

DO LABORATÓRIO AO MERCADO:
UM ESTUDO COM PILHAS A COMBUSTÍVEL

Gilberto Luiz Vimercati Neto

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Aprovada por:

Prof. Ronaldo Soares de Andrade, Ph.D.

Prof. Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho, D.Sc.

Prof. Cesar Gonçalves Neto, Ph.D.

Prof. Raad Yahya Qassim, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JUNHO DE 2005

VIMERCATI NETO, GILBERTO LUIZ

Do laboratório ao mercado: um estudo com pilhas a combustível [Rio de Janeiro] 2005

XII, 110 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Produção, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Pilha a combustível, 2. Inovação
3. conhecimento científico

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho ou que por meio de ações ou conselhos me ajudaram nesta etapa de evolução profissional.

Desta forma, gostaria de agradecer à toda equipe do laboratório de hidrogênio da COPPE/UFRJ, sob responsabilidade do Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda, que esteve sempre disponível para solucionar todas as dúvidas originadas durante a elaboração deste trabalho relativas à utilização do hidrogênio como vetor energético.

Agradeço também aos engenheiros Alfredo Laufer, da Incubadora Tecnológica da Coppe, e Jorge Lima, do Cepel, por terem fornecido material de pesquisa de grande valor.

Por fim, agradeço a todos os meus familiares pelo apoio ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Entre todos os colaboradores deste trabalho há aqueles sem os quais este trabalho não poderia ser realizado e que, portanto, merecem agradecimentos especiais.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Ronaldo Soares de Andrade, pelas valiosas colaborações e orientações, que me nortearam e que, em momentos cruciais, me motivaram a prosseguir com o trabalho.

Agradeço também ao amigo e doutor Gilmar Clemente Silva, do laboratório de hidrogênio da COPPE/UFRJ, pela ajuda sincera e sempre imediata que facilitou a elucidação de dúvidas referentes ao tema em estudo.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao Prof. Francisco Duarte, cujo coração cruzeirense ora torce pelo rubro-negro, pela acolhida inicial a esta casa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências

DO LABORÁTORIO AO MERCADO: UM ESTUDO COM
PILHAS A COMBUSTÍVEL

Gilberto Luiz Vimercati Neto

Março / 2005

Orientador: Ronaldo Soares de Andrade

Programa: Engenharia de Produção

As pilhas a combustível constituem uma inovação promissora capaz de promover profundas mudanças econômicas, geopolíticas e sociais comparáveis com as alterações promovidas pela maciça adesão ao microcomputador, ocorridas durante o século XX. A sua disseminação e a conseqüente comercialização em massa são eventos aguardados com bastante expectativa, fazendo com que os indivíduos e empresas que estiverem preparados para esta transição possam obter ganhos expressivos com ela. Este trabalho teve como objetivo identificar os mercados e segmentos que seriam mais receptivos a esta tecnologia e entender como ela poderia evoluir do estágio de projetos demonstrativos de laboratórios para práticas correntes do mercado.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

FROM THE LABORATORY TO THE MARKET:
AN ESSAY ABOUT FUEL CELLS

Gilberto Luiz Vimercati Neto

March / 2005

Advisor: Ronaldo Soares de Andrade

Department: Industrial Engineering

Fuel cells are a promising innovation capable of arouse deep changes in Economics, Geopolitics and society, comparable only to the adoption in large scale of the microcomputer occurred during the 20th century. Its dissemination and the consequent mass commercialization are highly expected, so individuals and enterprises have to be ready to explore the opportunities that will arise with this technology. This essay aimed to identify the markets and segments where the fuel cell device would be easily accepted and it tried to understand what it should do to evolve from demonstrative projects in the laboratory to current practices in the market.

	Pág.
Resumo	v
Abstract	vi
Sumário	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Gráficos	xi
Lista de Siglas	xii
Apresentação do Trabalho	1
Introdução	3
1. Fisiologia das Pilhas a	
Combustível	11
1.1. Princípios Básicos de Funcionamento.....	14
2. Tecnologias de Pilhas a	
Combustível	17
2.1. Pilha a Combustível Alcalina.....	18
2.2. Pilha a Combustível de Membrana Polimérica.....	22
2.2.1 Pilha a Combustível de Metanol Direto.....	25
2.3. Pilha a Combustível de Óxido Sólido.....	27
2.4. Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico.....	31
2.5. Pilha a Combustível de Carbonato Fundido.....	34
3. Avaliação da Tecnologia de Pilhas a Combustível segundo a	
Metodologia Proposta pela International Partnership for Hydrogen	
Economy (IPHE)	36
3.1. Geração Estacionária de Energia.....	40
3.1.1 Tipos de Pilha e Combustíveis Utilizados.....	43
3.1.2 Comparação com Outras Tecnologias.....	46
3.2. Transporte.....	53

3.1.1 Tipos de Pilha e Combustíveis Utilizados.....	58
3.1.2 Comparação com Outras Tecnologias.....	59
3.3. Aplicações Portáteis.....	69
3.3.1 Tipos de Pilha e Combustíveis Utilizados.....	71
3.3.2 Comparação com Outras Tecnologias.....	72
3.4. Resumo Comparativo das Aplicações.....	76
4. Pesquisa de Mercado para Aplicações de Pilhas a Combustível em	
Comunidades sem Fornecimento de Energia Elétrica.....	80
4.1. Definição e Caracterização da Aplicação em Análise.....	82
4.2. Metodologia de Avaliação da Utilização de Pilhas a Combustíveis em	
Comunidades Isoladas.....	83
4.3. Identificação de Exigências e Desejos dos Usuários.....	84
4.4. Avaliação de Desempenho das Pilhas a Combustível em Função das	
Necessidades e Desejos dos Usuários.....	91
5. Pesquisa de Mercado para Aplicações de Pilhas a Combustível em	
Comunidades sem Fornecimento de Energia Elétrica.....	97
Conclusão.....	103
Bibliografia.....	106

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	12
Figura 1.2	13
Figura 1.3	15
Figura 1.4	16
Figura 2.1	19
Figura 2.2	23
Figura 2.3	28
Figura 2.4	29
Figura 2.5	35
Figura 3.1	41
Figura 3.2	49
Figura 3.3	55
Figura 3.4	66
Figura 3.5	66
Figura 4.1	84
Figura 4.2	92
Figura 4.3	94
Figura 5.1	97
Figura 5.2	98

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1	24
Tabela 2.2	33
Tabela 3.1	47
Tabela 3.2	50
Tabela 3.3	52
Tabela 3.4	63
Tabela 3.5	68
Tabela 3.6	73
Tabela 3.7	75
Tabela 3.8	79
Tabela 4.1	90
Tabela 4.2	95

	Pág.
Gráfico 2.1	31
Gráfico 3.1	42
Gráfico 3.2	44
Gráfico 3.3	56
Gráfico 3.4	58
Gráfico 3.5	58
Gráfico 3.6	61
Gráfico 3.7	64
Gráfico 3.8	65
Gráfico 3.9	70
Gráfico 5.1	101

- AFC: *Alkaline Fuel Cell*
- ATP: *Advanced Technology Program*
- APD: Assistente Portátil Digital
- DMFC: *Direct Methanol Fuel Cell*
- DOE: *Department of Energy*
- EIA: *Energy Information Administration*
- EUA: Estados Unidos da América
- FCV: *Fuel Cell Vehicle*
- HE: Híbrido Elétrico.
- IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IPHE: *International Partnership for Hydrogen Economy*
- ITSOFC: *Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*
- LDV: *Light Duty Vehicle*
- MCI: Motor de Combustão Interna
- NIST: *National Institute of Standards and technology*
- OCDE: Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento
Econômico
- PAFC: *Phosphoric Acid Fuel Cell*
- PDA: *Portable Digital Assistant*
- PEMFC: *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*
- PTFE: Poli Tetra Flúor Etileno
- SOFC: *Solid Oxide Fuel Cell*
- SPFC : *Solid Polymer Fuel Cell*
- ZEV: *Zero Emission Vehicle*

Apresentação do trabalho

Este trabalho se dispõe a estudar as aplicações para as quais a tecnologia de pilhas a combustível constitui alternativa para o fornecimento de energia elétrica e é capaz de promover benefícios econômicos, ecológicos, geopolíticos e sociais. A partir do entendimento destas utilizações, foi escolhida uma situação onde existe potencial para a utilização deste mecanismo e feita a análise dos requisitos necessários para o desenvolvimento de produtos, exigidos pelos usuários.

Para entender como deverá ocorrer o processo de desenvolvimento de produtos, foi necessário identificar que características deveriam ser privilegiadas e que atributos representariam razão de maior excitação para os usuários. Assim, procurou-se construir um entendimento amplo sobre a tecnologia em questão, desde os seus princípios básicos de funcionamento até o caminho que ela deve percorrer para evoluir do laboratório para o mercado.

Desta forma, procura-se dar um desencadeamento lógico ao trabalho, iniciando-o com as informações básicas do funcionamento das pilhas a combustível e evoluindo até propor o foco para pesquisas a partir de 2005.

Os fundamentos da tecnologia de pilhas a combustível são apresentados no capítulo 1. Elas são mecanismos que convertem a energia química de um redutor, quase sempre o hidrogênio, com o auxílio de um oxidante, usualmente o oxigênio, diretamente em energia elétrica sem a necessidade da passagem pelo ciclo de calor.

Apesar de os princípios serem universais, há diversos tipos de pilhas, que variam conforme o eletrólito utilizado. O capítulo 2 apresenta os diversos tipos de pilha, o modo como cada uma delas funciona e as características de cada um deles. O seu propósito é prover entendimento suficiente a respeito das partes e mecanismos componentes das pilhas para a discussão sobre as aplicações e limitações técnicas que se inicia nos capítulos subseqüentes.

O capítulo 3 inicia a avaliação da tecnologia. Desta forma, é feita a comparação ente as diferentes fontes de energia, utilizando a metodologia proposta pela IPHE (*International Partnership for Hydrogen Economy*), igualmente apresentada no capítulo. O potencial das aplicações das pilhas é analisado detalhadamente para as três principais áreas de aplicação de pilhas a combustível: a geração estacionária de energia e as aplicações nas indústrias automotiva e de eletroeletrônicos.

O capítulo 4 traz a discussão sobre o desenvolvimento de produtos, iniciando com uma revisão de modelos propostos para este fim, em especial o proposto pelo instituto norte-americano de padrões e tecnologias (NIST – *National Institute of Standards and Technologies*) para o desenvolvimento de tecnologias avançadas. Este capítulo prossegue até o levantamento das necessidades e desejos da comunidade isolada de Marujá, localizada no estado de São Paulo. Esta comunidade foi escolhida porque possui um perfil de consumo energético claramente definido, o que permitiu identificar suas exigências e fatores de excitação e de desempenho relacionados ao fornecimento de energia elétrica. A partir destes, foram estabelecidos os atributos requeridos para o desenvolvimento de produtos que utilizam pilhas a combustível e feita a análise da adequação desta tecnologia face aos requisitos dos usuários.

Por fim, o capítulo 5 tem por finalidade sugerir um encaminhamento para o desenvolvimento de uma aplicação para a pilha a combustível que atendesse a uma demanda real, ainda que isto ocorresse por meio de um protótipo. Desta forma, neste capítulo será detalhado os equipamentos e componentes necessários para a montagem de um sistema de fornecimento de energia elétrica para a comunidade de Marujá, cujas necessidades já terão sido detalhadas no capítulo anterior. Além disso, será realizada uma rápida abordagem das principais barreiras e um prognóstico do desenvolvimento futuro da tecnologia.

Assim, o trabalho se inicia com uma revisão de como funcionam as pilhas a combustível e do seu estágio de desenvolvimento em 2004 e prossegue com a aplicação da metodologia sugerida pela IPHE visando a identificar pontos fortes e fracos em relação a outras tecnologias, bem como barreiras e prioridades na evolução desta ao mercado. Por fim, é estabelecido um paralelo com metodologias de desenvolvimento de produtos, em especial a proposta pelo instituto norte-americano de padrões e tecnologias (NIST – *National Institute of Standards and Technologies*) para o desenvolvimento de tecnologias avançadas, a fim de se entender qual seria o melhor nicho de mercado tanto em termos de receptividade - dado se as características destas atendem às necessidades dos usuários – quanto em relação aos benefícios sociais potenciais gerados pela sua utilização.

Introdução

O desenvolvimento de produtos é tema recorrente na engenharia de produção. Entretanto, quando o assunto envolve a geração de inovações com base no conhecimento científico ou, mais especificamente, o caminho que uma descoberta científica deve fazer para migrar do laboratório para o mercado, a literatura disponível é significativamente menor. Desenvolver uma inovação a partir de um conhecimento científico significa efetuar todo o processo de transição do estado da arte para o estado da técnica e depois, se for o caso, para o estado das práticas. Dentro deste contexto, as pilhas a combustível aparecem como caso interessante a ser estudado. Tendo evoluído do estado da arte para o estado da técnica, esta tecnologia se encontra no último estágio antes da entrada definitiva no mercado, necessitando superar os obstáculos comuns desta fase, em especial encontrar um nicho que a incorpore bem e aceite pagar um prêmio extra por ela e que abra caminhos para produção e comercialização consistentes.

Contribuem para o interesse por esta tecnologia e seu conseqüente avanço a alta do preço do petróleo no mercado internacional, registrada em 2004, decorrente das tensões vividas no Oriente Médio desde a invasão norte-americana no Iraque em 2002, e a permanente preocupação com o fim do petróleo. Apesar de não haver consenso sobre o ano em que as reservas de petróleo se esgotarão, há a certeza de que, por ser um recurso energético não renovável, o petróleo terá fim. Isto faz com que o fim do petróleo, ainda que seja incerto quanto ao momento em que ocorrerá, seja um evento aguardado e intensamente debatido por especialistas de diversas áreas.

Para se lidar com a questão, uma das técnicas mais utilizadas é a de cenários, que são constantemente elaborados com o intuito de se determinar o momento em que o pico da produção de petróleo será alcançado. Por pico da produção de petróleo, entende-se o momento “quando cerca de metade das reservas mundiais de petróleo, consideradas recuperáveis, houver sido explorada” (RIFKIN, 2003 pg.14).

Os cenários refletem as expectativas dos analistas que os formulam e, por isso, podem ser otimistas ou pessimistas. Também podem ser eventualmente modificados conforme novos eventos envolvendo a descoberta de novas jazidas, o desenvolvimento de tecnologia de exploração e o ritmo de consumo mundial alteram as expectativas de produção e consumo.

Para a construção de um cenário, três dados se fazem necessários: a produção cumulativa, a estimativa das reservas globais e uma projeção do petróleo recuperável ainda a ser descoberto. A partir dessas informações, subtrai-se a produção cumulativa das reservas globais e soma-se ao resultado a quantidade de petróleo recuperável que ainda se espera encontrar. Então, procura-se metade desse total numa curva de consumo, onde o eixo das abscissas indicará o ano do pico da produção.

A produção cumulativa refere-se ao quanto de petróleo foi produzido mundialmente até a data da confecção do cenário e é o único dado que pode ser determinado com relativa exatidão. “As “reservas” são a quantidade conhecida de petróleo nas jazidas, que pode ser explorada com a tecnologia existente, dentro de um prazo previsível e a um custo comercialmente viável” (RIFKIN, 2003 pg.15). Como tanto as reservas já identificadas quanto as que são esperadas serem descobertas envolvem estimativas e previsões, é natural que análises que utilizam cenários envolvam um significativo grau de subjetividade em função do interesse dos seus autores, assumindo desta forma perfis otimistas ou pessimistas.

O mesmo autor apresenta alguns exemplos de cenários dentre os quais: um considerado pelo autor como otimista, desenvolvido pela Administração de Informações Energéticas (*Energy Information Administration* – EIA) do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (EUA); e outro, considerado pessimista, elaborado pela Agência Internacional de Energia da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE).

No cenário otimista desenvolvido pela EIA, o máximo da produção ocorrerá por volta do ano de 2037. Entretanto, no cenário pessimista, elaborado pela Agência Internacional, o máximo ocorrerá em algum momento entre 2010 e 2020. Como esses dois trabalhos refletem as posições de otimistas e pessimistas, é possível afirmar que as expectativas quanto ao esgotamento das reservas de petróleo variam dentro de uma faixa temporal de apenas 20 anos.

