

Materials for Energy
Workshop “Advances in Fuel Cells and Hydrogen”
April 2010, Torres Vedras, Portugal

HIDROGÉNIO E CÉLULAS A COMBUSTÍVEL: PROGRAMA BRASILEIRO DE I&D

MARCELO LINARDI

IPEN-Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear,
Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais.
Av. Prof. Lineu Prestes 2242 Cidade Universitária 05508-000
Sao Paulo, SP – Brasil – Caixa-Postal: 11049, Brasil
mlinardi@ipen.br

RESUMO: *O Programa Brasileiro de Hidrogénio e Sistemas Células a Combustível* foi elaborado em 2002 pelo MCT, com a participação de Universidades, centros de pesquisa e empresas brasileiras com o objetivo de promover ações integradas e cooperadas, que viabilizem o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogénio e de sistemas célula a combustível, habilitando o país a se tornar um produtor internacionalmente competitivo nesta área. Com ele, pretende-se ainda apoiar o estabelecimento de indústria nacional para produção e fornecimento de sistemas energéticos com células a combustível. Entre os vários desafios identificados, além do desenvolvimento da tecnologia das células, estão a produção, o armazenamento e a distribuição do hidrogénio, a capacitação de recursos humanos, regulação quanto à segurança e padronização e necessidade de parcerias entre instituições do governo, setor industrial e setor de serviços. O Brasil está elaborando seu roteiro para a economia do hidrogénio.

Palavras chave: Células a Combustível, Hidrogénio, Programa Brasileiro de Hidrogénio e Sistemas de Células a Combustível

Abstract: *The Brazilian Program on Hydrogen and Fuel Cell Systems* was produced in 2002 by the Ministry of Science and Technology, with the participation of Universities, Research Centers and Brazilian Companies, aiming at promoting integrated and cooperative actions in order to allow the national development of hydrogen technology and fuel cell systems, so that the country may become an internationally competitive manufacturer in this area. Several challenges were identified, beside developing the cells technology: hydrogen production, storage and distribution; increasing skills of human resources; safety and standard regulation; partnerships between government, industry and service entities. Brasil is elaborating its road-map for the hydrogen economy.

Keywords: Fuel cells, Hydrogen, Hydrogen and Fuel Cells Brazilian Program.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de um novo equipamento energético chamado Célula a Combustível começa a despertar um interesse cada vez maior na população em geral, deixando de ser um tema restrito à comunidade técnico-científica e empresarial. Este conceito vem sempre associado à crescente preocupação de preservação ambiental, a automóveis elétricos não poluidores e à geração distribuída de energia com maior eficiência. Porém, o conceito de células a combustível é bem mais abrangente, e se insere na chamada “Economia do Hidrogénio”.

1.1. O Hidrogénio

O hidrogénio é o elemento mais abundante do universo. Na Terra o hidrogénio está quase que completamente na forma de compostos, correspondendo, aproximadamente a 70% da superfície do planeta. Foi identificado pela primeira vez pelo cientista britânico Henry Cavendish em 1776, sendo denominado de “ar inflamável” [1]. O gás hidrogénio (H₂) não está presente na natureza em quantidades significativas sendo, portanto, um vetor energético, ou seja, um armazenador de energia. Para sua utilização, energética ou não, ele deve ser extraído de uma fonte primária que o contenha. A energia

contida em 1,0 kg de hidrogénio corresponde à energia de 2,75 kg de gasolina. Entretanto, devido à sua massa específica (0,0899 kgNm⁻³ a 0°C e 1 atm), a energia de um litro de hidrogénio equivale à energia de 0,27 litro de gasolina [2].

A sua obtenção é bastante flexível, sendo esta uma de suas características mais interessantes. Pode ser obtido a partir de energia elétrica (via eletrólise da água), pelas fontes: hidroelétricas, geotérmicas, eólica e solar fotovoltaica, todas geológicas e também da eletricidade de usinas nucleares. Pode ainda ser obtido da energia da biomassa (via reforma catalítica ou gaseificação, seguida de purificação), como: etanol, lixo, rejeitos da agricultura, etc. As fontes de hidrogénio mais viáveis economicamente são, entretanto, os combustíveis fósseis (via reforma catalítica ou gaseificação, seguida de purificação), como: petróleo, carvão e gás natural. Esta flexibilidade em relação à sua obtenção permite que cada país escolha a melhor maneira de produzir o hidrogénio, segundo suas próprias disponibilidades. Assim, para citar alguns exemplos, a

Rússia tem a opção de hidrogénio de origem nuclear [3]; a Argentina, por sua vez, optou pelo hidrogénio de origem eólica [4] e o Brasil direciona-se para a produção de hidrogénio a partir do bioetanol [5].

Na última década, as aplicações não energéticas do hidrogénio corresponderam a 50% para aplicações não energéticas como a produção de amônia e metanol, 40% para o refino do petróleo e 10% para aplicações energéticas, Figura 1 [6]. Portanto, a utilização energética do hidrogénio não é uma novidade. Quando se ouve falar em hidrogénio vem à mente, de imediato, a idéia de uma fonte renovável e limpa de energia. Não é bem assim. Esta idéia somente é verdadeira se o hidrogénio for obtido de fonte renovável e, neste caso tem-se o chamado “green hydrogen”. Se a fonte é fóssil, tem-se o chamado “black hydrogen”, que é produzido com emissões nocivas ao meio ambiente. Portanto deve-se ter muito cuidado com conclusões precipitadas sobre este assunto.

