

Uma Visão da Tecnologia de Células a Combustível

Reinaldo A. Vargas¹, Rubens Chiba¹, Egberto G. Franco^{1,2}, Emília S. M. Seo¹

¹Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM)
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)
Av. Prof. Lineu Prestes, 2.242, Cidade Universitária (USP)
CEP: 05508-000 - São Paulo - SP - Brasil

²Departamento de Administração
Faculdade Alfacastelo
Rodovia Castelo Branco, Km 26,5 - Saída 26 B - Barueri
CEP: 06407-000 - São Paulo - SP - Brasil

ravargas@ipen.br, rchiba@ipen.br, egfranco@ipen.br, esmiyseo@ipen.br

Resumo. *Nos últimos anos, um novo conceito tecnológico de geração de energia de uma forma mais limpa, confiável e segura surgiu. O termo “Célula a Combustível” também conhecido no Brasil como “Pilha a Combustível”, começou a ser pronunciado com maior frequência, embora esta tecnologia ainda não esteja bem estabelecida comercialmente. Para os iniciantes no assunto, estas células servem para produzir eletricidade de uma forma mais ecológica, praticamente sem emissão de qualquer substância nociva ao meio ambiente. Entretanto, o conceito de Célula a Combustível é bem mais amplo. O objetivo deste artigo é transmitir de uma forma clara e concisa, os conceitos básicos sobre as Células a Combustível, seus principais combustíveis, aplicações, benefícios, a sua importância no cenário de energias alternativas e um panorama da tecnologia no Brasil.*

Abstract. *In the last years, a new technological concept of generation of energy of a cleaner, trustworthy form and insurance appeared. The term "Fuel Cell " more frequently started to be sharp, this technology still well is even so not established commercially. For the beginning ones in the subject, these cells serve to produce electricity of a more ecological form, practically without emission of any harmful substance to the environment. However, the concept of Fuel Cell is well ampler. The objective of this article is to transmit of a clear and concise form, the basic concepts on the Fuel Cells, its main fuels, applications, benefits, its importance in the scene of alternative energies and a vision of the technology in Brazil.*

1. Breve Histórico [1,2]

As Células a Combustíveis: CaC's (*Fuel Cells: FC's*) são conhecidas pela ciência há mais ou menos 150 anos. Embora tenha sido considerada uma grande curiosidade do século XIX, elas foram alvos de intensas pesquisas principalmente durante a Segunda Guerra Mundial.

Por volta de 1800, os cientistas britânicos William Nicholson e Anthony Carlisle descreveram o processo de usar a eletricidade para decompor a água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) em um processo conhecido como “Eletrólise da Água”. A primeira suposta CaC foi construída em 1801 por Humphrey Davy, que realizou estudos em eletroquímica usando carbono (C) e ácido nítrico (HNO_3). Entretanto os estudos com CaC's, se iniciaram realmente com o advogado e cientista inglês Sr. William Robert Grove em 1839. Ele teve uma idéia durante os seus experimentos com a eletrólise da água imaginando de que forma seria o processo inverso desta reação, ou seja, reagir hidrogênio com oxigênio, formando água e gerando eletricidade. O termo “Célula a Combustível” foi empregado pela primeira vez por Ludwig Mond e Charles Langer em 1889.

O cientista e fundador do campo da físico-química, Friedrich Wilhelm Ostwald, contribuiu com muitas das teorias sobre as CaC's. Em 1893, ele determinou experimentalmente as funções dos vários componentes de uma CaC: eletrodos (catodo e anodo), eletrólito, entre outros.

Na primeira metade do século XX, o cientista suíço Emil Baur, juntamente com seus estudantes, conduziu uma grande quantidade de pesquisas com vários tipos de tecnologias de CaC's. No final dos anos 30, Francis Thomas Bacon começou pesquisando CaC's de eletrólito alcalino de alta pressão, que parecia oferecer resultados viáveis. Durante a Segunda Guerra Mundial, Bacon trabalhou no desenvolvimento de CaC's que poderiam ser usadas nos submarinos da Marinha Inglesa.

Embora fossem extremamente caras, as CaC's de Francis Bacon provaram ser suficientemente confiáveis para atrair a atenção da Pratt & Whitney. Esta empresa se uniu com a Energy Conversion, que tinha Francis Bacon como consultor e licenciou o trabalho dele para ser utilizado no desenvolvimento de um sistema de geração de energia para as missões espaciais *Gemini* e *Apollo* da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Após essas missões, a construção de novas CaC's alcalinas operando com altas pressões, foi paralisada e tornou claro, levando em conta esse tipo de célula, que sua comercialização tinha como principais obstáculos o alto custo e a pequena vida útil.