Por isso, independente da discussão sobre qual corrente está certa, há a necessidade de se encontrar alternativas que substituam o petróleo. A complexidade dessa busca ocorre devido à grande influência que o mineral exerce sobre as atividades humanas. A sua presença em muitas das atividades humanas exige que sejam encontradas diversas soluções, de modo que para cada uma de suas aplicações seja encontrado um substituto.

Dentre as suas principais aplicações destacam-se duas das mais importantes atividades para o sustento da sociedade: a geração de energia e a agricultura. Na primeira, a sua presença é facilmente detectada na geração de combustíveis para transporte e aquecimento. Na segunda, como matéria-prima para a produção de defensivos agrícolas, é o responsável pelo aumento de produtividade no campo que permite o aumento da disponibilidade de alimentos.

Bastariam estas duas aplicações para afirmar que muitos dos avanços tecnológicos e sociais do século XX só foram possíveis graças ao excedente de energia proporcionado pela mudança da composição da matriz energética humana, que deixara de ser baseada no carvão e tornara-se dependente do petróleo como principal fonte de energia. No entanto, a influência da indústria petrolífera foi tão grande no último século que ela chegou a impor à sociedade sua estrutura altamente hierarquizada. Além disso, o autor acrescenta que a própria globalização representa o estágio final da era dos combustíveis fósseis.

Em resumo, a substituição do carvão pelo petróleo como principal fonte de energia permitiu a liberação de recursos antes vinculados a atividades obsoletas e proporcionaram o aparecimento de novas atividades de produção.

Entretanto, em decorrência destas novas atividades, as sociedades humanas tiveram sua complexidade aumentada, o que por sua vez implicou o aumento da demanda de energia para a sua manutenção. Por isso, é coerente afirmar que a exaustão das reservas acarretará mudanças significativas no modo de vida das populações humanas.

Odom (1971 apud Rifkin, 2003), resume essa idéia de desenvolvimento e dependência de uma fonte de energia que existem concomitantemente nas sociedades humanas:

“Todo progresso se deve a subsídios especiais de força, e se evapora sempre e onde quer que esses subsídios sejam eliminados. O conhecimento e a engenhosidade são os meios para aplicar os subsídios de força quando estes estão disponíveis, e o desenvolvimento e a retenção deste conhecimento dependem igualmente da disponibilidade de força” (pg.40).

Impactos sociais, ambientais, econômicos e geopolíticos são esperados em decorrência da mudança à qual a humanidade estará obrigada a fazer em sua matriz energética. Com isto, a questão da determinação da data de pico adquire importância no contexto de desenvolvimento de soluções. Um esgotamento súbito das reservas, como

sugerem os pessimistas pode levar ao colapso da sociedade, uma vez que seriam eliminados os subsídios de força, ameaçando os avanços e a complexidade obtidos no último século. Racionamentos severos, elevação acentuada dos custos de produção e de vida, retração da atividade econômica e desemprego em massa podem ser algumas das conseqüências da escassez de energia, caso soluções que visem a suprir a demanda energética não sejam desenvolvidas.

Por outro lado, caso as alternativas energéticas estejam maduras no momento do pico da produção, a substituição das estruturas organizacionais caras e altamente hierarquizadas por outras descentralizadas permite supor que haverá espaço para novos avanços sociais, com a disseminação dos subsídios de força e, com isso, do progresso gerado por eles para comunidades excluídas durante a era dos combustíveis fósseis.

A opção pelo gás natural apenas garantiria uma sobrevida de uns poucos anos, visto que os mesmos estudos indicam que as reservas desta fonte seriam rapidamente exauridas. Com isso, as possibilidades tecnológicas apontam as fontes renováveis como sendo as principais candidatas a substituir os combustíveis fósseis na matriz energética, “a aposta é que o consumo de energias vindas de fontes renováveis se amplie” (SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, 2003 p.71). Os biocombustíveis, as energias solar e eólica e as células a combustível são algumas das opções existentes até 2005. Em relação a estas últimas, deve-se observar que, apesar de o principal combustível empregado até 2005 ser o gás natural (um combustível fóssil não renovável), o potencial de geração de energia a partir de fontes renováveis de hidrogênio coloca esta tecnologia entre as fontes renováveis de energia.

Outra opção é a utilização da radiação proveniente da luz solar. A energia solar pode ser transformada em eletricidade por meio de células fotovoltaicas ou transformada em calor por meio de coletores solares. É uma tecnologia limpa, pois não gera gases do efeito estufa, confiável e que requer o mínimo de manutenção para operar. No entanto, sua eficiência em campo depende de fatores ambientais e, mesmo em locais com adequada incidência de raios solares, ainda está longe da obtida em laboratório. Além disso, o seu custo ainda é alto o que a torna economicamente inviável.

Ao contrário da energia solar, a eólica era considerada em 2004 a alternativa mais próxima da viabilidade econômica dentre as fontes renováveis. Embora ainda possua uma pequena participação na oferta mundial de eletricidade, a produção de energia por meio de turbinas eólicas tem crescido a uma taxa média de 30% ao ano, o

que tem contribuído para o desenvolvimento da tecnologia, que já conta com turbinas com capacidade de geração superior a 2 MW (AVADIKYAN *et al.*, 2003). As limitações dessa fonte envolvem a necessidade de grandes áreas livres para a instalação das turbinas e a disponibilidade de ventos em velocidade adequada. O Brasil vive uma situação muito peculiar em relação à utilização da energia eólica, pois possui condições propícias para a tecnologia. Testes realizados no país indicam que o “fator de capacidade”, que é o índice técnico usado para medir o rendimento dos locais onde se instalam os geradores, alcança 37%, o que é bastante elevado, principalmente se comparado ao de outros países, como, por exemplo, a Alemanha, cujo fator de capacidade é de apenas 26%. Com isso, estima-se que o potencial eólico do país seja de 143 mil megawatts (SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, 2003).

Mas, dentre todas as fontes renováveis, a mais promissora é o hidrogênio. Neste caso, a consideração do hidrogênio como fonte renovável de energia depende do combustível empregado para extraí-lo. Quando produzido a partir de combustíveis não renováveis (gás natural e derivados de petróleo), ele não constitui uma fonte renovável de energia. Entretanto, sendo obtido por meio de eletrólise da água ou por qualquer outro método que empregue um recurso renovável, pode-se considerá-lo como fonte renovável de energia.

A conversão do hidrogênio em energia mecânica ou elétrica é possível por meio de:

- Conversores tradicionais (motores térmicos ou turbinas) que podem ser facilmente adaptados para o uso do hidrogênio, mantendo o mesmo desempenho dos combustíveis tradicionais;
- Pilhas a combustíveis.

No primeiro caso, a conversão ocorre com a utilização de geradores elétricos acoplados a motores de combustão interna ou turbina a gás, ou ainda pela produção de vapor que é utilizado para a movimentação de turbinas.

Já as pilhas a combustível se destacam por serem “dispositivos capazes de converter diretamente em eletricidade a energia química de um combustível, sem a passagem pelo ciclo do calor, efetuando-se um processo inverso ao da eletrólise” (SAMPAIO, 2001 pg.13), empregando hidrogênio e oxigênio como reagentes e produzindo eletricidade e vapor d’água como produtos finais.

Isto significa que geram energia eletroquimicamente e não queimam combustível. Com isso, consegue-se obter índices de eficiência muito maiores do que

os sistemas a combustão. Em alguns casos, a eficiência de um sistema elétrico de uma pilha a combustível pode chegar a 50% e acredita-se que os sistemas híbridos em desenvolvimento alcançarão eficiência ainda maior (AVADIKYAN et al., 2003).

Além disso, constituem uma tecnologia confiável e independente das condições meteorológicas das regiões onde são instaladas. O que a torna tão especial em relação às demais fontes renováveis é que seu potencial supera simplesmente o de substituição do petróleo. Aplicações para elas hoje são concebíveis tanto em áreas que ainda utilizam combustíveis fósseis, como a geração estacionária e a indústria automobilística, quanto em setores que não utilizam o petróleo diretamente, como a indústria de eletroeletrônicos portáteis. Além disso, a sua utilização tende a se expandir para outras áreas, alcançando ramos como a robótica e a indústria de eletrodomésticos.

Na geração estacionária de energia, apresentam a possibilidade de alterar a lógica do setor elétrico, transformando os consumidores em produtores e obrigando que as empresas revejam seus processos de negócio. Na indústria automotiva, espera-se que se tornem uma alternativa ambiental de baixo custo. Finalmente, sua flexibilidade permite que sejam desenvolvidas aplicações para as quais as demais fontes renováveis encontrariam dificuldades de adaptação, permitindo a sua aplicação na indústria de eletroeletrônicos, por exemplo, em baterias para equipamentos portáteis, tais como computadores e telefones celulares.

Além disso, oferecem inúmeras vantagens do ponto de vista ambiental, pois produzem água, calor e eletricidade como únicos produtos de sua operação. Mesmo quando são usados reformadores para gerar hidrogênio a partir de outros hidrocarbonetos, gerando, com isso, CO₂, a eficiência de quase o dobro dos processos que utilizam combustão, permite reduzir as emissões em quase pela metade.

Entretanto, assim como as demais fontes renováveis de energia, também possuem limitações. A principal refere-se ao custo do kW. Tanto que as empresas envolvidas com o seu desenvolvimento reconhecem que a competição com as demais tecnologias será centrada muito mais nos retornos financeiros do que nas vantagens técnicas proporcionadas.

Desta forma, não se espera que a sua entrada no mercado ocorra na geração distribuída de energia, um setor onde motores de combustão interna e turbinas a gás ainda são muito competitivos e atraentes, mas sim, em aplicações remotas como computadores portáteis e telefones celulares, onde a bateria de lítio utilizada possui um alto custo por kW.

Outras barreiras que retardam sua chegada ao mercado são as dificuldades técnicas existente na produção, armazenagem e transporte do hidrogênio, além de eventuais barreiras culturais que possam existir nas comunidades usuárias.

Apesar de se acreditar que o átomo hidrogênio represente 90% dos átomos existentes no universo (SAMPAIO, 2001), no estado livre, é um dos de menor ocorrência em estado livre na Terra, ou seja, apesar de ser facilmente encontrado na composição de quase todo tipo de matéria, dificilmente ele é encontrado na sua forma pura, adequada para a utilização em pilhas a combustível. Isto faz com que ele não seja encontrado em jazidas, obrigando que sua produção ocorra a partir de outras fontes. Uma vez obtido, ele será disputado por diversas indústrias, tais como a de fertilizantes derivados de amônia e a de óleos orgânicos comestíveis hidrogenados. Aumentar a capacidade mundial de produzir hidrogênio de forma que a oferta seja suficientemente grande para atender toda uma nova indústria torna-se uma condição básica para a entrada da nova tecnologia.

O armazenamento do hidrogênio também constitui um desafio a ser transposto para que as pilhas a combustível se tornem competitivas. As dificuldades de se avaliar alternativas começam com a necessidade de se determinar a quantidade a ser estocada. Grandes estoques provavelmente poderão utilizar técnicas que não sejam tão atraentes para pequenas quantidades. Desta forma, é possível que se tenha mais de uma forma de estocagem co-existindo dentro da cadeia de produção. Além disso, diversas alternativas ainda competem, dificultando as avaliações sobre quais serão as predominantes.

Da mesma forma, a questão do transporte também se encontra indefinida, com técnicas diferentes concorrendo entre si. Alleau em (AVADIKYAN *et al.*, 2003) argumenta que provavelmente, quando a rede de distribuição do hidrogênio estiver bem desenvolvida, o modo de transporte selecionado será o de tubos pressurizados. No entanto, para que isso ocorra, será necessária a implantação de uma vasta rede que permita que o gás, ou a fonte da qual ele se originará, chegue até o local de consumo.

A *International Partnership for Hydrogen Economy* (IPHE) entende que para identificar prioridades e potenciais barreiras a serem vencidas no desenvolvimento da tecnologia de pilhas a combustível é necessário que seja feito o levantamento comparativo de cadeias de energia oriundas de diferentes fontes, observando critérios como: eficiência, custo, emissão de gases do efeito estufa, impactos ambientais e econômicos, segurança e aceitação social (IPHE, 2004). No entanto, essa proposta

metodológica ainda necessita da realização de um número maior de trabalhos capazes de lhe dar respaldo.

Para a avaliação do desenvolvimento de produtos, é estabelecido um paralelo com metodologias desenvolvidas para este fim, em especial a proposta pelo instituto norte-americano de padrões e tecnologias (NIST – *National Institute of Standards and Technologies*) para o desenvolvimento de tecnologias avançadas. O objetivo é entender qual seria o mercado mais receptivo à introdução da tecnologia de pilhas a combustível, pois há uma distância significativa entre a criação de um conceito técnico com potencial para comercialização e o estabelecimento do projeto e dos processos. Assim, a constante busca pelo perfeito desempenho técnico por parte do cientista deve ser trabalhada em conjunto com as exigências e requisitos do mercado captados pelo departamento de marketing.

Este trabalho de conjugação de desempenho técnico com exigências e requisitos do mercado, no entanto, não é trivial. Em boa parte porque as equipes responsáveis por cada parte do desenvolvimento não compartilham valores e objetivos. A falta de compreensão por parte de uma delas dos interesses da outra pode implicar o fracasso do projeto. Neste ponto, torna-se necessário que interesses técnicos e comerciais sejam equilibrados.

O caso do desenvolvimento de produtos baseados em pilhas a combustível é um exemplo típico de uma situação onde a tecnologia em estágio laboratorial necessita que sejam encontradas soluções para algumas de suas barreiras técnicas para que ela possa evoluir para o estágio comercial. Portanto, analisá-lo resulta em referência para outras tecnologias.

1. Fisiologia das Pilhas a Combustível

Inicialmente convém esclarecer a diferença entre os termos célula a combustível e pilha a combustível uma vez que ambos aparecem com frequência na literatura disponível em português. Segundo o Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda, responsável pelo laboratório de hidrogênio da COPPE, a utilização do termo célula surge como uma tradução imediata do termo inglês *Fuel Cell*. Ainda que não esteja errada, a idéia de célula de energia remete a um dispositivo que consome energia, sendo portanto inadequado. Por sua vez, o conceito de pilha sugere um mecanismo capaz de gerar energia, sendo mais apropriado para o trabalho¹.

Desta forma, as pilhas a combustível se destacam por serem “dispositivos capazes de converter diretamente em eletricidade a energia química de um combustível, sem a passagem pelo ciclo do calor, efetuando-se um processo inverso ao da eletrólise” (SAMPAIO, 2001 pg.13), empregando hidrogênio e oxigênio como reagentes e produzindo eletricidade e vapor d’água como produtos finais.

Em outras palavras, promovem a reação de H_2 com O_2 , convertendo energia química em energia elétrica e gerando água e calor como únicos subprodutos além da corrente elétrica. Por isso pode-se afirmar que o seu funcionamento é muito semelhante ao das pilhas comuns. No entanto, elas se diferenciam destas últimas pelo fato de possuírem uma vida útil teórica infinita (PAULA, 2003). Isto é, enquanto uma pilha comum consome seus eletrodos durante sua operação, o que limita a sua vida, a pilha de hidrogênio pode, em tese, produzir energia para sempre desde que seja alimentada com os reagentes.

As possibilidades oferecidas por esta tecnologia são diversas, intervindo a seu favor o fato de ser uma alternativa limpa, silenciosa e eficiente de geração de energia. Entretanto, como a maioria das novas tecnologias, há um número grande de questões a serem resolvidas antes de sua entrada no mercado, entre elas: o produto não ter atingido um nível técnico maduro, as complexidades da engenharia dos sistemas e as dúvidas quanto a sua durabilidade e confiabilidade. Estas dificuldades acabam sendo refletidas em um alto custo de capital, na ausência de uma infra-estrutura de apoio e no grande risco técnico incorrido por aqueles que adotam a tecnologia em seus estágios iniciais (ENERGY NEXUS GROUP, 2002).