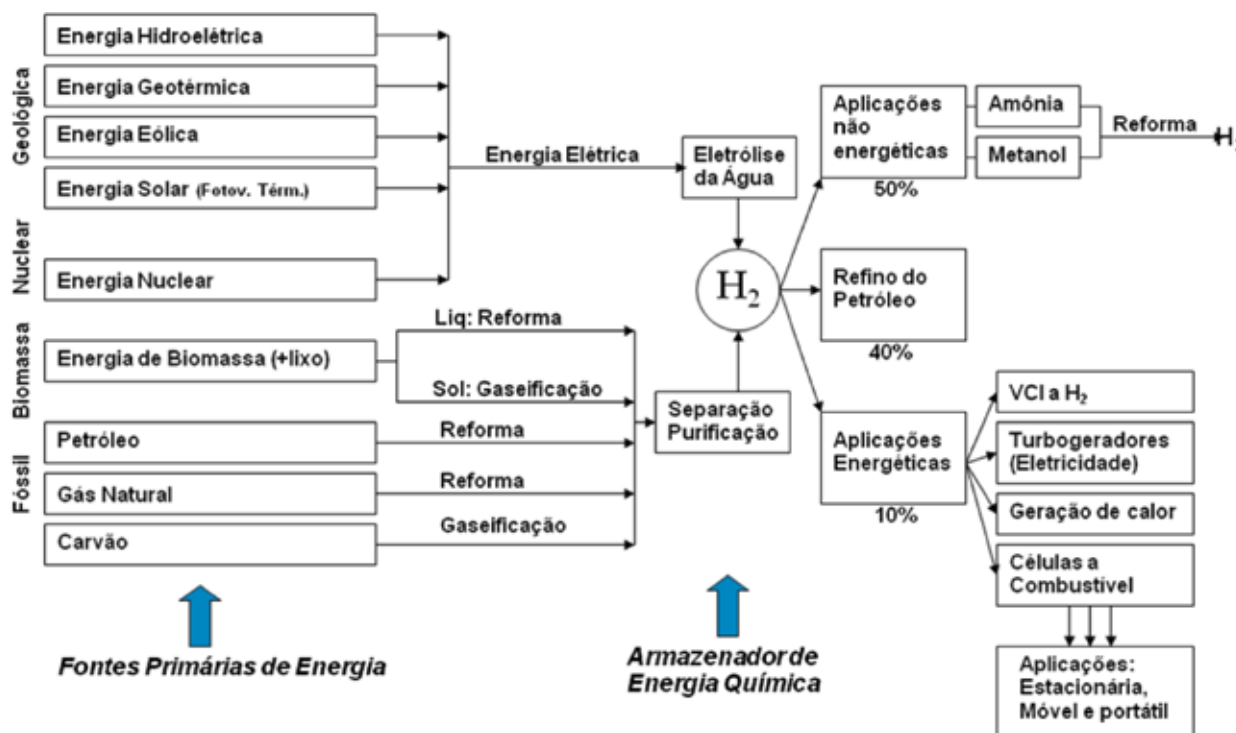


Fig. 1. Esquema de fontes e usos de hidrogénio

1.2. A Economia do Hidrogénio

A história da humanidade mostra vários períodos de utilização de diferentes fontes primárias de energia, Figura 2. Assim, pode-se citar a madeira como a primeira fonte primária de energia utilizada pelo homem [7]. Segue-se a este período a era do carvão que, associada a desenvolvimentos tecnológicos, possibilitou a revolução industrial na Inglaterra. Denomina-se de “Economia do Carvão” este período da história, onde a grande parte da energia que alimentava a economia provinha, então, do carvão. Seguiu-se, posteriormente, a “Economia do Petróleo”, que é a que vivemos hoje, conjuntamente com a ascensão da “Economia do Gás Natural”. Interessante notar que houve uma descarbonização progressiva das fontes primárias de energia, sendo o metano, hoje, o mais limpo am-

bientalmente [8]. Vive-se também uma crescente “Economia Nuclear”, que tem, entretanto, um crescimento lento devido a fatores de aceitação pública e de não-proliferação [7]. Seu futuro é incerto, embora muitos estudiosos afirmem, com certa razão que, em grande escala, não há como evitar esta forma de produção de energia num futuro próximo [9, 10]. Outra observação interessante diz respeito à geografia. Todos os recursos naturais de fontes de energia primárias estavam ou estão localizados em certas regiões do planeta, beneficiando, naturalmente, os países destas regiões. Este fato, inevitável, gerou e gera conflitos político-econômicos e até guerras.

Considerando-se que as fontes fósseis são finitas e, portanto, os preços aumentam gradativa e seguramente, que seu consumo é ineficiente sob o ponto de vista energético, que a localização

de suas reservas geram conflitos políticos e por fim, mas não menos importante, que a queima destes combustíveis geram emissões nocivas ao meio ambiente (exceto a nuclear), pode-se sonhar com uma “Economia do Hidrogénio”. Projeta-se para a década de 2080 que 90% da energia provirá do hidrogénio [7]. Seguramente, o gás natural fará, como fonte principal de hidrogénio neste período, uma ponte entre o hidrogénio negro e o verde, de origem não fóssil. Por volta de 2080, então, as emissões poluidoras do meio ambiente seriam insignificantes; a eficiência de conversão energética químico/elétrica seria pelo menos o dobro da atual e os conflitos geopolíticos seriam atenuados. Seria este cenário futuro apenas um sonho? Todos os fatores listados acima corroboram a introdução da “Economia do Hidrogénio” na nossa sociedade. Quais seriam então os pontos críticos para este desenvolvimento? O primeiro que surge é o fato do hidrogénio ser um vetor energético, ou seja, não está disponível na natureza, tendo de ser obtido de uma fonte primária que o contenha, elevando o seu custo, atualmente, a valores não competitivos comercialmente para fins energéticos em grande escala. Outros pontos críticos seriam: a segurança em seu manuseio, seu armazenamento e transporte e, não menos importante, o desenvolvimento e o preço das células a combustível, equipamento mais adequado para sua conversão em energia elétrica (e térmica). O debate é amplo, necessário, e às vezes controverso, mas está aberto à discussão, não só da comunidade científica, como também dos políticos responsáveis pelas ações estratégicas, e de empresários do setor.

Entretanto, podem-se citar alguns consensos sobre a futura economia plena do hidrogénio. A primeira é que ela já começou não se tratando, portanto, de “assunto do futuro”, como se ouve, freqüentemente. As tecnologias de células a combustível, da produção, armazenamento e transporte de hidrogénio já existem embora ainda não maduras. A degradação do meio ambiente e suas conseqüências, como o aquecimento global é um fato insustentável a médio e longo prazo [11]. Portanto, o que falta para acelerar a introdução desta nova economia no planeta? Resumidamente, redução de custos, tanto da produção de hidrogénio como de células a combustível; amadurecimento destas mesmas tecnologias para aplicações automotivas, esta-

cionárias e portáteis e instalação de infra-estrutura adequada à sua utilização. Neste ponto uma comparação faz-se útil. Imagine os tempos iniciais da invenção do automóvel. Não havia infra-estrutura para a rolagem dos automóveis, que tinha, por sua vez, preços proibitivos. A gasolina não era nem abundante nem barata e tampouco se encontrava em cada esquina. Pois bem, aproximadamente cem anos depois o automóvel tornou-se acessível, existem estradas para sua rolagem e pode-se abastecê-lo em qualquer lugar, ou seja, aprendemos a lidar com o combustível e, com a produção em massa e o mercado, os preços caíram. Esta mesma curva de aprendizado aplica-se, obviamente, à nova “Economia do Hidrogénio”. Entretanto tem-se que começar com o desenvolvimento tecnológico cedo o suficiente para se colher os frutos no tempo propício.

Uma outra grande mudança ocorrerá com a introdução da “Economia do Hidrogénio”. As células a combustível se prestam à geração distribuída de energia elétrica, com unidades de relativo pequeno porte (alguns Watts até alguns MW), se comparadas com as centrais elétricas atuais (de até milhares de MW) [8]. Entende-se por geração distribuída de energia elétrica a geração *in loco*, independente da rede, com a compra, então, de um combustível, hidrogénio, ou mais adequadamente, um combustível primário rico em hidrogénio, a ser reformado localmente. Vale aqui outro paralelo: os grandes computadores do início da década de 80 (*main frame*), representando o sistema centralizado atual de produção de energia elétrica, frente aos computadores pessoais de cada cidadão de hoje, representando a geração distribuída de energia elétrica, fato que evita dispendiosas linhas de transmissão, que, conseqüentemente, aumenta a confiabilidade desta energia produzida localmente, evitando, ou minimizando apagões.