É interessante perceber que os estudos sobre CaC's são antigos, porém, com a descoberta do petróleo, o mundo científico paralisou os estudos dessa tecnologia. Entretanto, com os atuais problemas ambientais que estamos sofrendo e com novas políticas de preservação ambiental como o “Protocolo de Kyoto”, a comunidade acadêmica, empresas automobilísticas e outras, reativaram as pesquisas com CaC's.

Atualmente, as CaC's apresentam uma evolução em durabilidade, diminuição dos custos e são uma das principais soluções energéticas ambientalmente amigáveis. É só uma questão de tempo para que as CaC's estejam fazendo parte da vida das pessoas como ocorreu anteriormente com os computadores pessoais.

2. O que é Célula a Combustível? [1-4,7]

A CaC é conceituada como sendo um dispositivo eletroquímico que converte diretamente a energia química fornecida por um combustível e por um oxidante em energia elétrica e vapor de água. Este vapor de água pode nos fornecer energia térmica (calor) para diversas finalidades, inclusive para gerar mais energia elétrica através da cogeração. A estrutura básica de uma CaC consiste de uma camada de eletrólito em contato com um anodo e um

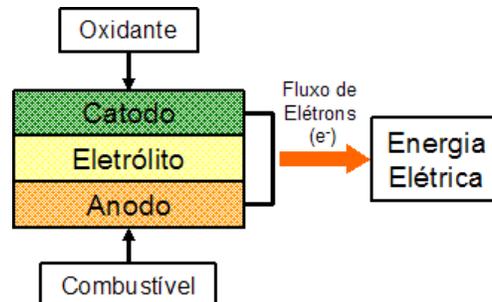
catodo, um de cada lado e ambos porosos. Em uma CaC típica, o anodo (eletrodo negativo) é alimentado continuamente com um gás combustível, enquanto o catodo (eletrodo positivo) recebe um oxidante que é geralmente o oxigênio do ar. A reação eletroquímica que ocorre nos eletrodos produz uma corrente elétrica.

As CaC's, de uma forma geral, não possuem aplicações práticas utilizando somente células unitárias, elas devem ser conectadas em série para produzir voltagens adequadas para aplicações comerciais. Uma série de CaC's recebe a denominação de *stack*, ou empilhamento. Um componente comumente chamado de interconector ou separador bipolar conecta o anodo de uma célula ao catodo da célula seguinte dentro do *stack*. Os *stacks* de CaC's podem ser configurados em série, paralelo, em série e paralelo juntos, ou em unidades simples, dependendo da aplicação a que serão solicitados. Uma vantagem do uso das CaC's está em sua alta eficiência e na ausência de emissão de poluentes quando se utiliza o hidrogênio em seu estado puro. É também uma forma de geração de energia silenciosa e extremamente confiável.

3. Principais Componentes [1,2]

Cada unidade de uma CaC, como mostra a Figura 1 é constituída com três componentes básicos: o eletrólito, o eletrodo catódico (catodo) e o eletrodo anódico (anodo).

Figura 1. Principais componentes de uma CaC unitária e genérica [R.A. Vargas].



Os componentes presentes nas diferentes tecnologias de CaC's são fabricados com diversos materiais (cerâmicos, metálicos, poliméricos e compostos), cada um, de acordo com as suas principais funções.

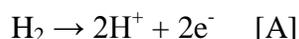
4. Princípio de Funcionamento [1-4]

As diferentes tecnologias de CaC's têm basicamente o mesmo princípio de funcionamento. São compostas por dois eletrodos porosos: o anodo (terminal negativo) e o catodo (terminal positivo), cada um revestido num dos lados por uma camada de catalisador a base de platina ou níquel, e separados por um eletrólito (material impermeável que permite movimento aos íons positivos ou negativos entre os eletrodos).

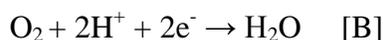
Uma fina camada de catalisador recobre o eletrólito. O catalisador é um metal, normalmente a base de platina ou níquel, que acelera as reações químicas entre o oxigênio e o hidrogênio. Algumas células utilizam eletrólitos líquidos e outras utilizam eletrólitos

sólidos, como as membranas poliméricas trocadora de prótons para conduzirem cargas positivas. Somente os prótons atravessam o eletrólito, os elétrons não. O ânodo tem canais de fluxo que distribuem o gás hidrogênio sobre a superfície do catalisador, e remove a água produzida durante a reação.