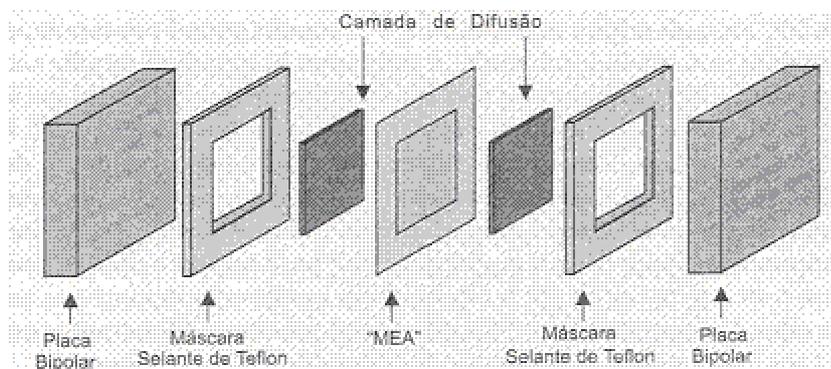
¹ Informação obtida em reunião realizada no dia 15/04/05.

Há diversos tipos de pilhas a combustível, sendo o nome de cada uma delas atribuído em função do eletrólito empregado. Desta forma, os principais tipos de pilha a combustível são:

- Alcalina (*Alkaline Fuel Cell – AFC*);
- de Membrana Polimérica (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC*);
- de Óxido Sólido (*Solid Oxide Fuel Cell – SOFC*);
- de Carbonato Fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC*);
- de Ácido Fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC*).

Todas são formadas por dois eletrodos (um ânodo e um cátodo) e um eletrólito. Entretanto, como a energia gerada por uma única pilha é muito pequena, torna-se necessário acoplar várias pilhas, formando um módulo, geralmente presente em todos os sistemas, chamado de Módulo da Pilha a Combustível (ou pelo termo inglês *stack*). Além dele, também é comum haver o complemento de processadores de combustíveis, que extraem o hidrogênio do combustível original, condicionadores de potência (*power conditioner*), que transformam a energia elétrica gerada em corrente alternada e o módulo de controle e integração compostos por sensores, controladores etc. Esses subsistemas incluem os compressores, conversores de energia e demais equipamentos que compõem os sistemas de geração de energia a partir de pilhas a combustível. A Figura 1.1 mostra uma pilha a combustível.

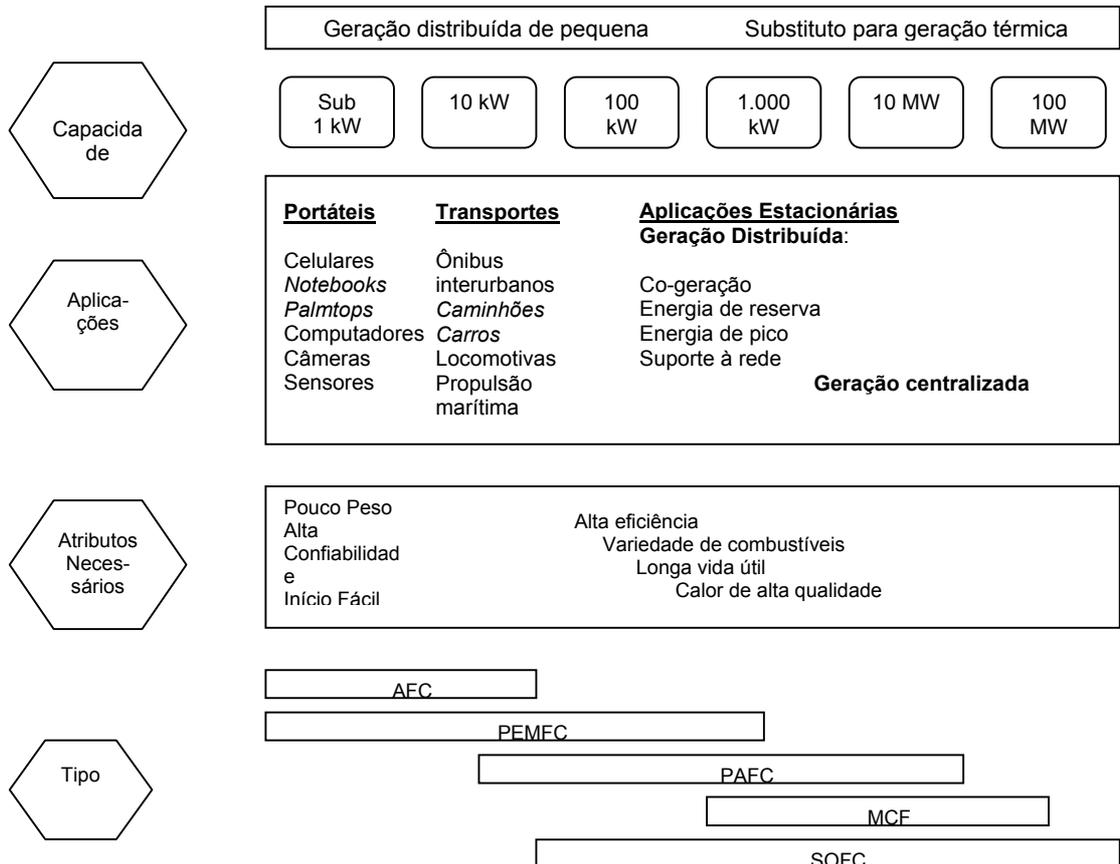
Figura 1.1 Pilha a combustível



Fonte: Miranda *et al.* (2003)

Como as características de cada pilha variam em função do seu tipo, é razoável que cada tipo seja mais adequado para uma determinada aplicação. A Figura 1.2 apresenta os campos de aplicação por tipo de pilha a combustível.

Figura 1.2 Campos de Aplicação por Tipo de Pilha a combustível



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Avadikyan (2003)

1.1 Princípios Básicos de Funcionamento

O funcionamento de uma pilha a combustível é baseado na conversão direta da energia química do combustível em eletricidade através de reações de oxidação e redução, sem que ocorra combustão. Esse processo, inverso ao da eletrólise da água, obedece à reação química global, apresentada pela Equação 1:



Essa reação ocorre dentro de uma estrutura composta de dois eletrodos (ânodo e cátodo) separados por um eletrólito. Em cada eletrodo ocorre uma etapa desta reação. No ânodo, cada átomo de hidrogênio perde um elétron, adquirindo a forma catiônica H^+ . Os elétrons que são liberados no ânodo migram por um circuito externo, gerando uma corrente elétrica, e retornam à pilha pelo cátodo para combinar com o oxigênio. No cátodo, cada átomo de oxigênio ganha 2 elétrons, assumindo a forma aniônica O^{2-} . Em geral, o íon H^+ migra pelo eletrólito até o cátodo para reagir com o O^{2-} , exceto nas pilhas de óxido sólido e de carbonato fundido, onde são os ânions de oxigênio que migram para encontrar a molécula de hidrogênio.

Esse processo pode ocorrer dentro de um espectro amplo de temperaturas, que varia entre 70 °C e 1.000 °C, e que, por isso, acarreta reações químicas intermediárias diferentes, o que origina diferentes tipos de pilhas a combustível, sem que, no entanto, seu princípio básico de funcionamento seja alterado.

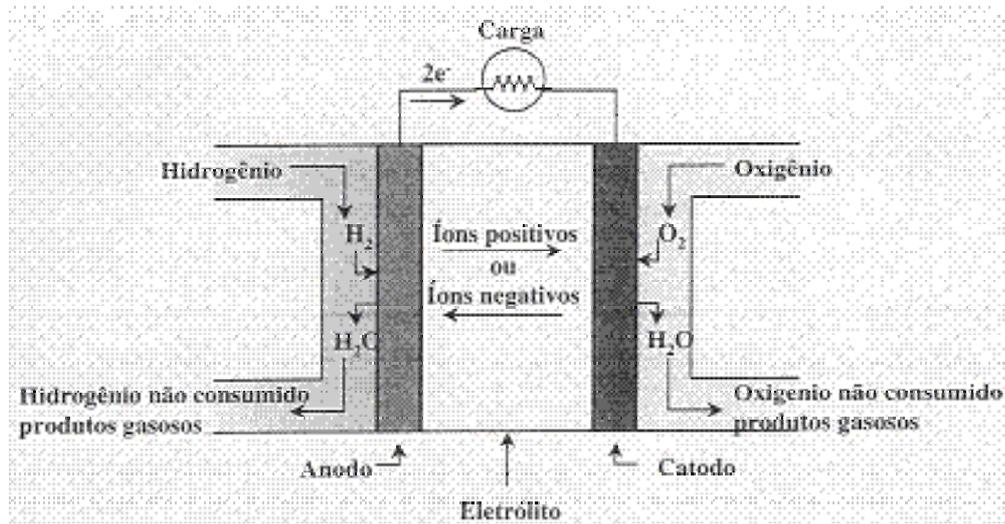
Além dos eletrodos onde se processam as reações, a montagem de uma pilha a combustível envolve uma entrada para alimentação de hidrogênio junto ao ânodo, catalisadores, um eletrólito, uma entrada para alimentação de oxigênio junto ao cátodo e saída para os subprodutos, que são eletricidade, calor e água na forma líquida ou vapor, e para o excesso de reagentes. Um esquema básico de uma pilha a combustível é apresentado na Figura 1.3.

Os eletrodos, feitos de material poroso e revestidos por catalisadores, possuem como funções: catalisar as reações de ionização e deionização dos reagentes, conduzir os elétrons liberados nas reações e servir de barreira para que os gases migrem de um lado para outro antes de ocorrer a reação (PAULA, 2003).

O eletrólito, que pode ser líquido ou sólido, é o meio condutor iônico. Ele é o responsável pelo transporte de reagentes dissolvidos e cargas iônicas entre os eletrodos,

além de vedar a passagem das correntes gasosas de oxidante e combustível, evitando um contato direto. O eletrólito utilizado na montagem de uma pilha determinará o tipo de pilha com que se está trabalhando.

Figura 1.3 Esquema Básico de uma Pilha a Combustível



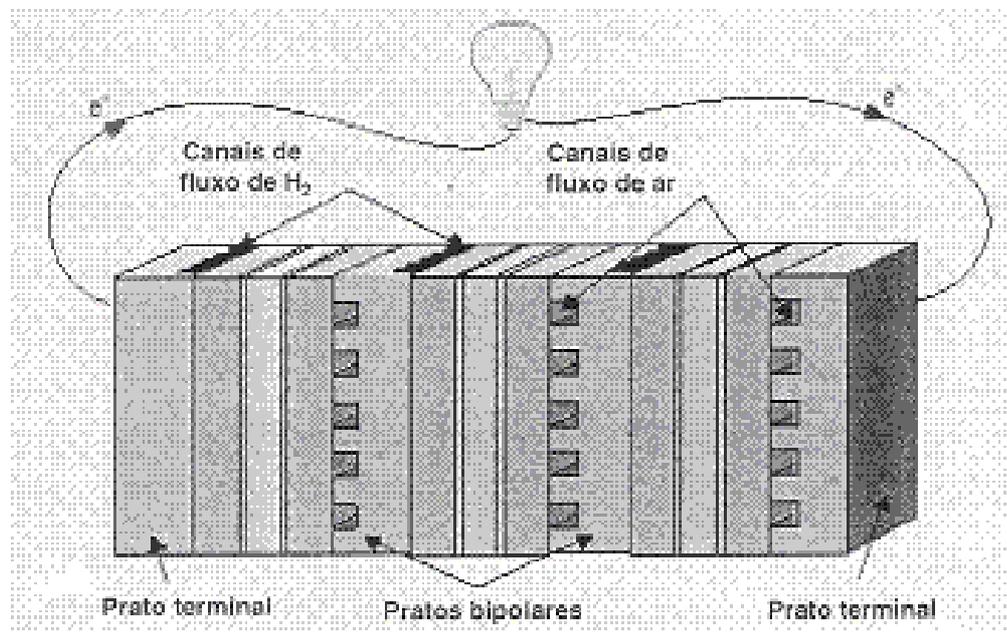
Fonte: Energy Center of Wisconsin apud Paula (2003)

Uma única célula, em teoria, pode gerar uma diferença de potencial em torno de 1,18 V apenas. Para tornar a viável a sua utilização é necessário conectar várias pilhas em série, formando um módulo. A Figura 1.4 apresenta um módulo formado a partir da conexão de três pilhas. Esses módulos, por sua vez, também podem ser conectados aumentando ainda mais a potência gerada.

Para se determinar o tipo de pilha a ser utilizado em determinado projeto é importante que o usuário avalie as diversas tecnologias disponíveis segundo alguns critérios tais como:

- Temperatura de operação: a escolha terá impacto no tempo de início de funcionamento da pilha e no desejo ou não de se aproveitar o calor produzido;
- Vida útil: pilhas que utilizam eletrólitos sólidos tendem a ter vida útil maior do que as que utilizam eletrólitos líquidos;
- Restrições de corrente e tensão: dependendo da aplicação para a qual se deseja a pilha, se fixa ou móvel, as escolhas deverão ser diferentes;
- Estágio de desenvolvimento: os diferentes tipos de pilha se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento.

Figura 1.4 Módulo de Pilhas a Combustível



Fonte: Thomas e Zalbowitz apud Paula (2003)

2. Tecnologias de Pilhas a Combustível

Apesar de os fundamentos da tecnologia serem os mesmos, as características de cada tipo de célula variam devido às diferenças de materiais usados no eletrólito. Desta forma, diferentes situações poderão criar condições para a utilização de diferentes tipos de pilha. Por isso, a descrição dos tipos de pilhas existentes torna-se necessária para o entendimento da adequação de cada uma delas para as suas potenciais aplicações.

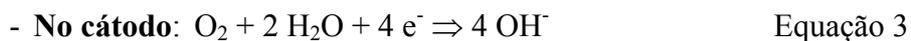
Este capítulo trata, portanto, da caracterização e do detalhamento dos tipos de pilha existentes até 2005. Para isso, três publicações foram consultadas como principais referências bibliográficas descritivas da tecnologia: a tese de mestrado de Paula (2003) o *Fuel Cell Handbook* (2000), publicado pelo departamento de energia dos Estados Unidos e o livro *Fuel Cell Systems* de Blomem (1993).

Dois problemas são comuns aos diferentes tipos no estágio de desenvolvimento registrado no início de 2005: a reduzida vida útil das pilhas e a existência de elementos contaminantes que prejudicam o desempenho deste dispositivo. Em relação à vida útil, os melhores desempenhos em testes em laboratório até 2003 registravam 10.000 horas de funcionamento para aplicações de geração estacionária de energia, enquanto que o necessário estimado seria 40.000 horas de funcionamento. Quanto aos contaminantes, alguns compostos à base de nitrogênio e enxofre prejudicam o desempenho da tecnologia, obstáculo que dificulta a sua disseminação.

2.1 Pilha a Combustível Alcalina (*Alkaline Fuel Cell* – AFC)

A pilha a combustível alcalina é composta por uma ou mais células que utilizam eletrólito líquido composto por uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH). Este foi um dos primeiros tipos de pilhas a combustível estudados e desenvolvidos e foi o primeiro a alcançar com sucesso uma aplicação comercial, ainda que num ambiente muito específico, o programa de missões espaciais dos Estados Unidos.

