As células a combustível de óxidos sólidos usam atualmente anodos de NiO e catodos de LaSrMnO<sub>3</sub>, enquanto

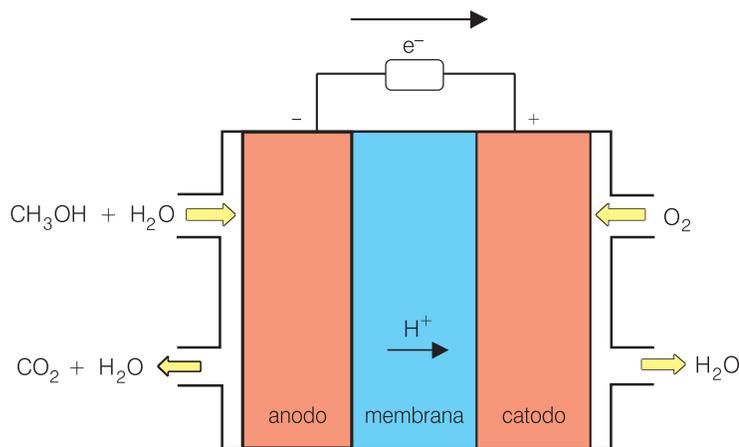


Figura 4: Esquema de uma célula a combustível de metanol direto.

que nas células a combustível de carbonatos fundidos utilizam-se ligas de Ni (Ni-Al ou Ni-Cr) como anodos e NiO como catodo.

### Geradores e combustíveis

Um conjunto de várias células unitárias apropriadamente conectadas em série constitui um gerador. Há diferentes tipos de geradores, que podem ser classificados em sistemas diretos, indiretos ou regenerativos. Nos sistemas diretos, o combustível é introduzido na célula na mesma forma em que é armazenado, por exemplo hidrogênio gasoso ou metanol líquido, e o produto de reação é descartado. Nos sistemas indiretos, um combustível como gás natural, etano, propano, metanol etc. é transformado em hidrogênio antes de ser introduzido na célula (Figura 5). Essa transformação é usualmente realizada por meio de um processo denominado reforma a vapor, no qual o combustível reage com vapor de água sobre um catalisador formando H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

Os sistemas regenerativos são semelhantes aos sistemas diretos que utilizam hidrogênio, mas o produto da reação da célula a combustível (água) é reconvertido em hidrogênio (por métodos térmicos, fotoquímicos ou por eletrólise) para ser reutilizado na célula. Os sistemas diretos são os mais convenientes porque não envolvem sistemas auxiliares para o processamento do combustível, que produzem uma diminuição da eficiência final do processo. Entretanto, nos sistemas indiretos, o calor gerado pela própria célula pode

Tabela 2: Características dos diferentes tipos de células a combustível.

Tipo de célula	Eletrólito e espécie que transporta a carga	Temperatura de operação / °C	Reações
Ácido fosfórico (PAFC)	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (90-100%) (H <sup>+</sup> )	160-220	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> 1/2O <sub>2</sub> + 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O
Alcalina (AFC)	KOH (30-50%) (OH <sup>-</sup> )	< 100	H <sub>2</sub> + 2OH <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> 1/2O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> → 2OH <sup>-</sup>
Eletrólito polimérico (PEFC)	membrana de Nafion® (H <sup>+</sup> )	60-120	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> 1/2O <sub>2</sub> + 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O
Metanol direto (DMFC)	membrana de Nafion® (H <sup>+</sup> )	60-120	CH <sub>3</sub> OH + H <sub>2</sub> O → CO <sub>2</sub> + 6H <sup>+</sup> + 6e <sup>-</sup> 3/2O <sub>2</sub> + 6H <sup>+</sup> + 6e <sup>-</sup> → 3H <sub>2</sub> O
Óxido sólido (SOFC)	ZrO <sub>2</sub> (O <sup>2-</sup> )	800-1000	H <sub>2</sub> + O <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> 1/2O <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> → O <sup>2-</sup>
Carbonato fundido (MCFC)	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	600-800	H <sub>2</sub> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> 1/2O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> → CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>

### Quadro 1: O projeto brasileiro de ônibus com células a combustível

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é um dos centros urbanos mais poluídos do mundo, devido à densidade de veículos que ali transitam. São 25 mil ônibus movidos a diesel, o mais nocivo dos combustíveis fósseis usados em veículos. Assim, a RMSP é o cenário ideal para testar novas tecnologias de veículos não poluentes. Esse aspecto tem sido reconhecido em outros países e, atualmente, existem demonstrações de ônibus urbanos com células a combustível rodando nas ruas de Chicago (Estados Unidos), Vancouver (Canadá) e Stuttgart (Alemanha). Diversas razões têm levado à preferência por ônibus para projetos de demonstração: i) os ônibus têm um percurso fixo e conhecido, ii) todos os ônibus desse tipo podem ser abastecidos e revisados na mesma garagem, iii) a divulgação do projeto e seus benefícios ao público é mais direta etc.