Dentro da CaC, o gás hidrogênio (H₂) pressurizado é bombeado para o terminal negativo, o anodo. O gás é forçado a atravessar o catalisador. Quando a molécula de hidrogênio entra em contato com o catalisador, ela se separa em dois íons de hidrogênio (H⁺) e dois elétrons (e⁻) [A]. Os elétrons são conduzidos através do anodo, contornando o eletrólito até atingirem o circuito externo, onde acendem uma lâmpada ou acionam um motor elétrico, por exemplo, e retornam para o terminal positivo, o catodo.



O oxigênio (O₂), extraído do ar, entra na CaC pelo terminal positivo, o catodo. O gás é forçado a se dispersar no catalisador. O catalisador separa a molécula de oxigênio em dois átomos de oxigênio. Cada átomo de oxigênio atrai dois íons H⁺ através do eletrólito. Estes dois íons H⁺ combinam com o átomo de oxigênio e dois elétrons provenientes do circuito externo, para formar a molécula de água [B]. Nesta reação, uma certa quantidade de calor é liberada.



Na maioria das CaC's, o anodo é alimentado com hidrogênio (combustível), onde ocorre a ionização deste, por reação catalítica na platina, convertendo o hidrogênio (H₂) em prótons (H⁺) e elétrons (H⁻). O catodo é alimentado pelo oxigênio (oxidante) retirado do ar. Os elétrons circulam por um circuito externo gerando uma corrente elétrica no sentido do catodo, o terminal positivo. Os prótons atravessam o eletrólito, que pode ser líquido ou sólido, no sentido do catodo também. No catodo, o elétron e o próton reagem com o oxigênio, retirado do ar, formando moléculas de água e liberando calor devido à reação exotérmica. Tem-se então o vapor de água. O vapor quente pode ser utilizado para aquecimento, ou ser integrado a uma turbina ou micro-turbina a vapor para gerar mais eletricidade (cogeração). Pode também ser utilizado para gerar H₂ novamente através da eletrólise (quebra da molécula de água em hidrogênio e oxigênio) utilizando um painel solar, por exemplo, como em CaC's Regenerativas.

Muitas vezes, o hidrogênio utilizado pela CaC não está na sua forma mais pura. Ele está na forma de hidrocarbonetos misturados a outros elementos presentes dentro de um combustível, tal como o gás natural, a gasolina e o álcool, e tem que ser retirado. Para extrair o hidrogênio é utilizado um reformador. Em algumas tecnologias de CaCs, devido à alta temperatura de operação, entre 800°C e 1000°C, a reforma do combustível é feita internamente dentro da própria célula. Já em outras tecnologias, que atuam em temperaturas mais baixas, é necessário um reformador, o que implica em custos adicionais.

5. Principais Tecnologias [1,2,5,7]

Existe uma grande variedade de tecnologias de CaC's, diferenciadas principalmente pelo tipo de eletrólito empregado. O tipo de eletrólito geralmente determina a temperatura de operação, o qual varia bastante entre as diferentes tecnologias (Tabela 1).

Tabela 1. Principais tipos de CaC's e suas características [5].

Tipo	Eletrólito	Espécie Transportada	Temperatura de Operação (°C)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações	Eficiência (%)
AFC	KOH concentrado	OH ⁻	60-90	Alta eficiência (83%)	Sensível a CO ₂ , remoção da água, Gases ultrapuros, sem reforma.	Espaçonaves, Aplicações militares	> 80
PAFC	Ácido Fosfórico 90-100% (H ₃ PO ₄)	H ₃ O ⁺	160-200	Maior desenvolvimento tecnológico.	Vida útil limitada pela corrosão, Controle da porosidade do eletrodo e, Sensibilidade a CO(>2%)	Unidades estacionárias (100kW a alguns MW), Cogeração eletricidade/calor	40 - 50
MCFC	Misturas de Carbonatos fundidos (CO ₃ ²⁻)	CO ₃ ²⁻	650-700	Tolerância a CO/CO ₂ Eletrodos à base de Ni, Reforma interna, alta eficiência terórica	Corrosão do cátodo, Interface trifásica de difícil controle	Unidades estacionárias(100 kW a 1 MW), Cogeração de eletricidade/calor	> 60
PEMFC	Polímero condutor de protons Nafion®	H ⁺	80-90	Alta densidade de potência, Operação flexível, Mobilidade	Custo da membrana, Contaminação do catalisador com CO	Veículos, Espaçonaves e Unidades estacionarias	45 - 50
SOFC / (pSOFC e tSOFC)	Zircônia estabilizada (ZrO ₂ /Y ₂ O ₃)	O ⁻²	800-1000	Alta eficiência (cinética favorável). Reforma interna	Problemas de materiais; Expansão térmica	Unidades estacionárias (10kW a 1 MW), Cogeração de eletricidade/calor.	> 60
ITSOFC	Céria / Gadolínia	O ⁻²	600-800	Alta eficiência (cinética favorável). Reforma interna	Problemas de materiais; Expansão térmica	Unidades estacionárias(10kW a 1 MW), Cogeração de eletricidade/calor.	> 60