Uma observação final nos leva a seguinte reflexão. Como o hidrogénio pode ser obtido de diversas maneiras, ver Figura 1, qualquer país ou região do planeta pode obtê-lo. Neste caso, com a introdução da “Economia do Hidrogénio” tem-se pela primeira vez na história da humanidade uma democratização das fontes de energia, que seguramente gerará mais progresso e menos tensões políticas [1].

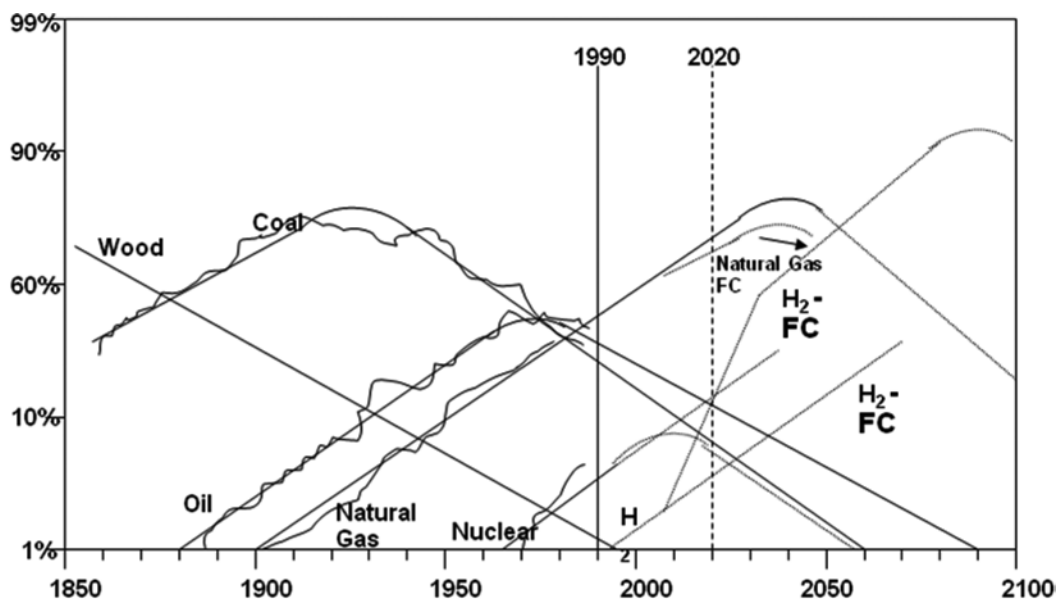


Fig. 2. Evolução de diversas fontes primárias de energia com o tempo.

1.3. A Célula a Combustível

Células a combustível são conversores diretos de energia química em elétrica e térmica, de funcionamento contínuo (diferentemente das baterias), que produzem corrente contínua pela combustão eletroquímica a frio de um combustível, geralmente hidrogênio [12]. Assim, considerando-se as células de baixa temperatura de operação em meio ácido, hidrogênio é oxidado a prótons no anodo, liberando elétrons, segundo a reação:



No eletrodo oposto, o catodo, tem-se a reação:



A reação global produz água e calor (exotérmica):



Os eletrodos são condutores eletrônicos permeáveis aos gases reagentes e são separados um do outro por um eletrólito (condutor iônico). O eletrólito pode ser um líquido, um polímero condutor de cátions (geralmente saturado com um líquido) ou um sólido.

Células unitárias apresentam um potencial aberto de 1 a 1,2 V e liberam, sob solitação de 0,5 a 0,7 V DC. Estes valores são, sob o ponto de vista prático, muito baixos. A necessidade de empilhamento em série de várias unidades de células (200 a 300, também chamado módulo) torna-se óbvia, a fim de se obter potenciais práticos da ordem de 150 a 200 V [13]. Uma das vantagens inerente às células a combustível é a sua eficiência relativa ao combustível. A eficiência teórica máxima h de qualquer processo de produção de energia eletroquímica é obtida pelo quociente entre a energia livre de Gibbs (DG) e a entalpia total (DH), ou seja, a parte da energia total dos reagentes que pode ser convertida em energia elétrica:

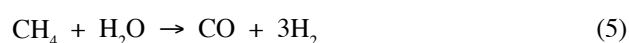
$$\eta = \Delta G/\Delta H \quad (4)$$

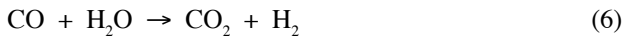
A eficiência teórica eletroquímica diminui de 86 a 70% na faixa de temperaturas de 100 a 1000°C. A eficiência de Carnot, por sua vez, eleva-se de 0 a 70% na mesma faixa e somente a temperaturas superiores a 1000°C é maior que a eficiência teórica eletroquímica [14]. Portanto, células a combustível a hidrogênio apresentam uma eficiência teórica significativamente maior que máquinas de Carnot, principalmente a baixas temperaturas.

As reações eletródicas das células a combustível envolvem, de uma maneira geral, a ruptura das ligações químicas entre dois átomos de hidrogênio e de oxigênio. A ruptura das moléculas diatômicas H_2 e O_2 requerem uma energia de ativação da mesma ordem de grandeza de suas energias de formação, quando as reações são homogêneas e ocorrem em fase gasosa [15]. Em células a combustível, entretanto, ambas as reações são heterogêneas e ocorrem na interface eletrodo/eletrólito, sendo catalisadas na superfície do eletrodo.

Geralmente, classificam-se os vários tipos de células a combustível pelo tipo de eletrólito utilizado e, conseqüentemente, pela temperatura de operação [12]. Os principais tipos de células de baixa temperatura de operação (de temperatura ambiente até 200°C) são [16]:

- (a) as células alcalinas (*Alkaline Fuel Cell*), ou simplesmente AFC. Este tipo de célula tem, hoje, um papel importante somente em aplicações restritas como naves espaciais ou situações onde há disponibilidade de hidrogênio ultrapuro. Este tipo de célula foi o precursor das células mais modernas;
- (b) as células a membrana polimérica trocadora de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), ou PEMFC e operam na faixa de temperatura ambiente até 80°C. São as mais promissoras como alternativa para a eletrotração, em substituição aos motores a combustão interna. Estas células possuem as vantagens de serem robustas e de fácil acionamento e desligamento, possuírem alta eficiência e baixa (ou nenhuma) emissão de poluentes. Também se aplicam às unidades estacionárias geradoras de energia local e também para geradores portáteis de energia, como telefones celulares e laptops. O fator determinante para a sua entrada no mercado é, ainda, o seu custo. Como eletrólito polimérico utiliza-se a membrana de Nafion®, composta por um polímero perfluorado de tetrafluoropolietileno, onde, num de seus lados, um éter faz a ligação com um ácido etil-sulfônico perfluorado (grupo ionogênico). As pontas das cadeias, onde se encontra o grupo sulfônico, formam uma espécie de bolha na estrutura, que se incha em contato com a água ou vapor d'água. Estas bolhas, que são interligadas, são responsáveis pela condução de prótons e água pela membrana, sob o efeito de um campo elétrico [12]. O uso comercial deste tipo de célula era inimaginável, inicialmente, devido à grande quantidade de platina, como eletrocatalisador, necessária na constituição do eletrodo. A mudança de cenário veio com a utilização de negro de fumo como suporte da platina. Além disso, seguindo a idéia introduzida por Raistrick e Gottesfeld [17, 18], constatou-se, no início dos anos 90, que se podia utilizar, de forma mais eficiente, a superfície da platina, quando se contactava a superfície interna do suporte com o ionômero da membrana. Este processo resulta em nanocristais de platina, dispersos no suporte em contato com o eletrólito (Nafion®, DuPont). Este fato reduziu a quantidade necessária de platina, tornando viável a comercialização deste tipo de célula. As áreas de P&D mais estudadas em células PEMFC envolvem, de um lado, o desenvolvimento de eletrocatalisadores mais ativos e específicos tanto para a oxidação direta de álcoois (metanol e etanol) como hidrogênio contaminado com CO, e de outro lado o desenvolvimento de novos eletrólitos, que permitam a operação destas células acima de 100°C, aumentando a eficiência das células e a sua longevidade;
- (c) as células a ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), ou PAFC. Desenvolvidas no final dos anos 60, este tipo de célula representou um significativo progresso tecnológico na área. Esta célula não é sensível ao dióxido de carbono e é pouco sensível ao monóxido de carbono, que envenena o catalisador em células PEMFC, permitindo um teor de até 1% de CO no gás de alimentação a 200°C, sua temperatura de operação. O desenvolvimento desta célula teve, desde o início, o objetivo de conquistar o importante mercado das usinas queimadoras de metano [13], reações (5) e (6):