No Brasil, formou-se um consórcio, integrado pelo Ministério das Minas e Energia (MME), pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU) e pela Universidade de São Paulo (USP), para implantar um programa de demonstração de ônibus com células a com-

combustível na RMSP. O projeto é financiado pelo GEF (Global Environmental Facility), divisão do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), e pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). A coordenação está a cargo da EMTU. Os objetivos do projeto são:

- demonstrar a viabilidade de utilizar ônibus com células a combustível no trânsito urbano;
- contribuir para a redução do custo dos ônibus com células a combustível por meio da produção massiva;
- implantar um programa de demonstração que poderá ser exportado para outros locais no mundo que sofrem severos problemas de poluição urbana (Cidade do México, Tóquio etc.).

O Programa está dividido em quatro fases:

1. estudo de viabilidade e oportunidade;
2. compra e implantação de 8 ônibus com células a combustível em corredor urbano da RMSP;
3. extensão do programa de demonstração a 200 ônibus;
4. implantação de ônibus urbanos com células a combustível em grande escala.

A primeira fase (estudo de viabilidade e oportunidade) já foi concluída. Em grandes linhas, envolveu (i) um estudo muito detalhado do estado da

arte em células a combustível para veículos, (ii) uma avaliação dos resultados práticos obtidos com esses ônibus, (iii) um estudo das fontes e dos métodos de produção, armazenamento e transporte do hidrogênio que será usado como combustível e (iv) um estudo da penetração dos ônibus com células a combustível na matriz de transporte urbano na RMSP.

A segunda fase está prestes a ser iniciada e envolve a implantação de oito ônibus com células a combustível no trânsito urbano da RMSP. Por tratar-se de um projeto de demonstração, não haverá desenvolvimento. Os ônibus serão comprados, por meio de licitação internacional, de fornecedores que cumpram as exigências do programa. Considerando que os ônibus existentes podem ser considerados ainda protótipos, a implantação dos oito ônibus será gradativa, em um período de 2-3 anos. O projeto poderá significar para o Brasil uma solução a médio prazo para os sérios problemas de poluição urbana em locais como a RMSP. Mais interessante ainda é o fato de que o Brasil conta com todas as condições para estabelecer a médio-longo prazo uma capacitação para fabricar ônibus com células a combustível, o que poderá transformar o país em um líder mundial no setor.

ser aproveitado no processamento do combustível.

### Aplicações

Embora a célula a combustível como dispositivo de conversão de energia química em energia elétrica tenha sido inventada no século XIX, as aplicações práticas surgiram somente nos últimos quarenta anos. As células a combustível foram utilizadas com sucesso no programa espacial norte-americano nos projetos Gemini, Apollo e ônibus espacial. Nos veículos espaciais, as células utilizam hidrogênio puro como combustível. As primeiras células a combustível utilizadas no programa espacial eram células de eletrólito polimérico. Um gerador com uma potência de 1 kW foi utilizado no projeto

Gemini como fonte auxiliar de energia e para a produção de água para consumo dos astronautas. As membranas poliméricas utilizadas na época não eram suficientemente estáveis (a membrana de Nafion® ainda não tinha sido desenvolvida) e, por essa razão, a

NASA passou a utilizar células a combustível alcalinas nos projetos seguintes. A partir de 1973, como consequência da crise do petróleo, surgiu um grande interesse no desenvolvimento de células a combustível para aplicações terrestres, e esse interesse tem

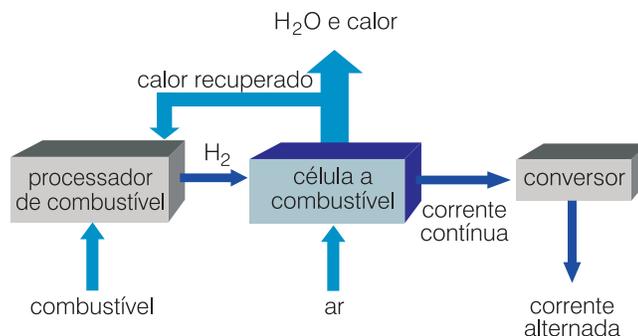


Figura 5: Esquema de um sistema gerador indireto.

crescido muito com o aumento da consciência em relação à proteção ambiental. Atualmente, as células a combustível estão começando a ser utilizadas em aplicações estacionárias e para a propulsão de veículos.

As células a combustível são aptas para aplicações estacionárias devido à elevada eficiência e à possibilidade de geração de energia em locais remotos, onde podem ser utilizados combustíveis renováveis gerados localmente, como, por exemplo, o etanol.