As CaC's podem ser diferenciadas também pela temperatura de operação, pelo combustível utilizado ou por sua configuração. Cada tipo de tecnologia requer materiais e combustíveis particulares, além de terem sua aplicação direcionada para onde é mais favorável. As siglas dos tipos de células apresentadas na tabela anterior significam:

- **AFC** (*Alkaline Fuel Cell*): célula a combustível alcalina;
- **PAFC** (*Phosphoric Acid Fuel Cell*): célula a combustível de ácido fosfórico;

- **MCFC** (*Molten Carbonate Fuel Cell*): célula a combustível de carbonato fundido;
- **PEMFC** (*Próton Exchange Membrane Fuel Cell*): célula a combustível com uso de membrana trocadora de prótons;
- **SOFC** (*Solid Oxide Fuel Cell*) célula a combustível de óxido sólido. E suas variáveis: **pSOFC** (*Planar Solid Oxide Fuel Cell*): célula a combustível de óxido sólido na forma planar, **tSOFC** (*Tubular Solid Oxide Fuel Cell*): célula a combustível de óxido sólido na forma tubular e **ITSOFC** (*Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*): célula a combustível de óxido sólido de temperatura intermediária.

Existem ainda outras tecnologias de CaC's que utilizam a base das tecnologias anteriores. Entre elas podemos destacar:

- **DMFC** (*Direct Metanol Fuel Cell*): célula a combustível com uso de metanol direto;
- **DEFC** (*Direct Etanol Fuel Cell*): célula a combustível com uso de etanol direto;
- **RFC** (*Regenerative Fuel Cell*): célula a combustível regenerativa;
- **Z AFC** (*Zinc-Air Fuel Cell*): célula a combustível de zinco-ar;
- **PCFC** (*Protonic Ceramic Fuel Cell*): célula a combustível de cerâmica protônica.

A temperatura de operação das CaC's pode ainda gerar dois subgrupos, o de alta temperatura de operação (*SOFC e MCFC*) e o de baixa temperatura de operação (*PEMFC, DEFC, DMFC, PAFC e AFC*), entretanto nos últimos anos houve um grande esforço no sentido de se reduzir a temperatura de operação das chamadas CaC's de alta temperatura, de forma a minimizar os problemas relacionados à estabilidade e custo de materiais, surgindo dessa forma um outro subgrupo, o de CaC's de temperatura intermediária, que é o caso das *ITSOFC's*.

6. Principais Combustíveis [1-4]

O hidrogênio é o mais simples e mais abundante elemento químico do universo. Ele compõe em torno de 75% de toda a sua massa, e 90% de suas moléculas. Possui a maior quantidade de energia por unidade de massa que qualquer outro combustível já conhecido, gera cerca de três vezes mais calor do que o petróleo estando em seu estado líquido.

Quando resfriado ao estado líquido, o hidrogênio de baixo peso molecular ocupa um espaço equivalente a 1/700 daquele que ocuparia no estado gasoso, sendo possível então o seu armazenamento e transporte.

No seu estado natural e sob condições normais, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro e insípido. O hidrogênio é uma molécula com grande capacidade de armazenar energia e por este motivo sua utilização como fonte renovável de energia elétrica e também térmica vem sendo amplamente pesquisada. Se for produzido a partir de fontes renováveis (etanol e água) e tecnologias renováveis, como as energias solar, eólica e hidráulica, o hidrogênio torna-se um combustível renovável e ecologicamente correto.

É um elemento químico largamente encontrado na água, no ar, nos seres vivos, no petróleo e, para ter um aproveitamento como fonte de energia eficiente, deve estar na forma pura - gasosa ou líquida. Apresenta uma inflamabilidade elevada, mas não é maior que a do gás natural, uma fonte energética que está em expansão no Brasil e deverá ser uma das principais fontes de hidrogênio, pois na sua estrutura de hidrocarboneto, é encontrado o metano (CH₄).