Nas células PAFC utiliza-se carvão de silício, com diâmetro médio de $0,1 \mu\text{m}$, como material para suporte (matriz) para abrigar o eletrólito (ácido fosfórico). Embora seja o tipo de célula de maior comercialização no mundo hoje, as células PAFC não têm demonstrado muito progresso tecnológico nos últimos anos, tampouco uma significativa redução de custos, dos atuais US\$ 4.000 por kW instalado.

Nas células de baixa temperatura de operação as reações se processam nos chamados eletrodos de difusão gasosa, que são uma estrutura porosa condutora de elétrons do sistema eletrodo/eletrocatalisador a base de platina. A construção deste eletrodo tem como função a maximização da interface trifásica gás-líquido-sólido, aumentando consideravelmente a velocidade dos processos eletródicos. Os desenvolvimentos atuais em P&D nestes tipos de células se resumem em novos eletrocatalisadores seletivos, materiais, componentes e processos mais econômicos, além de otimização da engenharia de sistemas.

Para células a combustível de alta temperatura de operação não há a necessidade da utilização de metais nobres como catalisadores, já que nesta faixa de temperaturas, o próprio metal do eletrodo torna-se suficientemente ativo. Os principais tipos de células de alta temperatura de operação (de 200°C até 1000°C) são [16]:

- (a) as células a carbonato fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell*), ou MCFC. Para as células a carbonato fundido, que operam a 600°C , utiliza-se como material de eletrodo níquel para o ânodo e óxido de níquel com incrustações de lítio para o cátodo, que é um semicondutor do tipo p. Nas células a carbonato fundido utiliza-se uma matriz de partículas de LiAlO_2 para acomodar o eletrólito, uma mistura de carbonatos fundidos. Neste tipo de célula, a reforma endotérmica do gás natural para gerar hidrogénio pode ser realizada na própria coluna de unidades de células, eliminando-se o reformador e, ao mesmo tempo, resfriando as células, otimizando a engenharia do sistema e reduzindo custos;

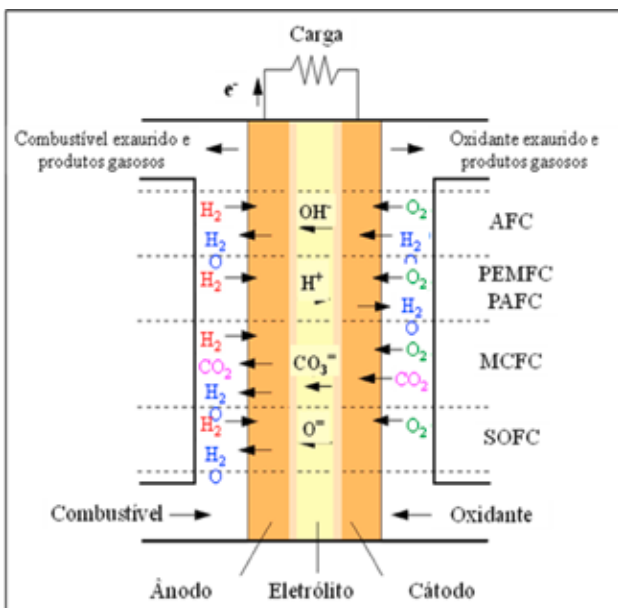


Fig. 3. Esquema simplificado dos principais tipos de Células a Combustível.

- (b) as células de óxido sólido (*Solid Oxide Fuel Cell*), ou SOFC operam na faixa de 800°C a 1000°C . No caso destas células cerâmicas, utiliza-se um cermet de Ni/ZrO_2 como material do ânodo, ou seja, uma matriz de óxido de zircônio estabilizado com níquel finamente distribuído. Como material do cátodo utiliza-se um composto a base de manganês e lantânio dopado com estrôncio, $\text{La}(\text{Sr})\text{MnO}_3$. Um material utilizado como interconector para o empilhamento (módulo de potência) é o LaCrO_3 . Este tipo de células apresenta algumas vantagens em relação a outros tipos, como facilidade de gerenciamento do eletrólito (por ser sólido) e a não necessidade do uso de metais nobres como catalisadores. Além disso, possuem maiores valores de eficiência teórica de conversão, e têm uma alta capacidade de co-geração eletricidade/calor. A elevada temperatura de operação favorece a cinética das reações eletródicas e permite a reforma do combustível primário para produção de hidrogénio no próprio corpo da célula. A principal aplicação desse tipo de célula é a geração de energia em unidades estacionárias. Entretanto, a alta temperatura de operação traz limitações tecnológicas, como o favorecimento de processos de degradação e fadiga dos distintos componentes, tensões térmicas, entre outros. Desenvolvimentos de P&D recentes tentam, neste tipo de célula, desenvolver materiais para permitir sua operação a temperaturas inferiores a 800°C e redução de custos.

Esses dois tipos de células, MCFC e SOFC, encontram-se, atualmente, em uma fase de desenvolvimento tecnológico e comprovação técnico-econômica [19].

2. O IPHE (INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR THE HYDROGEN ECONOMY)

Sob o comando do Ministério de Minas e Energia (MME) foi elaborado, com a colaboração de muitos especialistas da área, um documento preliminar, que deve nortear as ações do governo brasileiro para a entrada do Brasil na “Economia do Hidrogénio” e se intitula “Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogénio no Brasil”, disponível em [20].

Os tópicos mais relevantes deste documento são:

- No ano de 2020 o hidrogénio fará parte da matriz energética do país;
- O etanol foi escolhido como a fonte principal de hidrogénio. Considera-se também a sua utilização direta (oxidação direta em células a combustível);
- A produção de hidrogénio via eletrólise da água é considerada, utilizando-se eletricidade secundária de usinas hidroelétricas;
- Outras biomassas, além da cana de açúcar, devem ser utilizadas para a produção de hidrogénio, incluindo-se o biogás;
- A utilização de gás natural como fonte de hidrogénio deve fazer a transição para um futuro com apenas *green hydrogen*;
- As aplicações deste energético incluem, na ordem de importância: a geração distribuída de energia; a produção de energia em regiões isoladas e os ônibus urbanos.