Para o seu funcionamento, é necessário o fornecimento de hidrogênio puro como combustível e oxigênio ou ar, como oxidante. O hidrogênio chega ao ânodo e reage com o íon hidroxila (OH^-) formando água e liberando elétrons que saem por um circuito externo, enquanto que, no cátodo, o oxigênio reage com a água e mais os elétrons que chegam do circuito, e forma íons hidroxila. As reações que ocorrem na pilha a combustível alcalina são descritas pelas Equações 2 e 3:



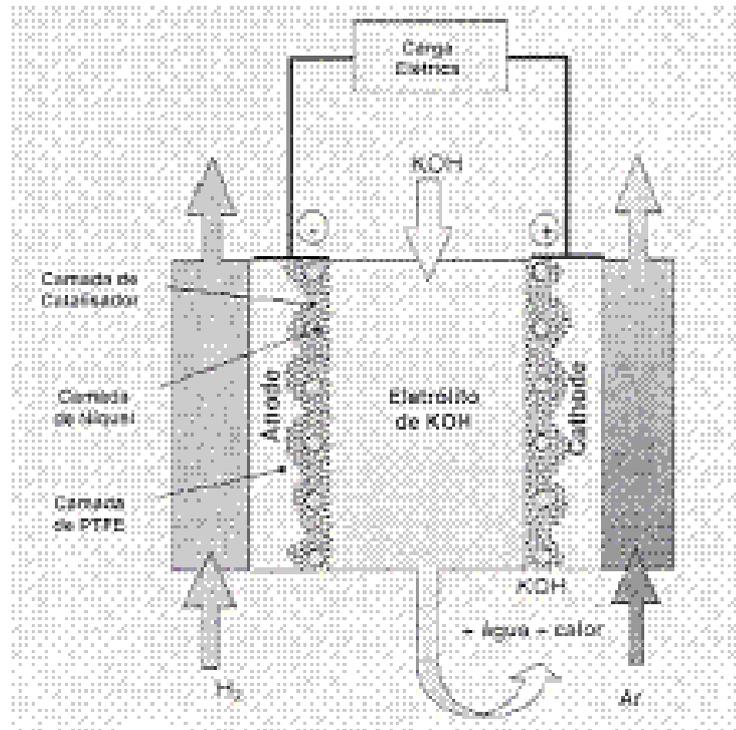
Uma de suas características é o fato de poder operar em duas faixas de temperatura: na primeira, até 120 °C, a solução aquosa de KOH pode ter uma concentração de 30 a 50% em peso; e na segunda, onde a concentração será de 85% em peso, as pilhas projetadas poderão trabalhar até 260 °C.

Para isto, o tipo e o processo de manufatura de ânodos, bem como cátodos, para pilhas a combustível alcalinas serão diferentes em cada caso e as decisões estarão condicionadas à escolha do catalisador. Mas, independentemente do tipo usado, fica claro que há alguns requisitos gerais para os eletrodos:

1. Boa condutividade eletrônica, para reduzir as perdas ôhmicas;
2. Adequada estabilidade mecânica e porosidade apropriada;
3. Estabilidade química no ambiente do eletrólito alcalino;
4. Estabilidade eletroquímica com o tempo, o que significa estabilidade dos catalisadores e da forma como estes são incorporados aos eletrodos.

A Figura 2.1 mostra o diagrama esquemático de uma pilha a combustível alcalina.

Figura 2.1 Diagrama Esquemático de uma Pilha a Combustível Alcalina



Fonte: McLean, Niet e Prince-Richard em Paula (2003)

Geralmente, os eletrodos consistem em algumas camadas de materiais com diferentes porosidades, sendo uma de material orgânico poroso e hidrofóbico, para evitar que o eletrólito migre de encontro aos gases, e outra feita de uma mistura de negro de fumo, catalisador e um polímero fluorado (poli tetra flúor etileno – PTFE). O catalisador é feito geralmente de ligas de níquel, mas também é comum o uso de outros metais nobres.

As áreas de aplicação para as pilhas a combustível alcalinas se tornarão acessíveis a esta tecnologia devido às suas características operacionais que proporcionarão vantagens além daquelas comuns a todos os outros tipos de pilha.

As vantagens oferecidas pelas pilhas alcalinas incluem: alta taxa de eficiência na conversão de energia, baixas temperaturas de operação e rápido início de operação. Com isso, os potenciais mercados para a utilização desta tecnologia seriam as indústrias

aeroespacial, de defesa, automobilística e de aplicações estacionárias, ainda que em cada uma delas haja disputa com outras tecnologias e que as pilhas alcalinas não sejam sempre as melhores opções.

A indústria aeroespacial talvez seja o campo de aplicação mais bem conhecido das pilhas a combustível alcalinas, uma vez que a sua utilização no programa espacial americano foi sua primeira utilização. Para esta indústria, as principais vantagens obtidas pela utilização destas pilhas são a alta tensão, a alta eficiência elétrica das células, em torno de 40%, e o rápido início de operação.

Para esta finalidade, os principais requisitos exigidos das pilhas a combustível são: confiabilidade, pouco peso e pequeno volume. Para atingir os objetivos de desempenho requeridos, são usadas grandes quantidades de catalisadores, diminuídas as dimensões da pilha, além da utilização de oxigênio puro como oxidante. Os reagentes puros, oxigênio e hidrogênio, são levados nas naves em tanques criogênicos, uma vez que esta é a forma mais eficiente em termos de volume e peso.

Outra aplicação para este tipo de pilha é na indústria de defesa, onde as baixas temperaturas, a operação silenciosa e as exaustões inofensivas são os seus grandes atrativos. A combinação destas características torna os geradores movidos a pilhas a combustível de detecção difícil para as técnicas tradicionais de detecção por infravermelho ou acústica.

Por fim, deve-se mencionar que as pilhas a combustível alcalinas também apresentam potencial para as indústrias automobilísticas e de aplicações estacionárias ainda que nestes dois casos esta tecnologia não desponte como a provável dominante no futuro.

As baixas temperaturas de operação, a alta eficiência e o rápido início de operação são características interessantes para as aplicações veiculares. No entanto, o fato de outros tipos de pilhas a combustível, tal como as de membrana polimérica, também oferecerem tais vantagens com desempenho superior ao das alcalinas faz com que estas últimas não sejam apontadas como a melhor alternativa.

Mas apesar de apresentarem estas vantagens e terem inclusive atingido a maturidade em algumas áreas, as pilhas alcalinas apresentam alguns problemas e possuem obstáculos a serem transpostos para que se tornem economicamente viáveis e cheguem à fase de produção comercial.

Talvez o principal problema que envolve a utilização da pilha a combustível alcalina seja a contaminação do eletrólito (KOH) com CO₂ (dióxido de carbono), que pode estar presente tanto no combustível quanto no oxidante.

Por causa do risco de formação de carbonato, que levaria ao entupimento dos poros dos eletrodos ou ao bloqueio do fluxo de eletrólito, tanto o H₂, quanto o oxidante (ar ou oxigênio) devem conter baixos teores de CO₂, o que exige que esses gases sejam tratados antes de serem utilizados. O H₂ deve ser fornecido puro, através de algum processo de obtenção anterior que garanta essa característica, enquanto que a corrente de oxidante deve ser purificada através da sua passagem por um lavador de gases.

Além da questão da tolerância ao CO₂, existem outros obstáculos, tanto técnicos quanto de produção e mercadológicos, ao desenvolvimento das pilhas a combustível alcalinas. Mesmo os campos que já atingiram razoável grau de desenvolvimento, como o aeroespacial, podem ser beneficiados por melhorias na tecnologia. Os principais desafios para o avanço deste tipo de pilha são:

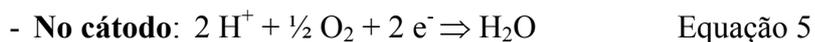
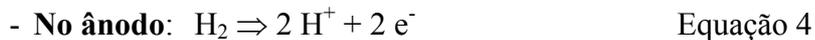
- Aumentar sua estabilidade através da introdução de catalisadores mais estáveis;
- Melhorar o processo de lavagem do oxidante (ar ou oxigênio);
- Testar novos materiais para a fabricação dos eletrodos com o objetivo de melhorar o seu desempenho;
- Alcançar escala de produção em massa;
- Limitar e simplificar os componentes periféricos do sistema;
- Projetar a forma e as dimensões da pilha, de maneira que ela se torne de fácil montagem;
- Reduzir o volume, peso e custo dos módulos (associação de várias pilhas);
- Melhorar o gerenciamento de calor e água do sistema;
- Aumentar o período entre manutenções do eletrólito e da solução de lavagem do ar.
- Aplicar instrumentos de controle de qualidade a todos os componentes de maneira a alcançar a máxima confiabilidade do sistema.

2.2 Pilha a Combustível de Membrana Polimérica (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* – PEMFC)

A pilha a combustível de membrana polimérica utiliza eletrólito sólido, constituído por uma membrana capaz de resistir a diferenciais de alta pressão e livre de líquido corrosivo. Opera a baixas temperaturas e é capaz de gerar alta densidade de potência e variar rapidamente seu rendimento para atender a demanda, o que propicia que seja utilizada pelas indústrias automobilística e de eletroeletrônicos portáteis, como telefones celulares e computadores portáteis. Além disso, também podem ser aplicada a gerações estacionárias de pequeno porte.

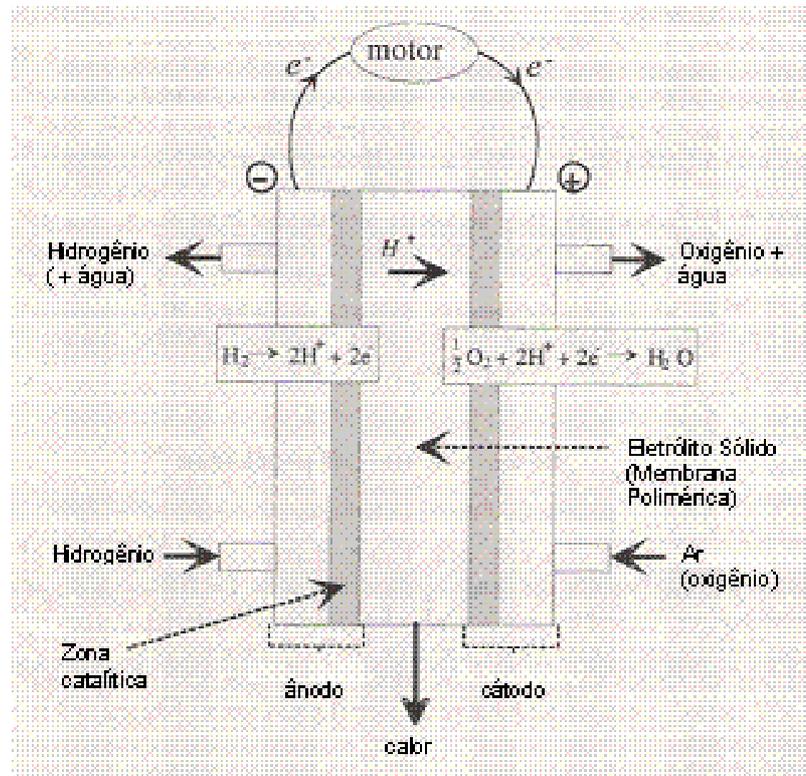
Funciona a partir da oxidação do hidrogênio em contato com o catalisador no ânodo, que gera a perda de dois elétrons que são retirados por um circuito, formando assim uma corrente elétrica. Já os íons H^+ atravessam o eletrólito até chegarem ao cátodo, onde se combinam com o oxigênio, que sofreu redução, e, portanto, recebeu os dois elétrons vindos do circuito. A Figura 2.2 mostra o esquema de funcionamento de uma pilha a combustível de membrana polimérica.

As reações ocorridas nesta pilha são as apresentadas pelas **Equações 4 e 5**:



Nos últimos anos, esta pilha tem se destacado por concentrar grande parte dos esforços dedicados a pilhas a combustível no mundo. O interesse por esse tipo de pilha tem crescido devido ao fato de ter sido eleita pela maioria dos fabricantes de automóveis como o conversor eletroquímico de seus veículos leves do futuro, uma vez que algumas de suas características, tais como a partida rápida e as baixas temperaturas de operação, são requisitos para a utilização da tecnologia de pilhas a combustível em automóveis.

Figura 2.2 Esquema do Funcionamento de uma Pilha a Combustível de Membrana Polimérica



Fonte: Avadikyan *et al.*. (2003)

Além da indústria automobilística, este tipo de pilha encontra aplicações em gerações estacionárias de energia de pequeno porte, como, por exemplo, o uso residencial, onde poderia substituir os pequenos motores a diesel, e também na indústria de equipamentos eletroeletrônicos, onde possui potencial para substituir baterias de aparelhos portáteis como telefones celulares e computadores. Esta última, inclusive, é apontada como a aplicação mais próxima do mercado de uma pilha a combustível.

Confrontando-se estas vantagens com as atuais desvantagens das PEMs (vide Tabela 2.1), fica evidente o potencial desta tecnologia.

Tabela 2.1 Comparação entre as Vantagens e Desvantagens das PEMs

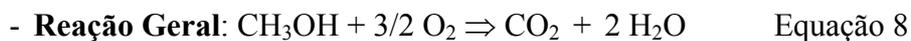
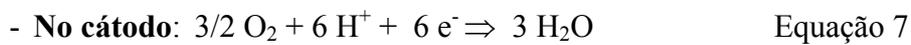
Vantagens	Desvantagens
Alta eficiência	Calor de baixa qualidade
Eletrólito sólido não-corrosivo	Sensível ao CO
Baixa temperatura de operação	Alto custo da membrana
Rápido início de operação	Poucos fornecedores de membrana existentes
Grande diversidade de materiais de construção compatíveis	-
Resistente a diferenciais de pressão	-
Sem risco de formação de carbonatos	-
Vida útil longa	-
Água potável produzida	-
Versatilidade de aplicação	-
Cobertura de grande faixa de potência	-
<i>Design</i> simples	-
Facilidade de manutenção	-
Alta densidade de energia	-

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de BLOMEM (1993)

O avanço desta tecnologia exigirá progressos no sentido de diminuir os custos, melhorar o sistema de gerenciamento de água e calor, aumentar a tolerância ao monóxido de carbono e reduzir o peso e as dimensões das pilhas.

2.2.1 Pilha a Combustível de Metanol Direto (*Direct Methanol Fuel Cell - DMFC*)

A pilha a combustível de metanol direto é uma variação da pilha de membrana polimérica na qual este combustível é injetado diretamente na pilha sem a necessidade de um reformador. O eletrólito é constituído por uma membrana polimérica, a exemplo das PEMFC, mas o combustível empregado é o metanol líquido, que neste caso, reage dentro da pilha, sendo oxidado para formar o CO₂ e eletricidade. Nesta pilha, não ocorre a oxidação do hidrogênio. As equações 6 e 7 apresentam as reações ocorridas no ânodo e no cátodo, enquanto que a equação 8 traz a reação geral.



A vantagem desta configuração é que, porque não há necessidade de reforma do combustível, a pilha pode entrar em funcionamento mais rapidamente que os demais tipos de pilha. Além disto, não há emissão de monóxido de carbono durante a operação deste tipo de pilha (PAULA, 2003).

Ainda que as vantagens oferecidas por este tipo de pilha constituam um diferencial em relação aos demais tipos, o fato de utilizar metanol injetado diretamente implica condições especiais para os componentes de pilha que acabam tornando-se obstáculos para o seu desenvolvimento comercial. O primeiro problema enfrentado pela DMFC é que a baixa temperatura de operação para oxidar o metanol requer um catalisador mais ativo, o que significa que a quantidade de platina necessária para atingir uma densidade de corrente suficientemente grande é bastante superior à quantidade necessária nas pilhas de membrana polimérica convencionais. Outra desvantagem deste mecanismo é a falta de uma membrana específica para trabalhar com oxidação direta de metanol. A membrana polimérica empregada é a mesma das PEMFC, o que induz o metanol a atravessar a pilha, indo do ânodo para o cátodo, desperdiçando combustível e prejudicando o desempenho da pilha.

Por fim, além dos problemas originados pelos componentes da pilha, o uso do metanol também pode criar barreiras que atrasem o avanço da tecnologia. O principal deles refere-se à toxicidade do combustível. O metanol é um combustível muito tóxico e

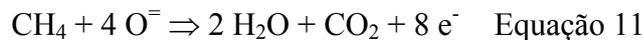
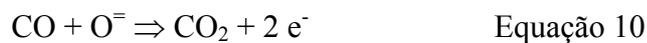
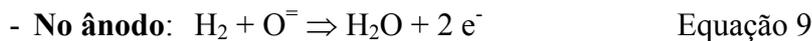
de difícil isolamento em caso de acidentes. Assim, pequenos vazamentos de combustível podem adquirir proporções de desastres ecológicos. Outro agravante do emprego do metanol é o fato de sua produção envolver a utilização de combustíveis fósseis, o que reduziria as vantagens da utilização das pilhas a combustível pois associaria a produção de hidrogênio a uma fonte não renovável de energia.