O hidrogênio molecular (H₂) existe como dois átomos ligados pelo compartilhamento de elétrons (ligação covalente). Cada átomo é composto por um próton e um elétron. Como o hidrogênio tem densidade de 1/14 em relação ao ar, alguns cientistas acreditam que este elemento é a fonte de todos os demais, por processos de fusão nuclear. Quando queimado com oxigênio puro, os únicos produtos são calor e água. Quando queimado com ar, constituído por cerca de 68% de nitrogênio, alguns óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados. Ainda assim, a queima de hidrogênio produz menos poluentes atmosféricos que os combustíveis fósseis.

Num sistema de CaC's, a utilização do hidrogênio puro traz vantagens como não necessitar de reformadores (equipamento utilizado para extrair o hidrogênio de uma fonte deste combustível, tal como o gás natural), diminuindo o tamanho e custo do sistema, além de não contaminar as membranas e eletrodos que são sensíveis a alguns compostos. As principais fontes de hidrogênio (Ver artigo: "**Hidrogênio: O Vetor energético do Futuro?**") são:

- Gás Natural;
- Etanol;
- Metanol;
- Água;
- Biomassa;
- Metano;
- Algas e Bactérias;
- Gasolina e Diesel

7. Aplicações [1-5]

As CaC's têm o potencial e a vantagem de poderem ser utilizadas em uma grande variedade de aplicações, desde automóveis e equipamentos portáteis como os telefones celulares, até os setores espacial, militar, aéreo e naval, incluindo a geração de energia estacionária de pequeno, médio e grande portes.

A tecnologia de CaC começou a ganhar impulso a partir dos programas espaciais americanos nos anos 60 e 70. As células servem para fornecer energia para todos os equipamentos a bordo, além de água para os tripulantes e para o resfriamento dos sistemas da nave. Já o segmento de aplicação portátil para as CaC's, deverá ser a primeira aplicação a atingir o mercado comercial em massa.

Outro setor que recebe muitos investimento para CaC's é a aplicação militar, que é sempre um mercado bem atrativo. A eficiência, versatilidade, período de operação maior e ser bastante silenciosa, faz das CaC's extremamente apropriadas para as necessidades de

energia dos serviços militares. As CaC's podem fornecer energia para a maioria dos equipamentos militares; desde equipamentos de mão, usados em campo, até transporte em terra ou mar, como em submarinos.

No setor de transportes, as atenções estão voltadas principalmente para os automóveis e ônibus, mas estão sendo projetadas também para veículos marinhos e aéreos. Já foram investidos muitos bilhões de dólares pelas grandes indústrias neste segmento, prevendo-se a produção em massa para a nova geração de veículos, movida a hidrogênio, nos próximos dez ou vinte anos. Dentro de sete anos será um mercado de mais de 10 bilhões de dólares anuais.

No Brasil, 60% das empresas de pesquisa e investidores de projetos de CaC's estão direcionados para aplicações residenciais e estacionárias de grande porte.

Estamos começando a viver a era do hidrogênio, pois este será o “vetor” energético do futuro, onde os primeiros passos estão sendo dados para que a economia baseada no petróleo se transforme na economia do hidrogênio.

8. Benefícios [1,2,5]

8.1. Ambientais

A tecnologia CaC têm sido reconhecida como uma forma limpa de produzir eletricidade com alta eficiência energética em diversas aplicações, desde a portátil até em geração distribuída. Não importando a sua aplicação, elas oferecem um número importante de benefícios para usuários individuais, companhias de energia e a sociedade em geral.

Enquanto os benefícios da geração distribuída ainda são discutidos, os benefícios ambientais das CaC's têm estimulado o seu uso em locais com alta concentração de poluentes e, ajudando a diminuir os problemas ambientais e melhorar as condições sociais.

Pelo fato de produzirem energia sem combustão e sem partes móveis, as CaC's são, em média, até 25% mais eficientes que os motores a combustão interna, reduzindo a emissão de poluentes e também de dióxido de carbono na atmosfera. Mesmo quando o hidrogênio é obtido a partir de fontes fósseis como o petróleo e o gás natural, a emissão de dióxido de carbono (CO₂) cai de 25 a 50%, e a fumaça produzida quando comparada com equipamentos tradicionais como os geradores a diesel, diminui em 99%.

Na busca de um melhor aproveitamento dos benefícios proporcionados pelas CaC's, as fontes de energia renováveis são um ponto crucial para aproveitar integralmente os benefícios desta tecnologia, pois durante o crescimento destes, como a cana-de-açúcar, ocorre o seqüestro de carbono presente na atmosfera (CO₂), além de liberarem o oxigênio.

Como as previsões das reservas de petróleo estão estimadas para mais 40 ou 50 anos, uma forma de se aumentar este tempo é utilizando equipamentos eficientes, como as CaC's, que produzam a mesma quantidade de energia, mas utilizando menos petróleo^(x).