No cenário mundial, foi criado em 2003 pelos Estados Unidos um programa de cooperação internacional, denominado “*International Partnership for the Hydrogen Economy*”, (IPHE), com a participação de 17 países, com o objetivo principal de implementar, facilitar e estabelecer, entre seus membros, atividades de P&D&I e de desenvolvimento de mercado em relação ao hidrogênio e às tecnologias de células a combustível, Figura 4.

Os países membros são: Austrália, Brasil, Canadá, China, Comunidade Européia, França, Alemanha, Islândia, Índia, Itália,

Japão, Coreia do Sul, Nova Zelândia, Noruega, Rússia, Reino Unido e Estados Unidos. O Brasil é o único membro da América Latina. Estes países representam 85% do PIB mundial, com 3,5 bilhões de pessoas e mais de 75% do consumo mundial de eletricidade, além de mais de 2/3 das emissões de CO₂ [21]. Analisando os membros deste fórum e os dados relevantes mostrados acima, percebe-se a importância do assunto, que demanda uma mudança de paradigma no conceito da matriz energética mundial nas próximas décadas.

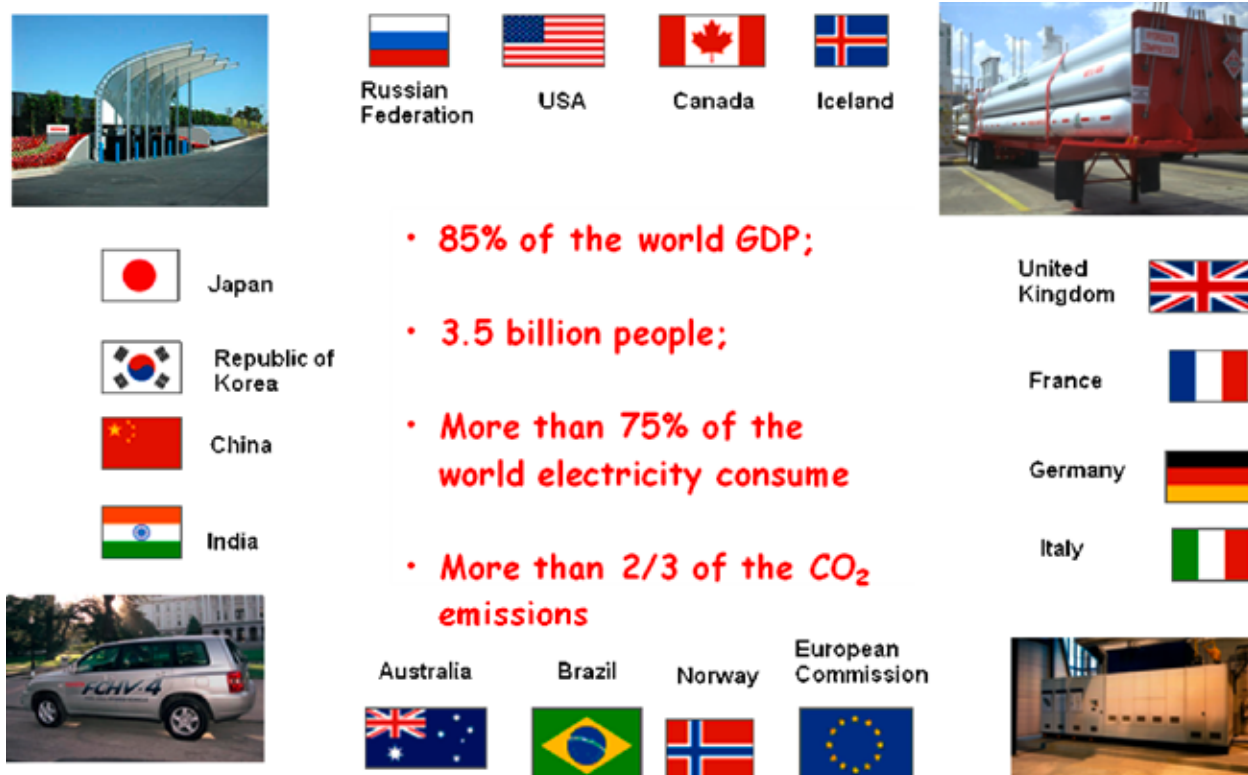


Fig. 4. Países do IPHE e algumas de suas características principais.

As atribuições do IPHE podem ser resumidas como: implementar áreas de cooperação técnica; apoiar e escolher projetos envolvendo hidrogênio e células a combustível; criar forças-tarefas para desenvolver estratégias para desenvolver e disseminar a economia do hidrogênio; criar e expandir roteiros nacionais (roadmaps) com o “*IPHE Priority Scorecard and Activities Matrix*”.

Este fórum é composto por dois comitês, que se reúnem anualmente: Comitê de Controle, “*Steering Committee*” (SC), e o Comitê de Implementação e Ligação, “*Implementation and Liaison Committee*” (ILC).

Exatamente devido a esta mudança de paradigma, que pressupõe mudanças radicais em setores bem estabelecidos da economia e da sociedade, o IPHE decidiu realizar no Brasil, São Paulo, de 23 a 26 de abril de 2007, a 7ª reunião do comitê de controle, “*Steering Committee*”, para ter conhecimento da experiência brasileira no setor de combustíveis automotivos, onde, de 1975 até os dias atuais houve uma mudança drástica, com a introdução em grande escala de um combustível reno-

vável, no caso o etanol. A introdução do biodiesel também foi considerada neste aprendizado. Ou seja, a comunidade internacional quis saber como o Brasil venceu barreiras para uma mudança em sua matriz energética de transportes [22]. Este aprendizado pode ser útil para uma transição para a “*Economia do Hidrogênio*”. Os principais destaques deste aprendizado foram apresentados por especialistas do MME e MCT e alguns cientistas brasileiros. As ações criadas em 1975 com o PROALCCOL são listadas a seguir:

- (a) manutenção inicial do preço do álcool abaixo do da gasolina;
- (b) garantia da remuneração do produtor de álcool;
- (c) redução de taxas e impostos para automóveis movidos a álcool;
- (d) incentivos aos produtores de álcool para aumentar capacidade de produção;
- (e) obrigatoriedade do fornecimento de álcool em postos de todo o território nacional;
- (f) manutenção de estoques reguladores de álcool.

Salientou-se aos integrantes do Steering Committee que as medidas acima foram importantes numa fase inicial e que somente com o desenvolvimento da tecnologia de automóveis do tipo *FLEX* e a volta do mercado livre de combustíveis é que se logrou o sucesso do programa. Apenas o item (c) foi mantido até hoje, ou seja, a redução de impostos para os carros *FLEX*. Todas as outras medidas foram suprimidas.