Segundo o *Fuel Cell Test and Development Center* (2005), até 2005, o principal campo para aplicação destas pilhas era o segmento de pequenas aplicações portáteis em eletroeletrônicos, tais como telefones celulares, computadores portáteis, baterias e mini-geradores, que poderiam se beneficiar das baixas temperaturas de operação e da facilidade no abastecimento de combustível.

2.3 Pilha a Combustível de Óxido Sólido (*Solid Oxide Fuel Cell - SOFC*)

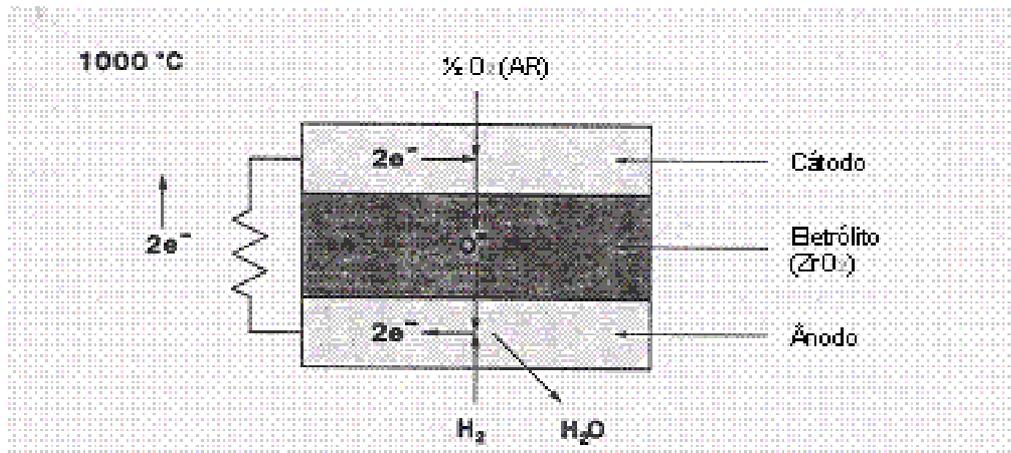
As pilhas a combustível de óxido sólido, a exemplo das de membrana polimérica, também utilizam eletrólito sólido. No entanto, diferentemente das anteriores, este é feito de material cerâmico, sendo o mais utilizado o óxido de zircônio (ZrO_2) com Ytria (Y_2O_3), que é um condutor de ânions em altas temperaturas. Por isso, operam a temperaturas próximas a $1000\text{ }^\circ\text{C}$, permitindo que seja injetado diretamente na pilha um hidrocarboneto combustível. Dentre suas características se destacam a alta eficiência e os reduzidos índices de corrosão, o que a torna o tipo de pilha mais indicado para aplicações de geração estacionária de energia elétrica.

O seu funcionamento difere dos demais tipos de pilha pois neste caso são os ânions de oxigênio que migram para encontrar a molécula de hidrogênio. O combustível é reformado e os seus produtos (CH_4 e CO) reagem com os ânions O^{2-} para formar CO_2 e H_2O . As Equações 9 a 12 mostram as reações no cátodo e no ânodo:



Deve-se ressaltar outra peculiaridade das pilhas a combustível de óxido sólido: a tolerância ao monóxido de carbono. Enquanto que, para as demais pilhas, ele constitui um contaminante, para a de óxido sólido ele participa das reações e pode entrar junto com o combustível. Isto possibilita que este tipo de pilha utilize combustíveis alternativos, como gases provenientes do processamento de biomassa. A Figura 2.3 apresenta o esquema de funcionamento de uma pilha a combustível de óxido sólido.

Figura 2.3 Esquema do Funcionamento de uma Pilha a Combustível de Óxido Sólido



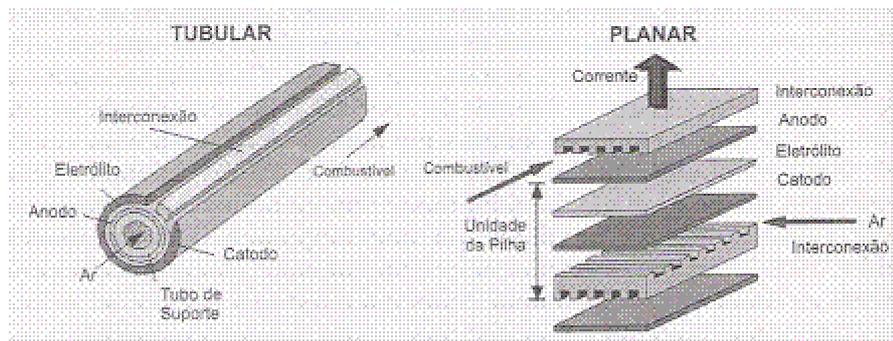
Fonte: Blomem (1993)

As aplicações estacionárias apresentam-se como o campo mais promissor para esta tecnologia. Neste campo, as pilhas podem ser utilizadas tanto para a geração de energia quanto para a geração de calor em empreendimentos de diferentes tamanhos e natureza (residencial, comercial e industrial). A emissão térmica resultante da operação a altas temperaturas possibilita que esta tecnologia seja utilizada em projetos de cogeração.

As pilhas a óxido sólido apresentam duas configurações possíveis, apresentadas na Figura 2.4: planar e tubular. Cada uma delas se encontra em um estágio diferente de evolução. As planares são mais complexas e, talvez, se mostrem economicamente mais interessante no futuro. Entretanto, até 2003, as tubulares estavam mais próximas da comercialização, sendo mais apropriadas para grandes projetos de geração e cogeração, enquanto a planar era mais indicada para pequenos aproveitamentos (inferiores a 300 kw) (PAULA, 2003).

Os sistemas de geração de energia elétrica que utilizam este tipo de pilha têm potencial para atingir níveis elevados de eficiência. Integrando-os a turbinas a gás, podem atingir até 75% de eficiência, o que torna esta tecnologia competitiva face a outras opções. No entanto, as altas temperaturas de operação ocasionam problemas aos componentes da pilha, obrigando-os a serem resistentes a este fator. Por isso, os materiais utilizados na construção da pilha são cerâmicos, compósitos e ligas metálicas especiais. Estes possuem processo de fabricação complicado e de custo elevado.

Figura 2.4 Configurações possíveis para a pilha de Óxido Sólido



Fonte: Paula (2003)

Os obstáculos para o desenvolvimento da tecnologia estão relacionados à redução dos custos. Para desenvolver todo o potencial comercial das pilhas a combustível de óxido sólido é preciso orientar a pesquisa no sentido de:

- Reduzir a temperatura de operação da pilha;
- Desenvolver novos campos e produtos que aumentem a escala de utilização da tecnologia, diluindo assim os custos;
- Produzir componentes mais baratos e confiáveis;
- Desenvolver técnicas de avaliação não destrutivas com o propósito de estabelecer controles de qualidade;
- Melhorar o controle dos fluxos térmicos na pilha;
- Desenvolver eletrodos mais tolerantes a contaminantes;
- Desenvolver melhores materiais de conexão;

Uma das alternativas existentes para isso consiste na redução da temperatura de operação das pilhas. Uma primeira tentativa desenvolvida foi a pilha a combustível de óxido sólido de temperatura intermediária – (ITSOFC) que opera na faixa de 600 a 800 °C. Esta faixa de temperatura oferece algumas vantagens, tais como:

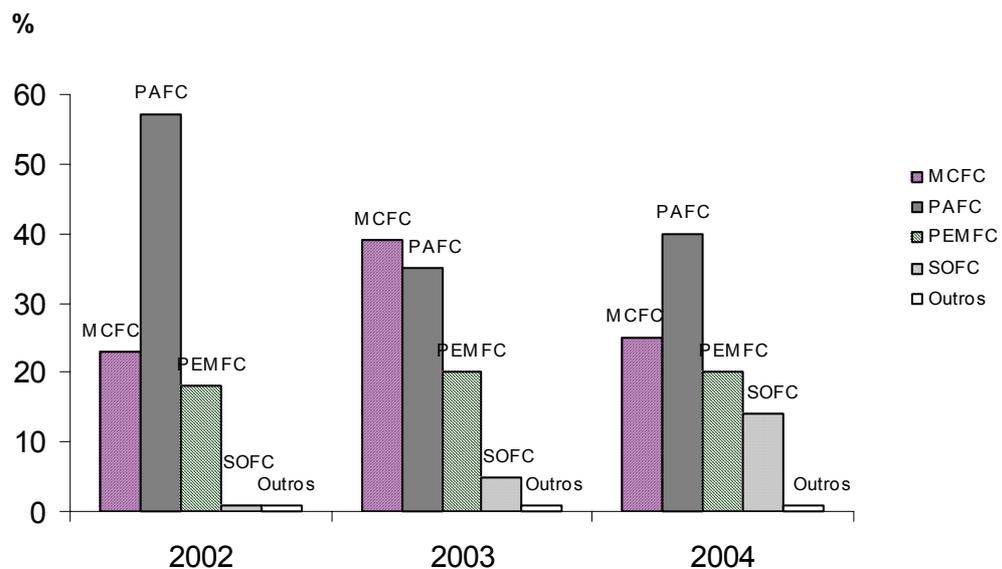
- Ser mais adequada aos processos de reforma e remoção de enxofre;
- Reduzir a “fragilização” dos materiais;
- Reduzir a quantidade de materiais utilizados;
- Reduzir o custo dos sistemas auxiliares;

- Aumentar o número de tipos de materiais que podem ser empregados;
- Reduzir o tempo de início das operações.

2.4 Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell* - PAFC)

As pilhas de ácido fosfórico foram o foco das pesquisas de desenvolvimento de pilhas a combustível durante muito tempo. Como resultado de todo o investimento feito ao longo de anos anteriores, em 2004 o seu grau de maturidade era superior ao de todos os demais tipos de pilha para as grandes aplicações estacionárias, o que explica a sua maior participação entre os sistemas produzidos para este fim (BAKER e JOLLIE, 2004). O Gráfico 2.1 mostra que, apesar de as pilhas a carbonato fundido, descritas na próxima seção, terem liderado o mercado em 2003, as de ácido fosfórico retomaram sua posição de liderança no ano seguinte.

Gráfico 2.1 Composição Percentual dos Sistemas de Grandes Aplicações Estacionárias por Tipo de Pilha

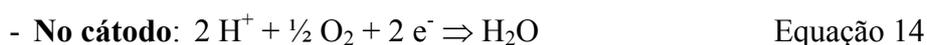


Fonte: BAKER e JOLLIE, 2004

O seu sucesso inicial pode ser creditado a duas de suas vantagens: a tolerância ao dióxido de carbono (CO_2) e o possível aproveitamento do calor gerado em sua operação. A tolerância ao CO_2 permite que o hidrogênio gerado a partir da reforma de hidrocarbonetos, rico neste contaminante, seja aproveitado como combustível sem a necessidade de processos avançados de limpeza. Já o aproveitamento do calor gerado na operação de célula a torna mais atrativa em projetos de co-geração.

No entanto, apesar de todos os aspectos positivos a seu favor, o domínio do mercado por este tipo de pilha vem declinando desde 2002 (BAKER e JOLLIE, 2004). A previsão de que outras pilhas se tornem mais baratas e eficientes diminui a sua atratividade e desvia os investimentos em pesquisa para outras tecnologias como a de carbonato fundido, a de óxido sólido e a de membrana polimérica, reduzindo a superioridade da pilha de ácido fosfórico. Bloomen (1993) estabelece uma classificação para estas pilhas, associando-as a gerações. Para ele, as pilhas de ácido fosfórico constituem a primeira geração das pilhas devido à sua longevidade, sendo seguidas pelas de carbonato fundido (segunda geração) e pelas de óxido sólido (terceira geração). A Tabela 2.2 compara essas três gerações de pilhas.

A aplicação mais promissora para as pilhas de ácido fosfórico encontra-se na geração estacionária de grande porte. Por operarem a temperaturas entre 180 °C e 210 °C, o calor gerado pode ser aproveitado diretamente ou em projetos que incluam a associação da pilha à uma turbina a vapor, situação na qual a eficiência energética pode atingir 80%. Estas pilhas funcionam de maneira semelhante à das pilhas de membrana polimérica. Os íons de hidrogênio formado no ânodo são conduzidos pelo ácido fosfórico, utilizado como eletrólito, até o cátodo, onde reagem com os íons de oxigênio, formando água. As Equações 13 e 14 mostram as reações ocorridas no ânodo e no cátodo:



O emprego de um eletrólito líquido e ácido implica alguns problemas na utilização destas pilhas. Por estar no estado líquido, o eletrólito demanda um controle rígido da temperatura, pois acima de 210 °C, ele se decompõe, e abaixo dos 180 °C, a água condensa e o dilui. Em ambos os casos, haverá uma piora do desempenho da pilha. O caráter ácido do eletrólito também gera problemas, pois há a corrosão dos eletrodos que reduz a vida útil da pilha. Outras dificuldades significativas são a contaminação pelo monóxido de carbono (abundante em hidrogênio produzido a partir de reforma), a necessidade de utilizar metais nobres nos catalisadores (o que aumenta os custos) e a baixa condutividade do eletrólito. Por fim, o custo da energia gerada por esta pilha ainda é muito elevado para viabilizar a tecnologia. Sendo o custo médio em

torno de US\$ 3.000 a 4.000/kW, torna-se um obstáculo para a sobrevivência das PAFC no futuro.

Tabela 2.2 Comparação entre PAFC, MCFC e SOFC

Característica	PAFC	MCFC	SOFC
Eletrólito	Ácido fosfórico (H ₃ PO ₄)	Carbonato fundido (Na ₂ CO ₃)	Óxido de zircônia (ZrO ₂)
Temperatura de operação	180 – 210 °C	600 – 700 °C	900 – 1.000 °C
Combustíveis	Gás natural, metanol, nafta e GLP ² .	Gás natural, metanol, carvão, nafta e GLP.	Gás natural, metanol, carvão, nafta e GLP.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> – Tolerante à CO₂. – Aplicável em pequenas gerações estacionárias e usos veiculares. 	<ul style="list-style-type: none"> – Dispensa metais nobres. – Tolerante à CO. – Permite reforma interna. – Disponibilidade de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> – Dispensa metais nobres. – Tolerante à CO. – Permite reforma interna. – Poucos problemas na administração do eletrólito.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> – O catalisador requer metais nobres. – Sensível ao CO. – Baixa condutividade do eletrólito. 	<ul style="list-style-type: none"> – Problemas relacionados à vida útil e à estabilidade mecânica. – Fonte de CO₂ é necessária para o catodo. – Mudanças de fase do eletrólito entre as temperaturas de operação e ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> – Altas temperaturas impõem restrições para os materiais das células. – Alta resistividade do eletrólito.

Fonte: Blomem (1993)

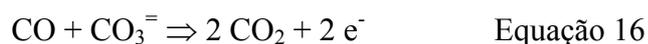
² GLP – gás liquefeito de petróleo.

2.5 Pilha a Combustível de Carbonato Fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC*)

A evolução das pilhas de carbonato fundido pode aproveitar o espaço aberto no mercado pelas pilhas de ácido fosfórico. Isto porque em comparação com estas, a de carbonato fundido possui vantagens como maior eficiência elétrica, a possibilidade de utilizar gás natural sem a necessidade de reforma externa e a possibilidade maior de utilizar o calor gerado a partir de sua operação.

As grandes concorrentes das pilhas de carbonato fundido são as de óxido sólido. A exemplo destas últimas, as de carbonato fundido também operam a altas temperaturas (650 °C), o que faz com que algumas das vantagens oferecidas pelas primeiras sejam reproduzidas pelas segundas e a torna uma tecnologia promissora para aplicações de geração estacionária de energia elétrica. As temperaturas mais baixas de operação em relação às SOFC e o processo de montagem e vedação mais simples são as suas vantagens, enquanto que, contra elas pesa o fato de utilizar, como eletrólito, carbonatos fundidos de sódio, lítio, potássio ou uma mistura deles, uma mistura de sais de carbonato fundido como eletrólito, que se tornam líquidos quando atingem as altas temperaturas de operação e funcionam como condutor de íons negativos.