Além disso, por praticamente não apresentarem partes móveis, os veículos CaC's terão menos vibrações e ruídos, refletindo em menos manutenção. No futuro, ao estacionar o carro na garagem, o veículo CaC poderá ser “plugado” na rede elétrica de casa para gerar eletricidade e calor para aquecer o ambiente, ou ainda, ser vendido para a rede elétrica da cidade. Um automóvel que tenha alta performance e não libere praticamente poluentes na

atmosfera, tal como um que utilize a tecnologia CaC, é uma importante solução para resolver o problema da qualidade do ar urbano. Os Principais Benefícios Ambientais são:

- Minimiza nossa dependência em produtos do petróleo para produzir energia;
- Emite menos gases causadores do efeito estufa;
- Mais eficiência na geração da energia e no consumo da fonte de energia;
- Redução de Baterias nos Aterros Sanitários.

8.2. Sociais

As CaC's fornecem energia limpa numa grande variedade de aplicações. Seja qual for a sua aplicação, as CaC's oferecem um número considerável de benefícios aos seus usuários, desde companhias de eletricidade até a sociedade como um todo, possibilitando uma maior confiabilidade em energia com emissão praticamente zero de poluentes no ar.

Assim, juntamente com outras tecnologias de geração de energia renovável, como as células fotovoltaicas, as usinas eólicas e as tradicionais hidroelétricas, as CaC's trarão benefícios sociais consideráveis.

Uma grande quantidade de CaC's instalada numa determinada região, por exemplo, traz benefícios como maior segurança em energia, melhora na qualidade do ar e do meio-ambiente. Consumidores de energia elétrica e também as próprias companhias de energia podem aproveitar os benefícios através da melhora na confiabilidade do sistema elétrico, diminuindo problemas de transmissão.

A comercialização em massa das CaC's representa uma excelente oportunidade de desenvolvimento econômico para o país e as regiões que adotarem esta tecnologia, pois poderá criar indústrias de desenvolvimento de alta tecnologia, fabricantes, integradores de sistemas, fornecedores, comerciantes e companhias de manutenção.

Os principais benefícios sociais que as CaC's podem oferecer, são:

- Redução da emissão de poluentes no ar e melhora na qualidade da saúde respiratória, especialmente em áreas urbanas que já apresentam problemas de baixa qualidade do ar, como a cidade de São Paulo;
- Redução da emissão de gases causadores do efeito estufa;
- Crescimento econômico, desenvolvimento e criação de empregos;
- Redução da sobrecarga nas linhas de transmissão, possibilitando direcionar os investimentos para outras áreas, como a geração distribuída, melhorando a eficiência energética;
- Aumento da segurança de energia;
- Diminui a quantidade de baterias convencionais e nocivas ao meio ambiente jogadas em aterros sanitários;
- Redução da Poluição Atmosférica e Melhora na Saúde Respiratória;
- Redução de prejuízos na agricultura através da redução da chuva ácida e níveis de concentrações de ozônio próximo à superfície;
- Redução da poluição sonora, pois as CaC's não têm partes móveis e operam silenciosamente;

- Redução da contaminação do lençol freático a partir dos automóveis;
- Redução da emissão de partículas na atmosfera, como cinzas da fumaça.

8.3. Econômicos

Embora seja esperado um crescimento significativo do mercado das CaC's em todo o mundo, o pequeno mercado existente hoje irá resultar no crescimento das indústrias voltadas a tecnologia de CaC's.

Em 2001, o mercado de CaC's nos EUA foi de 218 milhões de dólares. Para este ano, 2006, o crescimento do mercado será de mais de 2,5 bilhões de dólares, segundo o Business Communications Company (BCC), empresa que estudou e analisou o mercado de CaC's.

Em 2009, será um mercado de mais de 7 bilhões de dólares e estima-se que em 2025, caso o crescimento de 25% ao ano se mantenha, o mercado será de mais de 85 bilhões de dólares para valores atuais.

Assim, o Brasil, que tem um potencial enorme para desenvolver esta tecnologia, tem que investir pesado nesta tecnologia, e buscar parcerias pública-privada.

Como resultado, oportunidades para desenvolvimento econômico poderão ser criadas pelas CaC's. Para dar suporte aos fabricantes, a indústria de desenvolvimento tecnológico, integradores de sistemas, fornecedores, comerciantes e empresas de manutenção serão necessárias.

9. Panorama Brasileiro [5-8]

No Brasil, país com enorme potencial energético em várias fontes de energia, onde a energia hidráulica se destaca, a pesquisa em CaC's está caminhando através da iniciativa de algumas empresas, institutos de pesquisa e universidades, apoiadas financeiramente pelas concessionárias de energia, algumas montadoras de automóveis e, aos poucos, pelo governo brasileiro.