Um paralelo à “Economia do Hidrogénio” pode ser estabelecido, como por exemplo, incentivos à produção inicial de hidrogénio, garantia de preços competitivos e obrigatoriedade do fornecimento para aplicações práticas. Associado a estas ações segue-se o desenvolvimento intensivo da tecnologia de células a combustível, visando sempre a redução de custos para aplicações diversas. As metas de custos a serem atingidas são de aproximadamente US\$ 2.000 por kW instalado, para aplicações estacionárias de energia elétrica e de US\$ 200 por kW instalado, para aplicações móveis. Salienta-se aqui apenas o caráter econômico da tecnologia e não os ambientais, que podem, num futuro próximo, ser tão importantes na nossa sociedade como o financeiro.

3. O PROGRAMA BRASILEIRO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL E HIDROGÉNIO

O Programa Brasileiro de Hidrogénio e Sistemas Células a Combustível (inicialmente denominado PROCAC) foi elaborado em 2002 pelo MCT, com a participação de Universidades, centros de pesquisa e empresas brasileiras com o objetivo de promover ações integradas e cooperadas, que viabilizem o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogénio e de sistemas célula a combustível, habilitando o país a se tornar um produtor internacionalmente competitivo nesta área. Com ele, pretende-se ainda apoiar o estabelecimento de indústria nacional para produção e fornecimento de sistemas energéticos com células a combustível. Entre os vários desafios identificados, além do desenvolvimento da tecnologia das células, estão a produção, o armazenamento e a distribuição do hidrogénio, a capacitação de recursos humanos, regulação quanto à segurança e padronização e necessidade de parcerias entre instituições do governo, setor industrial, setor de serviços, ONGs, etc. Em 2005 o PROCAC passou a ter nova denominação, passando a se chamar Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogénio, com a sigla PROH2.

O programa é estruturado por meio da formação de redes de pesquisa e desenvolvimento abrangendo todo o território nacional. Nesse sentido, o programa garante o uso mais racional dos recursos investidos e antecipa o alcance dos objetivos.

As principais premissas do PROH2 são:

(a) desenvolver ações integradas e cooperadas, que viabilizem a criação de uma tecnologia nacional em sistemas energéticos baseados em células a combustível, visando produção de energia elétrica de maneira mais limpa e eficiente. Inclui as áreas: eletroquímica e catalisadores, materiais de células a combustível, células a combustível tipo PEM, células a combustível tipo SOFC, reforma de etanol, reforma de gás natural, sistemas ligados a células a combustível, etc;

- (b) criar as condições para o estabelecimento de uma indústria nacional para a produção de sistemas energéticos baseados em células a combustível que inclua produtores de células, integradores de sistema e fornecedores de serviço, habilitando o país a se tornar internacionalmente competitivo nessa área tecnológica;
- (c) incentivar a instalação de sistemas energéticos baseados em células a combustível;
- (d) estabelecer condições para que as instituições participantes colaborem ativamente entre si nos diversos aspectos envolvidos nas áreas de pesquisa, desenvolvimento e aplicação dessa tecnologia;
- (e) atuar com eficiência na transferência de tecnologia das universidades e centros de pesquisa para as empresas, com o intuito de aumentar a competitividade da economia brasileira, inclusive através de mecanismos de cooperação internacional;
- (f) instituir e aperfeiçoar a infra-estrutura de pesquisa; formar e capacitar recursos humanos na área;
- (g) estabelecer normas e padrões técnicos para certificação dos processos, tecnologias e produtos de interesse na área para as várias aplicações estacionárias, móveis e portáteis;
- (h) financiar e utilizar o poder de compra de vários agentes governamentais para viabilizar projetos de demonstração relacionados a nova tecnologia de modo a aumentar a sua visibilidade, atrair novos investimentos, possibilitar treinamento de pessoal, realizar estudos de viabilidade técnica e econômica, etc.

O programa utiliza recursos dos Fundos Setoriais (CTPetro; CTEnerg e Verde-Amarelo) e dispõe, numa primeira fase, de R\$ 7 milhões, disponíveis à pesquisa a partir de dezembro de 2006, gerenciados pela FINEP. O programa também contempla algumas ações isoladas de interesse, segundo a modalidade de Encomenda, como, por exemplo, o projeto “Geração de Hidrogénio a partir de Reforma do Etanol”, coordenado pelo Instituto Nacional de Tecnologia, INT, e tendo como co-executores o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, e o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás, CEPTEL, no valor de R\$ 5,8 milhões que, além do desenvolvimento do processo de reforma, prevê a construção de um módulo de célula do tipo PEM de 5kW de potência elétrica nominal, com tecnologia nacional.

Associado ao programa de desenvolvimento científico e tecnológico, pode-se citar um projeto de apoio à infra-estrutura de laboratórios dos componentes das redes, gerenciado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, já finalizado, e bolsas de mestrado, doutorado e DTI, gerenciados pelo CNPq, específicas para a formação de recursos humanos do programa.

Na área de aplicação em eletrotração, dois projetos podem ser destacados no país, embora não pertençam ao programa brasileiro PROH2:

- (a) o primeiro denomina-se “Estratégia Ambiental para Energia: Ônibus com Célula a Combustível a Hidrogénio para o Brasil” e prevê a construção e testes de 8 ônibus movidos a células a combustível (Tipo PEM da empresa Ballard) com hidrogénio produzido por eletrólise. A Pe-

tróbrás deve construir os postos de fornecimento de hidrogênio. Este projeto é conduzido pelo Global Environment Facility/PNUD da ONU (US\$ 12,5 milhões), pelo MME (R\$ 4 milhões) e gerenciado pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo EMTU.

(b) projeto de um protótipo de ônibus urbano, com hidrogênio produzido por reforma de gás natural, coordenado pelo consórcio COPPE/LACTEC/ Petrobras/ ELEBRA.

4. O BIO-HIDROGÊNIO NO BRASIL

A opção brasileira pelo hidrogênio obtido principalmente do etanol deveu-se a vários fatores, que tornam esta escolha interessante. O etanol é um combustível líquido, de fácil armazenamento e transporte, já havendo no Brasil toda a infraestrutura para a sua produção, armazenamento e distribuição em todo o território nacional. Além disso, o etanol possui outras características muito importantes, como ser pouco tóxico e ser um biocombustível, portanto, renovável. É um insumo rico em hidrogênio. A participação do etanol na matriz energética nacional tem crescido muito nos últimos anos (em 2008 correspondia a 16%), Figura 5, principalmente devido a dois fatores: a sua mistura à gasolina (de 20 a até 25%) e o grande desenvolvimento e sucesso comercial dos carros chamados *FLEXFUEL*.

O etanol brasileiro, produzido a partir da cana de açúcar, é o biocombustível mais produtivo do mundo hoje, com 6.000 litros/hectare/ano, a um custo de US\$ 0,22 por litro (anidro). Esta produtividade pode crescer até 14.000 litros/hectare.ano, com o desenvolvimento de novas tecnologias. Apenas por compa-

ração, o etanol do milho nos EUA tem uma produtividade de 3.000 litros/hectare.ano. Outro ponto interessante é o seu excelente balanço energético. Cada Joule não renovável usado na produção de etanol, resulta em 9 Joules renováveis. Outra vez, a título de comparação, esta relação para o álcool dos EUA é de 1.5 e para o biodiesel na Alemanha é de 3,0 [23].