Outra semelhança com as pilhas de óxido sólido é o fato de ser os íons negativos migrarem para reagir com o hidrogênio no ânodo. Desta forma, os íons carbonato (CO_3^-) fazem o papel da corrente iônica levada do cátodo ao ânodo. Eles são produzidos a partir da reação do CO_2 com o oxigênio injetado no cátodo e migram pelo eletrólito até o ânodo, onde reagem com o hidrogênio, resultando em H_2O e CO_2 e liberando dois elétrons que seguem pelo circuito, fazendo o caminho inverso em direção ao cátodo para participar da reação entre o oxigênio e o gás carbônico. As reações ocorridas no cátodo e no ânodo são apresentadas pelas Equações 15 a 17.



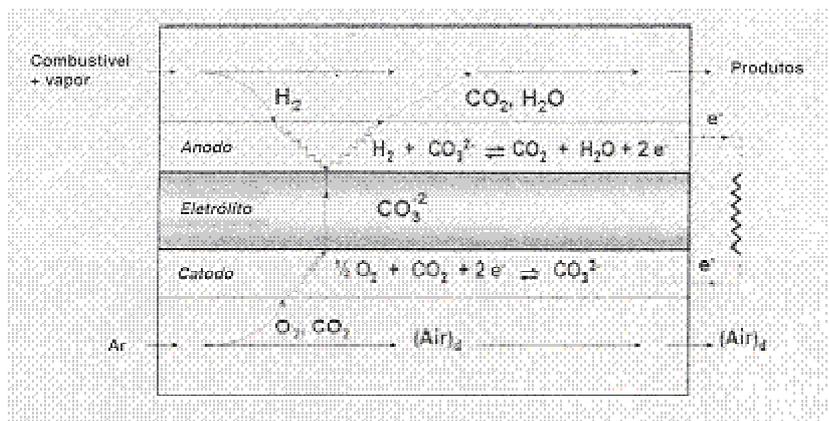
Neste caso, o monóxido de carbono não é contaminante, mas participante da reação anódica, o que permite que sejam empregados vários tipos de combustíveis. As

altas temperaturas de operação propiciam que este tipo de pilha seja utilizado em projetos de cogeração, utilizando o calor gerado em excesso. Esta pilha pode ser associada a uma turbina para aproveitar o vapor e, com isso, gerar mais energia, proporcionando uma eficiência ainda maior, alcançando até 60% (PAULA, 2003). Além disso, as pilhas de carbonato fundido permitem a reforma interna do combustível empregado, o que propicia a redução dos custos e simplifica sua operação desta pilha. A Figura 2.5 mostra o esquema de funcionamento de uma pilha a combustível de carbonato fundido.

O principal campo de aplicação das pilhas a combustível de carbonato fundido é a geração estacionária de energia, principalmente de grande porte. Estima-se que o custo de produção de energia desta tecnologia possa alcançar a faixa de 200 a 400 US\$ / kW (PAULA, 2003). No entanto, para que se confirme seu potencial, será necessário alcançar os seguintes objetivos:

- Aumentar a densidade de potência do eletrodo;
- Aumentar a vida útil da pilha;
- Desenvolver materiais e procedimentos de manufatura mais baratos.

Figura 2.5. Esquema da Pilha a Combustível de Carbonato Fundido



Fonte: Paula (2003)

3. Avaliação da Tecnologia de Pilhas a Combustível segundo a Metodologia Proposta pela *International Partnership for Hydrogen Economy (IPHE)*

As pilhas a combustível constituem um tipo específico de inovação, chamado por Drucker (1998) de inovação baseada no conhecimento científico, e como tal devem ser avaliadas e geridas. Isto porque apresentam duas características que as tornam diferentes dos demais tipos de inovação: o longo percurso até o mercado e a necessidade de convergência de vários campos do conhecimento.

O longo tempo de maturação de uma inovação com base no conhecimento científico é função do tempo necessário para o surgimento do conhecimento e do tempo que este conhecimento levará para se tornar um produto, processo ou serviço. Estima-se que uma tecnologia incluída nesta classificação leve de 25 a 30 anos para se tornar aceita no mercado (DRUCKER, 1998). No caso das pilhas a combustível, pode ser que esse período seja ainda maior.

Além disso, a convergência de conhecimentos de outras áreas é uma pré-condição para o amadurecimento e o sucesso deste tipo de inovação. No caso das pilhas, essa dinâmica se torna visível quando se analisam as dificuldades enfrentadas por cada tipo de pilha, apresentadas no capítulo anterior. Os fundamentos da geração de energia elétrica a partir da utilização do hidrogênio são conhecidos e dominados. No entanto, é preciso que os componentes da pilha (eletrólito, eletrodos etc.) evoluam e sejam aperfeiçoados de modo que a tecnologia atenda aos requisitos exigidos pelos consumidores, o que exige contribuições de outros campos da ciência e possibilita que ela se dissemine.

Por causa dessas duas características, o mesmo autor acrescenta que as inovações com base no conhecimento científico necessitam de:

1. Uma análise meticulosa de todos os fatores sociais, econômicos ou perceptuais;
2. Enfoque na posição estratégica;
3. Administração empreendedora.

Os requisitos apontados por ele revelam a importância estratégica atribuída a este tipo de inovação, em especial, para a administração empresarial. A análise meticulosa tem por objetivo identificar quais os fatores ainda não estão disponíveis, de modo que o empreendedor possa decidir se eles podem ser produzidos e, neste caso, em

que direção ele deve aplicar seus esforços, ou se o ambiente de desenvolvimento ainda não se encontra favorável para o investimento na tecnologia em questão, devendo a inovação ser adiada por ainda não ser viável. Desta forma, o que é proposto é uma análise sócio-econômica da viabilidade da tecnologia. Aos fatores sociais, econômicos e perceptuais citados por ele podem ser adicionados também os tecnológicos e ambientais para que a análise adquira um caráter mais amplo.

Os outros dois requisitos apresentados, o enfoque estratégico e a administração empreendedora, retornam à discussão da avaliação da tecnologia dentro do ambiente corporativo, ou seja, os mecanismos que as organizações criam e desenvolvem com o intuito de estimular o aparecimento constante de inovações dentro das fronteiras da empresa. Estes requisitos da inovação com base no conhecimento científico se encontram fora do escopo deste trabalho, não sendo objetivo discuti-los. Desta forma, a avaliação da tecnologia de pilhas a combustível neste trabalho se limitará à análise detalhada dos fatores sociais, econômicos, perceptuais, tecnológicos e ambientais anteriormente citados.

A primeira etapa realizada no capítulo anterior consistiu em apresentar os fundamentos do funcionamento dos diversos tipos de pilha. Com isto, criou-se um entendimento geral do que consiste a tecnologia em estudo. A etapa seguinte, a ser realizada neste capítulo, consiste na eleição de uma metodologia para análise da tecnologia em questão e, a partir desta, a sua avaliação com a identificação das atuais barreiras ao seu desenvolvimento e as prioridades que devem ser observadas nas pesquisas de desenvolvimento.

A proposta de metodologia de avaliação da *International Partnership for Hydrogen Economy* (IPHE) mostrou-se interessante por ser desenvolvida especificamente para tecnologias que envolvam a utilização do hidrogênio, entre elas a de pilhas a combustível. A IPHE é uma parceria internacional que visa a prover um mecanismo para organizar, avaliar e coordenar programas multinacionais de pesquisa, desenvolvimento e extensão que acelerem a transição para uma economia baseada no hidrogênio. A avaliação proposta por ela tem por objetivo garantir um ambiente melhor para os programas de pesquisas, identificar prioridades e barreiras potenciais a serem superadas para o desdobramento e disseminação da tecnologia de pilhas a combustível (IPHE, nd³).

³ Data de publicação não disponível.

Desta forma, sugere o organismo que as cadeias de energia, de diferentes fontes, sejam avaliadas com atenção a diferentes critérios, tais como, mas não unicamente:

- Eficiência;
- Custo (direto e indireto);
- Segurança
- Emissões de gases do efeito estufa;
- Impactos ambientais locais;
- Impactos econômicos (empregos gerados / empregos perdidos, balança comercial etc.).

A avaliação de cada um desses critérios deve ser feita comparativamente, ou seja, para cada aplicação potencial deve-se considerar a existência de fontes de energia concorrentes na região (tanto convencionais quanto alternativas) que deverão ser avaliadas segundo cada um dos critérios anteriormente mencionados e comparadas com os resultados de desempenho das pilhas a combustível. Isto, segundo a entidade, seria suficiente para qualificar a sustentabilidade da cadeia do hidrogênio na região analisada (IPHE, 2004).

A comparação entre as diversas fontes de energia e a abordagem das diferentes dimensões das cadeias de energia do hidrogênio permite criar uma hierarquia entre as cadeias de energia concorrentes e identificar prioridades de pesquisa devido à evidenciação dos gargalos. Também servem como base para uma abordagem dinâmica de cenários quantitativos de desenvolvimento com o objetivo de avaliar as possíveis trajetórias de implementação da tecnologia.

Tais cenários não deveriam levar em consideração somente o valor presente dos parâmetros técnico-econômicos de cada cadeia do hidrogênio e a sua prospectiva evolução no futuro em comparação com as demais fontes concorrentes, mas também, as condições de implementação nos mercados sob diversas opções políticas. Desta forma, diferentes modelos podem ser usados tais como modelos técnico-econômicos, modelos de equilíbrio, entre outros.

Por fim, a IPHE faz considerações a respeito do tratamento das questões sociológicas. Segundo a metodologia, elas tratam de uma abordagem diferente e devem ser consideradas nos estágios iniciais de pesquisa e desenvolvimento. Sendo importante:

- Analisar o comportamento e a estratégia dos interessados na tecnologia (também conhecidos pelo termo *stakeholders*), definidos por Gittman (1997) como sendo grupos que possuem um vínculo econômico direto com a tecnologia, com o objetivo de entender os “aliados” e “oponentes” e reagir a eles;
- Analisar as condições de aceitação da tecnologia através de experiências de campo.

Mesmo que a abrangência desta metodologia seja aparentemente bem específica, principalmente se comparada a outras propostas de avaliação de inovações, ela ainda precisa ser restringida para atender as necessidades deste trabalho, uma vez que se refere a todas as tecnologias que envolvem hidrogênio.

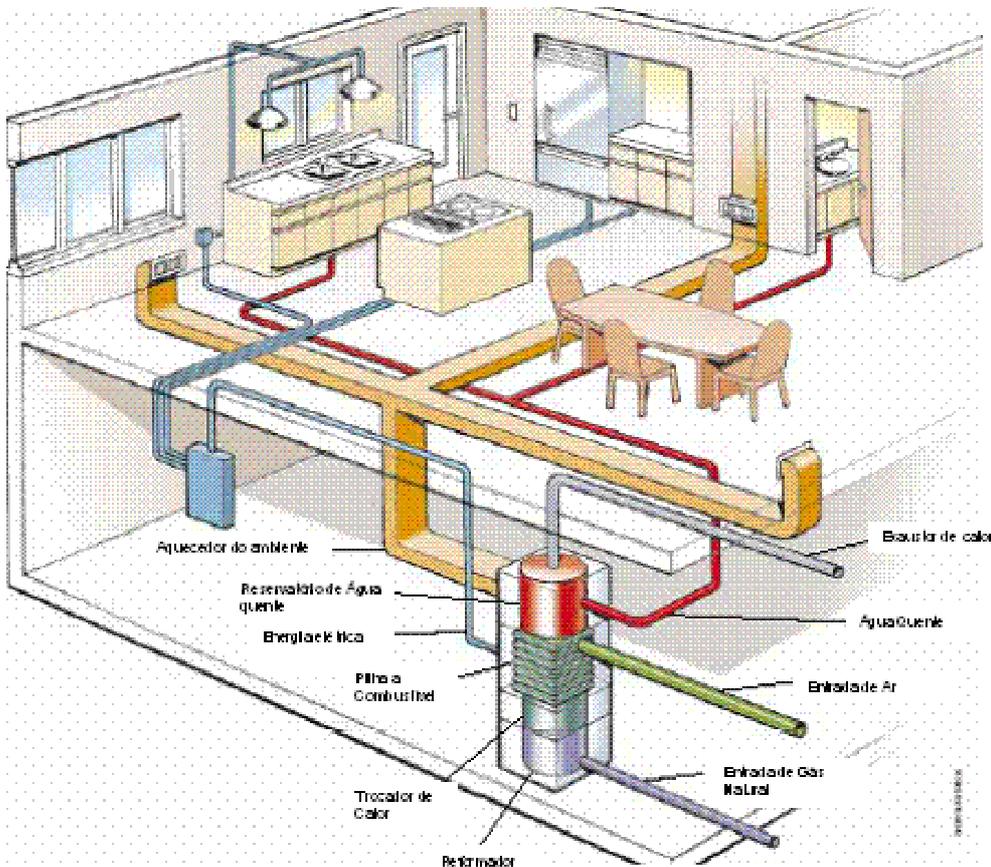
Portanto, é fundamental que as considerações feitas pela IPHE sejam adaptadas para a avaliação de um único tipo de tecnologia, a de pilhas a combustível. A utilização de uma abordagem pragmática, a partir da identificação das cadeias de energia do hidrogênio relevantes para as pilhas atende este objetivo. Esta metodologia consiste em escolher um número limitado de campos para os quais será avaliado o desempenho das pilhas a combustível. As aplicações escolhidas são aquelas que cujo mercado se apresenta como potencial campo para a utilização de pilhas a combustível. Assim sendo, são elas: transportes, geração estacionária de energia e a indústria de eletroeletrônicos portáteis. Para cada uma delas, serão identificadas as cadeias relevantes do hidrogênio, considerando as suas dimensões fundamentais, e as principais fontes de energia concorrentes e o desempenho de cada uma delas será avaliado conforme os critérios propostos pela entidade.

3.1 Geração Estacionária de Energia

As aplicações para as pilhas a combustível na geração estacionária de energia elétrica são divididas entre pequenas e grandes aplicações, conforme a potência utilizada. As pequenas aplicações estacionárias possuem potência variando entre 0,5 kW e 10 kW e são mais comuns em residências e escritórios. Já as grandes aplicações estacionárias possuem potência superior a 10 kW, sendo utilizadas por hospitais, indústrias e grandes centros comerciais (GEIGER e CROPPER, 2003).

As pequenas aplicações estacionárias estão relacionadas ao fornecimento de energia elétrica para residências e escritórios, onde as pilhas a combustível podem ser utilizadas com o propósito de fornecer energia ininterruptamente, servir como energia de reserva ou em projetos de co-geração. Em meados de 2003, havia cerca de 80 empresas desenvolvendo pilhas para este mercado no mundo e que, até o final daquele ano, previa-se que o número de sistemas de pequeno porte instalados chegaria a 1.900 (GEIGER E CROPPER, 2003). Como o consumo residencial depende da localização (no Brasil, por exemplo, a média de consumo residencial é de 1 kW, enquanto que, nos EUA é de 4 kW), o foco das empresas que desenvolvem produtos com tal finalidade está em células que geram entre 0,5 e 5 kW (GOMES NETO, 2004). A Figura 3.1 ilustra uma aplicação residencial.

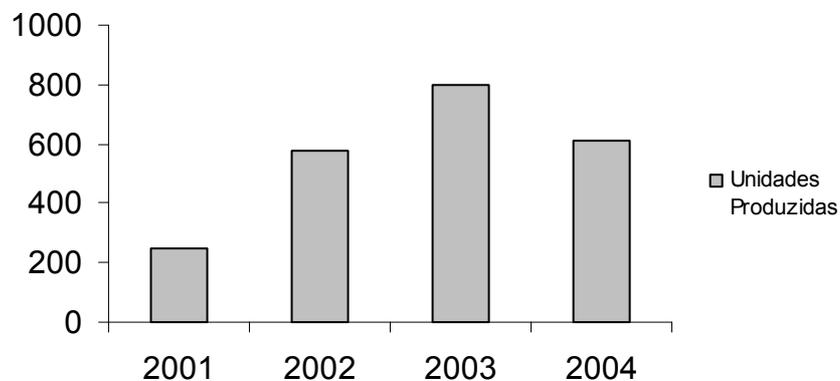
Figura 3.1 Aplicação Residencial para Geração Estacionária de Energia Elétrica



Fonte: Lloyd (1999)

Apesar do grande potencial desta aplicação, talvez o maior obstáculo à sua utilização seja o alto custo. O decréscimo no número de unidades lançadas observado em 2004 se deve a dois eventos: o fato de algumas empresas estarem esperando o lançamento de novos modelos de produtos e o término de alguns programas de pesquisa no Japão, que iniciarão novo ciclo em 2005. Assim, a evolução do número de sistemas produzidos entre 2001 e 2004, apresentada no Gráfico 3.1, mostra que apesar do número de sistemas para pequenas aplicações estacionárias ter crescido neste período, ele, comparativamente ao número de residências, ainda é baixo. Isto ocorre porque o consumidor residencial ainda não pode pagar o preço das pilhas produzidas hoje. Além do alto custo, as pilhas voltadas para o segmento de pequenas aplicações estacionárias ainda precisam desenvolver outro requisito deste mercado: a sua vida útil deve alcançar 40.000 horas, sendo, portanto, bem superior ao desempenho registrado em 2003 que somava 10.000 horas (GEIGER E CROPPER, 2003).