Tanto as células que operam a baixas temperaturas quanto as que operam a temperaturas altas podem ser utilizadas em aplicações estacionárias. Uma dessas aplicações são os sistemas pequenos e distribuídos de geração de energia. Por exemplo, células a combustível de eletrólito polimérico, de ácido fosfórico ou de óxido sólido, combinadas com um sistema adequado para o aproveitamento do calor, podem proporcionar toda a energia necessária para uma residência. O calor gerado pela célula pode ser utilizado para aquecer a própria residência em zonas de temperaturas baixas e para o fornecimento de água quente. As células a combustível já são produtos comerciais para aplicações estacionárias, em particular as PAFC.

Os sistemas para propulsão de veículos devem ser diferentes dos usados em aplicações estacionárias, porque devem ser compatíveis com as restrições de espaço no veículo e com a necessidade de tempos de resposta curtos. O desenvolvimento desses sistemas tem se acelerado muito nos últimos anos. Protótipos de automóveis que funcionam com células a combustível de eletrólito polimérico e hidrogênio têm sido demonstrados recentemente por várias empresas fabricantes

**As células a combustível têm vantagens em comparação com outros dispositivos de geração de energia porque são mais eficientes e porque os produtos gerados pelo funcionamento das células que operam com hidrogênio são água e calor, ou seja, são dispositivos essencialmente não contaminantes**

na Europa, no Japão e nos Estados Unidos. As células a combustível de eletrólito polimérico são consideradas as mais adequadas para aplicações em veículos porque apresentam alta

densidade de potência, elevada eficiência na conversão de energia, são compactas e leves e operam a baixa temperatura. Entretanto, em termos de uma possível infra-estrutura para a distribuição do combustível, os fabricantes de veículos consideram que os combustíveis líquidos são uma melhor opção para viabilizar a comer-

cialização de automóveis elétricos a curto prazo. O combustível considerado por muitos fabricantes é o metanol, que poderia ser reformado a hidrogênio a bordo do próprio veículo ou utilizado diretamente. Embora o estado atual de desenvolvimento das células a combustível de metanol direto para aplicações em transporte não esteja tão avançado como no caso das células a combustível de eletrólito polimérico que operam com hidrogênio, os progressos recentes em relação à densidade de potência e ao tamanho indicam que as células a combustível de metanol direto podem ser uma tecnologia competitiva em veículos.

As pesquisas e o desenvolvimento tecnológico atuais na área das células a combustível também incluem o desenvolvimento de células pequenas que possam, no futuro, ser utilizadas em aplicações portáteis.

### Considerações finais

As células a combustível são sistemas de conversão de energia química em energia elétrica que podem contribuir de maneira muito significativa com a geração de energia. As células a combustível têm vantagens em comparação com outros dispositivos de geração de energia porque são mais

eficientes e porque os produtos gerados pelo funcionamento das células que operam com hidrogênio são água e calor, ou seja, são dispositivos essencialmente não contaminantes. Além disso, proporcionam flexibilidade e diversas opções para inúmeras aplicações estacionárias, para a propulsão de veículos e para aplicações portáteis.

Em todos os casos, deve-se lembrar que um sistema gerador de energia é mais do que um simples conjunto de células a combustível. Para cada aplicação específica, é necessário considerar diversos aspectos relacionados com a segurança e o conforto do usuário, a potência adequada, tempo de resposta, tamanho etc.

**H. Mercedes Villulas**, ex-docente da Universidade de Córdoba, Argentina, é atualmente pesquisadora no Departamento de Química da UFSCar. **Edson A. Ticianelli** é professor livre-docente do Departamento de Físico-Química do Instituto de Química de São Carlos – USP. **Ernesto R. Gonzalez** (ernesto@iqsc.sc.usp.br), é professor titular do Departamento de Físico-Química do Instituto de Química de São Carlos – USP.

### Referência bibliográfica

BOCCHI, N.; FERRACIN, L.C. e BIAGGIO, S.R. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. *Química Nova na Escola*, n. 11, p. 3-9, 2000.

### Para saber mais

L. CARRETTE; K.A. FIEDRICH e U. STIMMING. Fuel cells - Fundamentals and applications. *Fuel cells*, v. 1, n. 1, p. 5, 2001.

J. LARMINIE e A. DICKS. *Fuel cell systems explained*. Nova Iorque: Wiley, 2000.

K. KORDESCH e G. SIMADER. *Fuel cells and their applications*. Wiley-VCH, 1996.

### Na Internet

- <http://h2fuelcell.org>
- <http://www.h2guide.de>
- <http://www.fuelcellpark.com>
- <http://www.ballard.com>
- <http://www.enr.com>
- <http://www.HyWeb.de>

**Abstract:** *Fuel Cells: Clean Energy from Renewable Sources* – One of the main forces motivating scientific and technological research is the search for solutions for the problems that affect society, as for example energy generation. This paper defines what are fuel cells, discusses in a brief form the principles that determine their functioning and presents some of the most recent developments in their applications.

**Keywords:** fuel cells, energy generation, galvanic cells