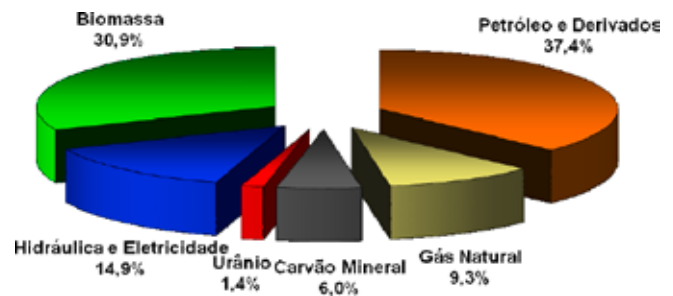


Fig. 5. Matriz energética brasileira total. Dados de 2008.

A produção atual no Brasil é de aproximadamente vinte bilhões de litros por ano, que corresponde a uma área ocupada para plantação de 3 milhões de hectares (0,35% do território nacional). A área apta a esta cultura é de 12% do território nacional. A cobertura vegetal do Brasil é de 851 milhões hectares, dos quais 464 milhões hectares (54%) são florestas; 297 milhões hectares (35%) são para agricultura e pastagem; 73 milhões hectares (9%) são campos e savanas e 17 milhões hectares (2%) são cidades, rios e outros. Principalmente as áreas de pastagem degradadas são previstas para o aumento da demanda desta plantação, sem, então, prejudicar nossos recursos naturais ou a produção de alimentos[24], como fica claro no mapa da Figura 6.

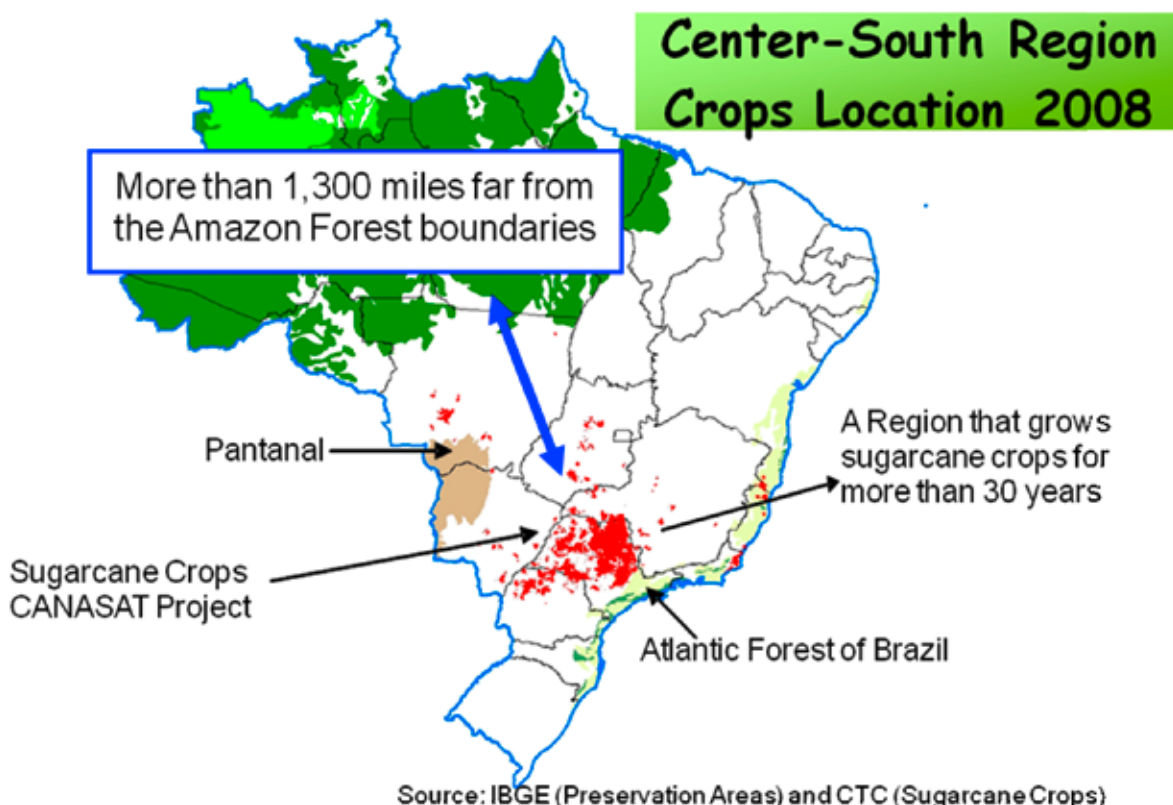
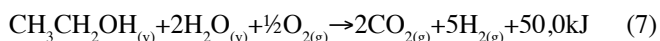


Fig. 6. Localização das plantações de cana-de-açúcar no Brasil.

Para a utilização indireta de etanol para a produção de hidrogênio têm-se três processos possíveis: reforma por oxidação parcial, reforma a vapor e reforma autotérmica. Cada processo possui características próprias, vantagens e desvantagens. Entretanto a reforma autotérmica, que consiste numa combinação dos dois processos anteriores, provê um ótimo balanço térmico, com uma temperatura de reação de aproximadamente 700°C, reação (7). As vantagens deste processo são: o alto rendimento de hidrogênio e o melhor balanço térmico. A principal desvantagem é a diluição do hidrogênio com nitrogênio, que pode ser contornada por reatores envolvidos por membranas de paládio, purificando o gás final.



Podem-se salientar, ainda, outros motivos para a utilização do etanol como armazenador renovável de hidrogênio, além da grande produção e distribuição em todo o país. A experiência prévia em normas e comercialização; o fato de ser menos tóxico que o metanol; questões ambientais, (efeitos de emissões da queima do etanol ainda não estão bem estudados) [25] e de eficiência em relação à sua combustão direta, e, finalmente, ser viável para distribuição em regiões isoladas do país.

5. O PROGRAMA DO INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES – IPEN

O IPEN possui um histórico de realizações importantes na área nuclear do país. A experiência de gestão de P&D, inovação e coordenação de atividades multidisciplinares se caracteriza por realizações tais como o domínio do ciclo do combustível nuclear, engenharia, construção e operação de reatores de pesquisa, produção de radiofármacos, etc. Na área de ensino, a associação com a Universidade de São Paulo permitiu o estabelecimento de um programa de pós-graduação na área nuclear com alto conceito nacional.

Seguindo uma tendência mundial, iniciou-se no IPEN, em 2000, uma nova frente de estudos na área de fontes energéticas eficientes e de baixo impacto ambiental, escolhendo-se o estudo e desenvolvimento de sistemas associados à tecnologia de células a combustível. Os estudos iniciais foram realizados na área de materiais valendo-se da experiência anterior do desenvolvimento da área nuclear.

Os principais objetivos deste programa institucional incluem a geração de conhecimento científico-tecnológico, inovação, e formação de recursos humanos na área de células a combustível. O programa prevê uma atuação institucional, salvaguardando a propriedade intelectual em todo desenvolvimento tecnológico e de inovação. O foco do programa é a geração distribuída de energia elétrica. São também atribuições do programa a participação no grupo de definição da política brasileira para o hidrogênio (MME) e a participação intensiva na organização e operação do PROH2 (MCT).