Gráfico 3.1 Sistemas de Pilha a Combustível para Pequenas Aplicações Estacionárias produzidos Anualmente entre 2001 e 2004 no Mundo



Fonte: Geiger e Cropper (2003)

As grandes aplicações estacionárias, por sua vez, são aquelas que utilizam potência superior a 10 kW voltadas para indústrias, hospitais e grandes centros comerciais. Em meados de 2004, calculava-se que existissem cerca de 700 sistemas de geração estacionária de energia de grande porte instalados em todo o mundo, sendo o maior dele de 11 MW (BAKER e JOLLIE, 2004). Avanços tecnológicos para esta aplicação têm sido disseminados, porém a natureza do mercado de grandes gerações estacionárias exige dos produtos uma grande confiabilidade e longa durabilidade, duas características que podem levar tempo e esforço para serem obtidas.

3.1.1 Tipos de Pilha e Combustíveis Utilizados

Considerando as pequenas aplicações, o tipo de pilha mais empregado é o de membrana polimérica (PEMFC) alimentada com gás natural. Entretanto, entre o início de 2002 e meados de 2003, a participação das pilhas de óxido sólido (SOFC) neste segmento cresceu de 5% para mais de 20% (GEIGER E CROPPER, 2003). A possibilidade de se aproveitar também o calor gerado pela operação dessa pilha lhe confere atratividade ainda que o custo do seu eletrólito constitua uma barreira significativa para sua entrada no mercado. Talvez por isso, em 2003, somente sete das oitenta empresas do mundo estavam desenvolvendo produtos com esta tecnologia para pequenas aplicações estacionárias.

Em função do custo elevado das pilhas (PEMFC e SOFC), os fabricantes têm se concentrado mais no segmento de energia de reserva para bancos e empresas prestadoras de serviço, tais como empresas de telefonia, onde a interrupção do fornecimento de energia pode ocasionar prejuízos de até US\$ 6 milhões por interrupção (GEIGER e CROPPER, 2003). Para estes clientes, a confiabilidade do fornecimento de energia justifica o investimento em sistemas de pilha a combustível. Além disso, para eles, a utilização das pilhas será intermitente, o que diminui a vida útil exigida da pilha.

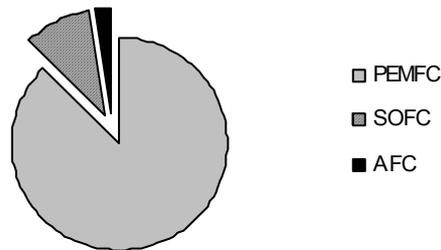
Quanto aos combustíveis, a utilização de gás natural se apresenta como tendência no curto prazo devido à existência de infra-estrutura de distribuição e à participação das empresas produtoras desse combustível no processo de desenvolvimento da tecnologia. No entanto, em casos específicos, outras alternativas podem ser mais interessante, tais como o metanol para pilhas de metanol direto (DMFC) e o propano para localidades remotas. Além desses, o domínio tecnológico brasileiro do etanol pode fazer com que este se torne uma opção viável para as pilhas a combustível no país (GOMES NETO, 2004).

Para grandes aplicações estacionárias, durante anos, a predominância foi das pilhas de ácido fosfórico, tecnologia mais próxima do mercado para as grandes aplicações estacionárias. No entanto, observa-se um declínio do interesse por este tipo de pilha uma vez que suas limitações são grandes.

O percentual de projetos envolvendo PAFC caiu de 60% para 40% nos entre 2002 e 2004 (BAKER e JOLLIE, 2004). A disseminação de grandes aplicações vem ocorrendo em ritmo mais acelerado a partir do desenvolvimento e da utilização de três outros tipos de pilha: a de carbonato fundido (MCFC), a de óxido sólido (SOFC), e a de

membrana polimérica (PEMFC). O Gráfico 3.2 ilustra a evolução da participação de cada tipo de tecnologia em projetos voltados para aplicações de grande porte.

Gráfico 3.2 Distribuição Percentual dos Sistemas de Pequenas Aplicações Estacionárias por Tipo de Pilha em 2004



Fonte: Geiger e Cropper (2003)

A pilha de carbonato fundido ganhou significativa participação no segmento entre 1970 e 2003, quando o percentual de sistemas aumentou de uma média de 10% para 40%, sendo o tipo de pilha mais utilizado em grandes aplicações em 2003 (GEIGER e CROPPER, 2003). Uma das razões para explicar esse aumento é o fato de ela operar a altas temperaturas e com alta eficiência, podendo o calor gerado ser aproveitado em projetos de co-geração, o que aumenta a sua competitividade. Entretanto, a natureza corrosiva do eletrólito de carbonato fundido constitui um grande obstáculo para a manutenção do seu desenvolvimento e da sua disseminação.

Dificuldade que não ocorre na pilha de óxido sólido, que, por isso, se apresentará como tecnologia mais promissora para as grandes aplicações estacionárias caso sejam estabelecidos processos que diminuam os custos de produção do seu eletrólito. Por fim, a pilha de membrana polimérica, que a princípio não seria a melhor opção para este caso, por operar a baixas temperaturas e geralmente associada a aplicações estacionárias de menor porte, pode se beneficiar de pesquisas em outros segmentos e, com isso, obter um percentual significativo deste mercado, fenômeno que já está ocorrendo.

Em relação aos combustíveis utilizados, ocorre uma situação semelhante à das pequenas aplicações estacionárias. Também para as grandes, o combustível mais usado é o gás natural, havendo alternativas viáveis para situações específicas como o etanol

(no Brasil), o biogás (no Japão) e o metano extraído do carvão, para pilhas de carbonato fundido desenvolvidas especificamente para este combustível (nos EUA).

3.1.2 Comparação com Outras Tecnologias

Um dos principais benefícios oferecidos pela utilização de pilhas a combustível em sistemas de geração estacionária, tanto em pequena quanto em grande escala, é o fato de esta tecnologia proporcionar a ampliação da geração distribuída, definida por Lima (LIMA, 2004) como “a energia elétrica gerada por qualquer tipo de fonte, que se encontra fisicamente próxima ao local da carga ou da demanda, sendo injetada, preferencialmente, na rede de distribuição”. Desta forma, elas se mostram como uma alternativa para aumentar a oferta de energia, diminuir as perdas na distribuição, melhorar a confiabilidade do sistema elétrico e expandir o percentual populacional que tem acesso a energia elétrica. Para a comparação das diferentes cadeias de energia, proposta pelo IPHE, foram escolhidas as fontes de energia que seriam capazes de competir com as pilhas a combustível nas aplicações estacionárias (grandes e pequenas) tendo em vista suas funções na geração distribuída e as vantagens geradas por esta. Assim sendo, elas competem com tecnologias convencionais e maduras e com tecnologias alternativas em desenvolvimento. Segundo Miranda *et al.* (Miranda et al., 2003), os principais concorrentes são tecnologias que também estão evoluindo como os motores a combustão interna mais eficientes, principalmente a diesel, turbinas e microturbinas a gás.

Considerando as fontes térmicas, observa-se que a eficiência máxima atingida pelos sistemas que empregam fontes maduras, definida pela razão entre a energia gerada e a energia contida no combustível consumido na geração, é aproximadamente 40%. Esta é a eficiência máxima alcançada pelas turbinas a gás, por exemplo (LIMA, 2004). Para os motores a diesel e a gás, ela pode ser ainda maior, 43% (diesel) e 42% (gás). Já nas máquinas térmicas recentes, como as microturbinas, a eficiência máxima registrada é de 30%, ou seja, 25% menor que as tecnologias comercialmente difundidas. A comparação com a eficiência alcançada pelas pilhas a combustível não é trivial visto que as condições de teste influenciam bastante o desempenho das mesmas e variam conforme o tipo de pilha e a empresa desenvolvedora. Para efeito de comparação, foram utilizados os dados contidos no relatório *Fuel Cells: A Technology & Applications Overview* (JACOBSON, nd⁴) visto que este apresenta informações sobre a eficiência dos principais tipos de pilha, com exceção das alcalinas.

⁴ Data de publicação não disponível.

De acordo com o relatório, as pilhas de carbonato fundido são as mais eficientes, atingindo eficiência elétrica máxima de 52%. Em seguida, estariam as pilhas de óxido sólido, com eficiência máxima de 47%. As de ácido fosfórico ficariam em terceiro lugar, com 40%, e as de membrana polimérica, em quarto, com 35%. As pilhas alcalinas são mencionadas como sendo as de pior desempenho, possuindo baixa eficiência. Os dados sobre eficiência elétrica, bem como os de custo e emissões, discutidos a seguir, são apresentados compilados na Tabela 3.1 Deve-se ressaltar que as pilhas que operam em altas temperaturas podem ter sua eficiência aumentada caso sejam utilizadas em projetos de co-geração, onde se aproveita também o calor gerado em sua operação. Neste caso, há registros de pilhas de ácido fosfórico que alcançaram eficiência de 80% (DOE, 2000) e de pilhas de óxido sólido que alcançaram 85% (PIETZAK e RAAK, 2004).

Tabela 3.1 Comparação entre Fontes de Energia Elétrica Térmicas e Pilhas a Combustível

Tecnologia	Eficiência (%)	Custo Total ⁵ (US\$ / kW)	Custos de O & M ⁶ (US\$ / kW)
Pilhas a Combustível			
PEMFC	30 – 35	2.880 – 4.400	0,023 – 0,033
SOFC	45	2.800	0,023
MCFC	43 – 46	2.240 – 4.000	0,033 – 0,043
PAFC	36	3.600	0,029
Motor à Diesel	36 – 43	350 – 500	0,005 – 0,010
Motor à Gás	28 – 42	600 – 1.000	0,007 – 0,015
Turbina à Gás	21 – 40	650 – 900	0,003 – 0,008
Microturbinas	25 – 30	600 – 1.100	0,005 – 0,010

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Lima (2004) e Guterl e Romano (2004)

Outro grupo de consultoria, o *Energy Nexus Group* (2002) apresenta dados semelhantes para eficiência. Para este, as pilhas de ácido fosfórico teriam eficiência de 36%, as de membrana polimérica, entre 30% e 35%, dependendo da sua capacidade de geração elétrica, as de carbonato fundido entre 43% e 46%, pela mesma razão, e as de

⁵ Considera o custo total de instalação em projetos sem aproveitamento de calor

⁶ Custos de O & M refere-se aos custos de operação e manutenção.

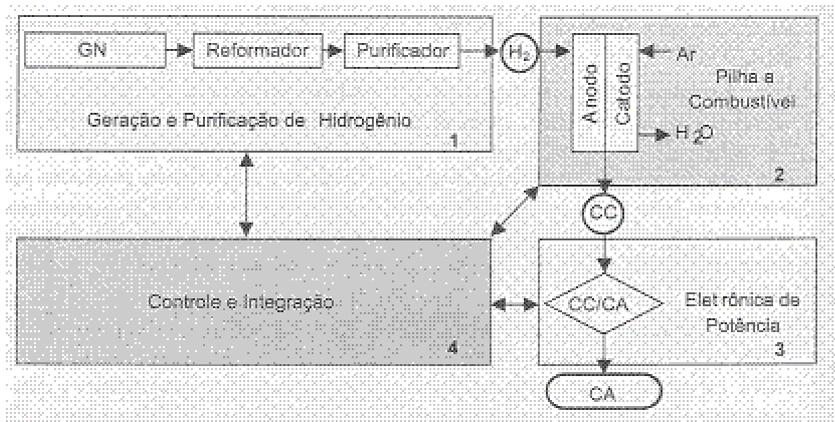
óxido sólido 45%. Segundo o grupo, a eficiência elétrica aumenta conforme a temperatura de operação e o tamanho da pilha.

Em relação aos custos, observa-se que esta talvez seja a maior barreira à entrada da tecnologia no mercado. Enquanto o custo total instalado das máquinas térmicas, sem recuperação de calor, varia entre US\$ 350/kW (motor a diesel) e US\$ 1.100/kW (microturbinas) (LIMA, 2004), para as pilhas a combustível, para projetos de cogeração, este valor oscila entre US\$ 2.800/kW (para uma MCFC acima de 2.000 kW) e US\$ 5.500/kW (para uma PEM de 10 kW) (*ENERGY NEXUS GROUP*, 2002). Considerando que o subsistema de gerenciamento térmico pode representar até 20% do sistema, para efeito de comparação com os valores das fontes térmicas sem aproveitamento de calor, um sistema de pilha igualmente sem aproveitamento de calor não teria custo inferior a US\$ 2.240/kW. O custo instalado pode variar significativamente conforme o escopo dos equipamentos da unidade de geração de energia, área geográfica, condições de competição do mercado, necessidades especiais do local de instalação, remuneração da mão-de-obra e se o projeto é inteiramente novo ou uma adaptação (*ENERGY NEXUS GROUP*, 2002).

Uma usina de geração de energia elétrica que utilize pilhas a combustível é composta por outros equipamentos além da pilha propriamente dita. A Figura 3.2 é uma representação esquemática de uma planta típica de geração de energia elétrica a partir de um sistema que utilize pilhas a combustível. Um sistema baseado nesta tecnologia geralmente envolve (MIRANDA *et al.*, 2003):

- O Módulo da pilha, que transforma a energia química do hidrogênio em corrente elétrica contínua;
- O Módulo do combustível, que limpa e processa o combustível, produzindo H₂ para o módulo da pilha;
- O Módulo de eletrônica de potência, que converte a corrente contínua em corrente alternada;
- O Módulo de controle e integração, que compatibiliza o funcionamento dos diversos módulos.

Figura 3.2 Representação Esquemática de uma Planta de Energia Elétrica a Gás Natural utilizando Pilha a Combustível



Fonte: Miranda et al., 2003

Obviamente a composição de um sistema que envolva a tecnologia de pilhas a combustível refletirá as características de produção desses subsistemas. Do ponto de vista da complexidade e dos custos, cada desenvolvedor de sistema ou de produto possui uma perspectiva diferente sobre os detalhes de cada subsistema. O subsistema do módulo representa de 25% a 40% do custo do equipamento, o de processamento de combustível, 25% a 30%, o de eletrônica de potência, 10% a 20% o de gerenciamento térmico, 10% a 20%, e o de controle e integração, 5 a 15% (*ENERGY NEXUS GROUP*, 2002).

Os custos de operação e manutenção também constituem uma desvantagem das pilhas perante as máquinas térmicas. Para turbinas a gás pode alcançar o custo é da ordem de US\$ 0,003/kW. Mesmo tecnologias novas como as microturbinas podem alcançar custos baixos de operação e manutenção, até R\$ 0,005/kW, semelhante aos motores a diesel e a gás (LIMA, 2004). Já os custos de operação e manutenção dos sistemas a pilha a combustível não são inferiores a US\$ 0,023/kW (*ENERGY NEXUS GROUP*, 2002), valor quase oito vezes maiores que os das turbinas a gás. Os custos de manutenção variam de acordo com o tipo de pilha, o seu tamanho e a maturidade do equipamento sendo que os itens que mais influenciam são: mão-de-obra, substituição de partes complementares (filtros, leitos, válvulas etc) e desgaste dos principais componentes (catalisadores e módulo).