O projeto de uma CaC envolve desde estudos sobre quais combustíveis são mais apropriados para o mercado brasileiro, quais as melhores formas de armazenar e/ou reformar estes combustíveis, qual tecnologia deve ser usada para determinada aplicação e como melhorar a durabilidade e eficiência destas tecnologias, particularmente em relação aos eletrólitos e eletrodos, dentre outros estudos.

Verifica-se que os principais estudos de pesquisa estão voltados para o setor automobilístico e de geração de energia estacionária, principalmente residencial e comercial. Não há ainda no Brasil, empresas pesquisando aplicações de CaC's para equipamentos portáteis. Apesar deste desinteresse nacional, esta aplicação será a de maior proximidade com o público mundial nos próximos anos.

Na área de combustíveis, tem-se dado uma atenção especial ao álcool da cana-de-açúcar como fonte de hidrogênio, assim como o tipo de armazenamento de hidrogênio em carros, desde comprimi-lo até estocá-lo em metais que tem a propriedade de absorver o hidrogênio. Com o plano de massificação criado pela Petrobrás, o gás natural também deverá despertar a atenção dos pesquisadores.

O governo brasileiro tem demonstrado interesse em apoiar o desenvolvimento das CaC's através do lançamento oficial, em novembro de 2002, do PROCaC (Programa Brasileiro Sistemas Célula a Combustível), que atualmente mudou de nome para PROH₂ (Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio) uma iniciativa do MCT coordenado pelo CGEE do próprio ministério. O programa tem como principal objetivo incentivar um conjunto articulado de projetos de pesquisa, desenvolvimento e informações em diferentes áreas de atuação para desenvolver tecnologia nacional de CaC's.

Empresas como a Clamper, a Unitech e a CEMIG, estão investindo em projetos de CaC's para o mercado residencial utilizando etanol e hidrogênio puro como combustíveis. No Paraná, a Copel (Companhia Paranaense de Energia) em parceria com o Lactec (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), está fazendo pesquisas com CaC's da *UTC Fuel Cells*, que utiliza tecnologia *AFC*, direcionado ao mercado industrial, hospitais, para geração de energia estacionária de 200 kW ou mais, dentre outros. Na UFPR, há um estudo de otimização de CaC's de tecnologia *PEMFC* financiado pela ANP, e estudos de obtenção de hidrogênio pela eletrólise da água. Também se estuda uma modelagem teórica do funcionamento de todas as CaC's.

Em São Paulo, a Electrocell em parceria com a Eletropaulo e a FAPESP, está desenvolvendo CaC's através do CIETEC (Centro Incubador de Empresas Tecnológicas), localizado dentro do IPEN na USP. Os projetos envolvem o uso do etanol (álcool da cana-de-açúcar) como combustível além de aplicações em transportes e energia estacionária para o mercado industrial.

No Rio de Janeiro, o LABH₂ (Laboratório de Hidrogênio) da COOPE (Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia) da UFRJ está desenvolvendo, juntamente com a Renault, uma das mais promissoras linhas de pesquisa em curso no mundo: o armazenamento de átomos de hidrogênio inseridos dentro da estrutura atômica de um metal.

Já a UNICAMP, está desenvolvendo um protótipo de reformador de etanol para a produção de hidrogênio para aplicação em CaC e capaz de gerar 300W em corrente alternada. Além deste projeto, a UNICAMP está desenvolvendo outros dois projetos de geração de energia a CaC. O primeiro, realizado em parceria com a FAPESP terá 1kW de capacidade. O outro, desenvolvido com a Petrobrás, terá 5kW de capacidade.

Também em São Paulo, a EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo) desenvolve, desde 2000, o projeto Estratégia Energético-Ambiental: Ônibus com CaC de Hidrogênio. Com o apoio do PNDU (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento), a Fase II do projeto começou em 2001. Ela consiste na aquisição, operação e manutenção de oito ônibus com CaC de hidrogênio, além de uma estação de produção desse gás e abastecimento dos ônibus e do acompanhamento e verificação do desempenho desses veículos.

Para prestar apoio e troca de informações sobre estudos sobre o hidrogênio, foi criado o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio pelo MCT, o Governo de São Paulo, a UNICAMP, a USP, a CEMIG e o Instituto Vitae Civilis.

Em Florianópolis, Santa Catarina, o INEP (Instituto Nacional de Eletrônica de Potência), com sede na UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), juntamente com

PHB Eletrônica de São Paulo, está se especializando no controle e monitoramento de uma CaC de 3kW.