O organograma do programa está dividido em 4 grupos de desenvolvimento científico-tecnológico, a saber: PEMFC, SOFC, PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO e SISTEMA. Além

disso, o IPEN possui um curso de pós-graduação estruturado na área com oito disciplinas oferecidas.

6. CONCLUSÕES

As tecnologias do binômio hidrogênio e células a combustível têm-se desenvolvido bastante nos últimos anos, encontrando aplicações diversas como geradores de energia para a eletrotração, para unidades estacionárias e para fins portáteis. O grande diferencial é o baixo (ou nenhum) impacto ambiental e a alta eficiência. As células a combustível são os dispositivos mais apropriados para a utilização do hidrogênio como vetor energético.

Os obstáculos à introdução da chamada “Economia do Hidrogênio” não configuram dificuldades intransponíveis. Ao contrário, apontam um elenco de oportunidades para o surgimento no país de novas empresas de bens e serviços, como demonstrado pelas tecnologias emergente do setor.

O desenvolvimento da tecnologia de células a combustível tem crescido nos últimos 40 anos devido a vários fatores, como o desenvolvimento na área de novos materiais e a crescente demanda por fontes de energias limpas e eficientes. Como tecnologia já estabelecida e comerciável, pode-se citar os sistemas de células a ácido fosfórico (PAFC) da empresa UTC. Mas poder-se-á falar de um sucesso econômico real somente quando outros concorrentes oferecerem sistemas semelhantes no mercado. As perspectivas das células de alta temperatura de operação certamente são promissoras, mas ainda não existe nenhuma oferta deste tipo de sistema no mercado em grande escala. A tecnologia de células do tipo PEMFC tem como mercado não apenas aplicações veiculares, como também unidades estacionárias de pequeno e médio porte (residências, hospitais, etc.), além das aplicações portáteis (*laptops e celulares*).

Embora a tecnologia de células a combustível não esteja ainda completamente estabelecida, verifica-se que a sua implementação no mercado não deve tardar, pois já está assegurada em nichos onde o fator meio ambiente é preponderante. Além disso, este energético pode, num médio prazo, dependendo de seu desenvolvimento tecnológico, representar um papel importante no cenário mundial de energia.

As pesquisas em células de energia no Brasil vêm sendo desenvolvidas desde o final da década de 70 em várias instituições [26]. O governo brasileiro iniciou suas ações importantes e concretas na área apenas tardiamente em relação a outros países, em 2002, mas já integra o IPHE, que trabalha para o estabelecimento da “Economia do Hidrogênio” em nossa sociedade.

O Brasil está elaborando seu Roteiro para a “Economia do Hidrogênio” e possui um programa nacional de pesquisa e desenvolvimento para a tecnologia de célula a combustível e hidrogênio. Atualmente, várias instituições brasileiras estão atuando em áreas de pesquisa e desenvolvimento neste setor com vários projetos em andamento. Novas empresas já apresentam produtos para esta nova tecnologia (Electrocell,

Unitech e Novocell, entre outras). O IPEN tem desempenhado um importante papel no cenário nacional para o desenvolvimento desta tecnologia.

A cidade de São Paulo não precisa esperar muito para ver ônibus movidos a células de energia circulando em suas ruas. Um ambicioso projeto de caráter ambiental foi firmado entre a ONU e o governo brasileiro, por intermédio do Ministério de Minas e Energia. Este projeto visa a utilização de vários ônibus movidos a hidrogénio, com eletrotração a PEMFC no transporte coletivo, na cidade de São Paulo.

Todas estas observações levam a afirmação de que a “Economia do Hidrogénio” já foi iniciada, também no Brasil, e não é meramente assunto do futuro.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Rifkin. “A Economia do Hidrogénio”, M. Books, São Paulo, 2003.
- [2] E. Hoffmann Gomes Neto, “Evoluir sem Poluir – A Era do Hidrogénio, das Energias Sustentáveis e das Células a Combustível”, BrasilH2 Fuel Cell Energy, Curitiba, 2005.
- [3] Hydrogen Technologies for Energy Production International Forum. Moscow, Rússia, 6-10 February, 2006.
- [4] HYFUSEN- Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía, 1^{er} Congreso Nacional, Bariloche, Argentina, 8-10 de Junio, 2005.
- [5] PROH2 – Programa Brasileiro de Células a Combustível e Hidrogénio do MCT (www.mct.gov.br), 2002.
- [6] Carl-Jochen Winter, “On Energies-of-Change – The Hydrogen Solution, Gerling Akademie Verlag, München, Germany, 2000.
- [7] C. Marchetti, N. Nakicenovic, “The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model”, International Institute for Applied System Analysis, Austria, 1990.
- [8] F. Barbir, “PEM Fuel Cells – Theory and Practice” Elsevier, Amsterdam, Holland, 2005.
- [9] M. Schneider and A. Froggatt, “The World Nuclear Industry Status Report 2007”, Commissioned by the Greens-EFA Group in the European Parliament, V11, Brussels, London, Paris, January 2008.
- [10] D. D. Macdonald, “Fueling the Hydrogen Economy”, *Materials Today*, p. 64, June 2004.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report, 2000.
- [12] W. Vielstich,; A.Lamm,; H.A. Gasteiger, “Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications”, v.1, England: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [13] H.Wendt, M. Götz e M.Linardi, “Tecnologia de Células a Combustível”, *Qui. Nova*, 23(4) (2000) 538-546.
- [14] A. J. Appleby; F.R. Foulkes. “Fuel Cell Handbook” Van Nostrand Reinhold; New York, EUA, 1989.
- [15] E.A. Ticianelli, G.A.Camara, L.G.R.A. Santos, “Eletrocatalise das Reações de Oxidação de Hidrogénio e de Redução de Oxigênio”, *Quim. Nova*, 28(4) (2005) 664-669.
- [16] M. Linardi, H. Wendt, E.Aricó, “Células a Combustível de Baixa Potência para Aplicações Residenciais”, *Qui. Nova* 25(3) (2002) 470-476.
- [17] Raistrick e colaboradores; Diaphragms, “Separators and Ion Exchange Membranes”, *The Electrochemical Society*, Pennington, NJ, 1986, 172.
- [18] M.S. Wilson, S. Gottesfeld, *J. Appl. Electrochem.*, 22 (1992) 1-7.
- [19] Fuel Cell Seminar 2007, San Antonio, Texas, EUA, November 2007.
- [20] http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=2590
- [21] <http://www.iphe.net/>
- [22] Brazil’s Alternative-Fuel Strategy is model for U.S., 06-May-2005, *The Sun Herald*.
- [23] International Energy Agency 2005.
- [24] Ministério de Minas e Energia, Balanço Energético Brasileiro de 2006.
- [25] I.C Macedo, M.R.L.V Leal, J.E.A. Ramos da Silva, “Assessment of Greenhouse Gas Emissions in the Production and Use of Ethanol in Brazil”, Government of the State of São Paulo, Report of the Secretariat of the Environment, April 2004.
- [26] E. R. Gonzalez, E. A. Ticianelli, “Células a Combustível: Uma Alternativa Promisora para a Produção de Eletricidade”, *Quim. Nova*, 12 (1989) 268-272.