A UNIVALI (Universidade do Vale do Itajaí) também em Santa Catarina, em parceria com a CELESC (Concessionária de Energia de Santa Catarina), tem utilizado o hidrogênio puro no desenvolvimento da sua CaC e pretende trabalhar também com o etanol como um combustível.

Estudos também estão sendo feitos pela TECPAR (Instituto de Tecnologia do Paraná) para se avaliar a qualidade do álcool carburante comercial, assim como analisar a questão da contaminação devido a transporte comum, e determinação das características do álcool para as CaC's.

Como se pode ver resumidamente acima, já temos no Brasil pesquisadores e investidores motivados a desenvolver CaC's genuinamente nacionais, inclusive com intenções de exportar a tecnologia nacional. É importante, portanto, um incentivo de maior praticidade por parte do Governo Brasileiro para que estes atuais e futuros projetos rendam frutos para o nosso país.

O Brasil tem um grande potencial para ser referência em tecnologia do hidrogênio e ficar auto-suficiente em energia em todas as formas de aproveitamento de energia, incluindo o petróleo. É um ponto estratégico e crucial para o desenvolvimento e crescimento econômico do país. Com uma grande capacidade hidráulica e sucro-alcooleira, o Brasil poderá produzir hidrogênio para exportar e utilizar em suas próprias CaC's. O nosso país poderá ser uma referência mundial em auto-suficiência em energia e exportador da tecnologia de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio e também da tecnologia CaC. Um trabalho de conscientização nas escolas deve ser feito para motivar os jovens brasileiros da importância que a energia e o meio ambiente terão no futuro deles, na nossa nação e no mundo.

10. Conclusões

Pesquisas de desenvolvimento de CaC's estão sendo realizadas em todo o mundo por empresas de energia, montadoras de automóveis, fabricantes de equipamentos eletrônicos, universidades e centros de pesquisa especializados em energia alternativa, com o objetivo de diminuir os custos, as dimensões, aumentar a eficiência dos equipamentos e, para muitos Países, diminuir a dependência dos atuais combustíveis fósseis.

No contexto internacional, verifica-se a adoção de ações visando ampliar o aproveitamento de energias renováveis com uma progressiva redução no uso dos combustíveis fósseis, reestruturando a produção, a distribuição, o uso da energia e incorporando novas tecnologias.

As possíveis frentes de aplicação das CaC's se apresentam ilimitadas, sendo a sua viabilidade econômica um passo extremamente importante para que se consagre a grande virada da substituição do uso dos combustíveis fósseis, para o uso dos chamados combustíveis limpos, que satisfazem juntamente as necessidades energéticas e ambientais.

Há, portanto, um movimento em favor de uma economia baseada no hidrogênio, e não mais no petróleo. Uma nova infra-estrutura de produção, armazenamento, distribuição e transporte e uso da energia deverá surgir como forma de distanciar o mundo de um regime energético baseado em combustíveis fósseis, limitando as emissões de CO₂ a apenas

duas vezes o nível pré-industrial, minimizando os efeitos do aquecimento global em todo o Planeta e gerando energia de uma forma mais segura e eficiente.

11. Agradecimentos

Os autores agradecem a Faculdade Alfacastelo pela oportunidade de publicar um artigo teórico e conceitual sobre o tema “Células a Combustível” para os alunos de graduação do curso de Administração.

12. Bibliografia

- [1] KORDESCH, K., SIMADER, G. *Fuel Cells and Their Applications*, 1 ed., New York-Cambridge, 1996.
- [2] BLOMEN, J.M.J., MUGERWA, M.N. *Fuel Cell Systems*, 1 ed. New York-Plenum Press, 1993.
- [3] APPLEBY, A.J.; FOULKES, F.R. *Fuel Cell Handbook*. New York, N.Y.: Van Nostrand Reinhold Co., 1989.
- [4] LINDEN, D. *Handbook of Batteries and Fuel Cells*. New York, N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [5] ALDABÓ, R. *Célula a Combustível: fonte de energia da nova era*. São Paulo: Editora Artliber, 2004.
- [6] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Fundo Setorial de Energia. Secretaria Técnica. Programa Brasileiro de Células a Combustível: proposta para o programa*. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE, 2002.
- [7] WENDT, H.; GÖTZ, M.; LINARDI, M. *Tecnologia de Células a Combustível*. Química Nova. v. 23, n. 4, p. 538-546, 2000.
- [8] GEIGER, S. *Fuel Cells in Brazil - A Survey of Current Developments*. Fuel Cell Today, 26 março 2003.