Quanto aos impactos ambientais, a tendência é que as pilhas a combustível se consolidem como uma alternativa ecologicamente viável, visto que esta tecnologia

possui níveis de emissões bem inferiores ao de uma usina termelétrica para todos os gases e também para os particulados. Isto ocorre devido ao fato de que a geração de energia elétrica não envolver a queima de combustível utilizado. Com isso, as emissões decorrem quase que unicamente do processamento do combustível, ou seja, da obtenção do hidrogênio a partir de outra fonte (em geral, reforma de gás natural). Também em relação ao nível de ruídos, a comparação é positiva para as pilhas de combustível. Por não possuírem partes móveis, o nível de ruído durante a sua operação é de 60 dB, ou seja, 25% inferior ao nível de ruído de uma termelétrica, que é de 80 dB.

Considerando as emissões de CO₂ e CH₄, gases geradores do efeito estufa, observa-se uma redução de aproximadamente 45% e 50%, respectivamente. Outras significativas reduções são observadas para as emissões de NO_x e SO_x, gases causadores da chuva ácida, confirmando o seu potencial ecológico. A Tabela 3.2 apresenta dados comparativos de emissões para uma termelétrica com turbina a gás natural com ciclo combinado e para uma planta de geração elétrica com pilha a combustível de óxido sólido com uma turbina a gás com ciclo combinado acoplada.

Tabela 3.2 Emissões de Gases e Particulados de uma Termelétrica com Turbina a Gás Natural e de uma Planta de Geração de Energia Elétrica com Pilha a Combustível de Óxido Sólido.

Tecnologia	NO _x (g / kWh)	SO _x (g / kWh)	CO (g / kWh)	HC (g / kWh)	CO ₂ (g / kWh)	CH ₄ (g / kWh)	Particulados (g / kWh)
SOFC + TG	0,02	0,005	0,004	0,06	232	0,16	0,0
Turbina	0,73	0,01	0,40	0,11	417	0,31	0,0006

Fonte: Miranda *et al.* (2003)

Em resumo, para as aplicações de geração estacionária de energia elétrica, pode-se dizer que a perspectiva de utilizações limpas e com alta eficiência e a gradativa conscientização sócio-ambiental atribuem um grande potencial à tecnologia em comparação com as máquinas térmicas tradicionais (motores a diesel e a gás e turbinas a gás) e mesmo em comparação com tecnologias térmicas novas (microturbinas). Entretanto, os custos de instalação, operação e manutenção ainda constituem uma barreira significativa para a entrada desta tecnologia no mercado, pois atribuem significativa parcela de risco para os projetos iniciais, inibindo a atuação do capital

privado. Para superar esta dificuldade, projetos demonstrativos devem contribuir para a inserção lenta, mas gradual, da tecnologia na matriz energética mundial. Além destes, incentivos governamentais poderão acelerar a sua difusão.

Na comparação de custos entre pilhas e tecnologias tradicionais, consideram-se apenas os valores dos desembolsos referentes à instalação e operação dos sistemas. Não são levados em consideração os custos dos efeitos provocados pelas emissões geradas pelas tecnologias tradicionais. A consideração destes aumentaria a atratividade das pilhas a combustível uma vez que diminuiria a vantagem das tecnologias tradicionais em relação aos custos.

A tabela 3.3 resume a comparação entre a tecnologia de pilhas a combustível e as suas principais concorrentes para geração estacionária de energia elétrica, no caso as tecnologias de motores a gás e a diesel, turbinas e microturbinas para os critérios sugeridos pela IPHE.

Tabela 3.3 Comparação entre o desempenho da tecnologia de Pilha a Combustível e o das Principais Tecnologias Concorrentes para Geração Estacionária de Energia

Critério	Pilha a Combustível	Tecnologias Concorrentes
Eficiência	Entre 30% e 45%, podendo alcançar até 85% em projetos de co-geração com SOFC.	Entre 21% e 43%.
Custo de instalação	Entre US\$ 2.800 / kW (MCFC) e US\$ 5.500 / kW (PEM)	Entre US\$ 350 (motor a diesel) e US\$ 1.100 (microturbina)
Custo de operação e manutenção	US\$ 0,023 / kW	US\$ 0,003 / kW (turbina a gás)
Segurança	Sem maiores considerações se o combustível empregado for gás natural.	Sem maiores considerações.
Emissões de gases do efeito estufa	Significativamente inferiores.	Superiores às da pilha a combustível.
Impactos ambientais locais	Redução de emissões de gases do efeito estufa e de ruídos.	Níveis altos de emissões de gases do efeito estufa e de ruídos.
Impactos econômicos	Possibilidade de promover a geração distribuída e alcançar comunidades isoladas.	Retorno financeiro diminuído pela ineficiência da distribuição da energia até centros urbanos distantes da geração.

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 Transporte

Talvez resida nas aplicações em transporte o potencial mais promissor e revolucionário das pilhas a combustível. Calcula-se que um terço do consumo mundial de petróleo seja destinado à frota mundial composta por cerca de 520 milhões de automóveis, 11 mil grandes aviões comerciais, mais de 28 mil navios e 1,2 milhão de barcos de pescas, todos alimentados por este recurso (RIFKIN, 2003). Dentro desta realidade, os transportes híbridos representam uma alternativa limpa e eficiente, ainda que seu custo seja superior ao dos seus concorrentes, movidos exclusivamente a motor de combustão interna. No futuro, quando a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis se consolidar e atingir a escala industrial, os automóveis poderão se tornar mini-usinas de geração de energia elétrica compatíveis com a rede (grid), durante o período de tempo que permanecem estacionados, e poderão transformar seus proprietários (microprodutores) em fornecedores de energia elétrica.

A fusão entre transporte e geração de energia elétrica trará benefícios econômicos, sociais e ambientais. Sob o ponto de vista econômico, a transformação da frota mundial em ativos capazes de gerar energia elétrica seria suficiente para gerar dez vezes mais eletricidades do que o atual consumo mundial (GUTERL e ROMANO, 2004). Esse aumento de oferta resultará na queda do preço do kW, reduzindo os custos de produção e de vida. Também haverá ganhos em relação à eficiência da distribuição. Com a produção afastada do consumidor, em média, 8% da energia gerada é perdida como calor conforme ela se move através das linhas de transmissão. A produção perto do local de consumo, além de reduzir as perdas, torna a rede menos vulnerável a interrupções de fornecimento causadas por sobrecargas, tempestades ou, até mesmo, atos terroristas. A tendência é o surgimento de uma rede inteligente de duplo sentido, que tanto forneça quanto receba energia de residências conectadas a ela.

Outro impacto econômico significativo ocorrerá com as empresas dos setores automobilístico, elétrico e de petróleo que, com a completa mudança de seu ambiente de negócio, serão submetidas a uma nova realidade e precisarão se adaptar às novas condições de mercado. A indústria do petróleo, apesar de movimentar uma quantia entre dois e cinco trilhões de dólares e ser considerada o maior negócio do mundo (RIFKIN, 2003), exige investimentos de capital de igual magnitude para construir e manter operações que permitam a exploração deste recurso e a produção de energia a partir dele. Para que fosse possível administrar e controlar essa estrutura cara e

complexa, foi estabelecido um modelo organizacional altamente centralizado e hierarquizado que acabou por se refletir em todos os segmentos da economia. Além disso, a necessidade de atingir escalas cada vez maiores, para diversificar os elevados riscos das operações, levou as empresas a uma onda de fusões e aquisições que ditou a maneira de fazer negócios no século XX.

A disseminação de uma nova tecnologia capaz de alterar a matriz energética mundial coloca essas indústrias diante de um novo paradigma. Paula (2003) afirma que elas “devem aprender a usar novas tecnologias de geração de energia e de informação para criar uma nova estrutura baseada em serviços e relacionamentos ao invés de produtos”. Segundo ele, o perfil do consumidor mudará, pois ele deixará de adquirir produtos (combustível e energia elétrica) e passará a demandar serviços que o ajudem a gerenciar a sua própria produção e o seu consumo de energia. Turner (2004 apud GUTERL; ROMANO, 2004) prevê que as empresas de energia terão que copiar o modelo de negócio da indústria automobilística, ou seja, produzir grandes volumes em pouco tempo. Em verdade, Turner se refere ao desenvolvimento de unidades geradoras de energia de pequeno porte para residências ou condomínios, que pudessem ser produzidas em linhas de montagens, como automóveis, que poderão ser exatamente o elo de transição para este novo modelo de negócios. Desta forma, é possível que empresas automobilísticas entrem no setor elétrico e vice-versa.

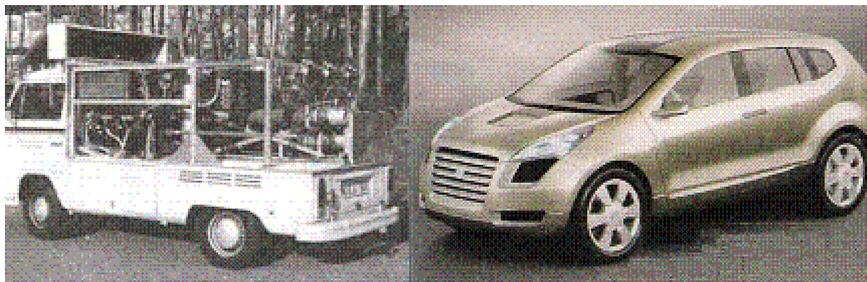
Da mesma forma como a produtividade e a intensidade das atividades econômicas de uma sociedade são afetadas pela sua matriz energética, também o organismo social será influenciado. Essa mudança na disponibilidade e nas formas de produção de energia trará impactos sociais. A nova estrutura permitirá que pessoas antes desprovidas do acesso à energia elétrica tenham acesso a esse recurso, seja pela provável redução do preço do kW, pela possibilidade de geração comunitária, ou, simplesmente, pelo fato de morarem em comunidades isoladas onde a geração distribuída poderia suprir suas necessidades, o que torna essa tecnologia uma possível ferramenta de inclusão social.

Por fim, os impactos ambientais resultantes da aplicação das pilhas a combustível nos transportes também são relevantes. Conforme será apresentado posteriormente neste tópico, as emissões provenientes de motores elétricos que utilizam pilhas a combustível são significativamente inferiores às dos motores de combustão interna convencionais para todos os gases, especialmente nos testes onde a alimentação das células foi feita diretamente com hidrogênio. A questão ambiental provavelmente

constituirá o principal trunfo desta tecnologia, visto que, por todo o mundo, as leis que tratam as causas relacionadas ao assunto estão cada vez mais rigorosas. Na Califórnia, por exemplo, as montadoras foram obrigadas a introduzir veículos de baixa e nenhuma emissão, e a partir de 2003, a aumentar o número destes (LOKURLU, 2003). Com isto, espera-se que haja cerca de 100 mil veículos de emissão zero (ZEV – *zero-emission vehicle*) até 2010 no estado. Por isso, a dimensão ambiental da tecnologia assume não só um aspecto promissor, mas também pode se tornar um acelerador para sua consolidação no mercado.

Assim como as aplicações de geração estacionária, os veículos movidos à pilha a combustível (FCVs – *Fuel Cell Vehicles*) podem ser divididos em duas categorias: veículos leves (LDV – *Light Duty Vehicle*) e veículos de transportes de cargas (caminhões, trens e navios). O acompanhamento periódico desse mercado, apresentado no sítio *Fuel Cell Today* (CROPPER, 2003a, 2004a e 2004b), revela que independentemente do tipo de veículo, o tipo escolhido de pilha para os protótipos desenvolvidos têm sido predominantemente PEMFC. Isto chega a surpreender porque era esperado que os veículos de grande porte pudessem se beneficiar do calor gerado pela operação das células e, por isso, a opção fosse as pilhas de óxido sólido ou de carbonato fundido. A Figura 3.3 mostra dois exemplos de protótipos de veículos movidos a pilhas de combustível, uma Kombi construída no final da década de 80 à esquerda e o protótipo do modelo Sequel da General Motors.

Figura 3.3 Exemplos de Protótipos Construídos

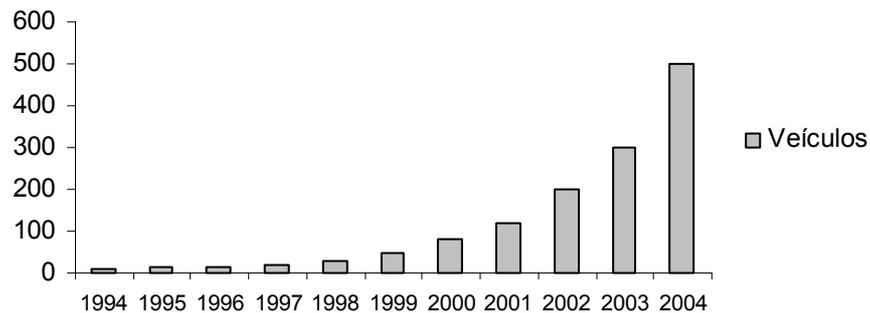


Fonte: Cropper (2004a) e Revista Veja (2004)

Apesar do primeiro protótipo nesta área ter surgido em 1959, o desenvolvimento de novos projetos ocorreu em ritmo lento até 2000, tendo sido construídos apenas cerca de 50 protótipos durante os primeiros 40 anos de pesquisa. Desde então, o interesse cresceu substancialmente. Somente em 2003, foram lançados

cerca de 100 protótipos e, para 2004, eram previstos outros 210 protótipos, o que equivale a mais do que o produzido até 2002 (CROPPER, 2004a). O Gráfico 3.3 apresenta a evolução do número cumulativo de veículos leves movidos a pilhas a combustível construídos.

Gráfico 3.3 Veículos Leves Movidos a Pilhas a Combustível Construídos no Mundo até 2004



Fonte: Cropper (2004a)

O sucesso dos veículos híbridos, movidos por um motor elétrico e outro à gasolina, indica que o consumidor avalia positivamente a iniciativa de produzir veículos limpos. Espera-se que, em 2009, estejam rodando nos EUA cerca de 500 mil automóveis híbridos, que representarão 3% da frota norte-americana (HASTINGS, 2004). Com isso, é razoável supor que a tendência para os FCVs é que o número de unidades produzidas continue a crescer e dê origem inicialmente a pequenas séries de produção, a exemplo do que já ocorre com o Prius, modelo híbrido da Toyota, cuja expectativa de venda para 2004 era de 47.000 unidades (REVISTA VEJA, 2004), número relativamente baixo, mas que deverá crescer rapidamente conforme cresça a conscientização ambiental e social. Os FCVs, por sua vez, ainda necessitarão para se consolidarem que se estabeleça uma rede de distribuição capaz de levar hidrogênio a postos em todo o país.

Apesar do aparente sucesso dos veículos híbridos em solo norte-americano, é no Japão que a tecnologia tem recebido mais apoio. O governo do Primeiro-Ministro Koizumi tem apoiado integralmente esta tecnologia, promovendo a sua introdução e encorajando as empresas líderes a produzi-la em massa (CROPPER, 2004a). Portanto, não é por acaso que as montadoras japonesas estão à frente de seus concorrentes norte-

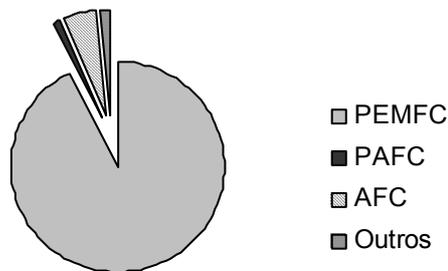
americanos e europeus no que diz respeito à proximidade do mercado. A Toyota, com o Prius, e Honda, com o Insight, estão liderando uma grande revolução no mercado norte-americano (REVISTA VEJA, 2004), tanto que as vendas destes dois modelos já levaram os demais fabricantes a reverem suas estratégias. As metas de produção japonesas são conservadoras, espera-se que 50.000 veículos movidos a pilhas a combustível estejam nas ruas até 2010, mas as probabilidades de serem atingidas são grandes. Além disso, o país possui uma combinação única no mundo de empresas de energia cuja estratégia de longo prazo envolve apoiar o desenvolvimento destes veículos. Nippon Oil e Tokyo Gas já estão fazendo *leasing* de veículos e, conforme a frota aumente, é provável que elas comprem ou façam leasing de um número maior de veículos (CROPPER, 2004a).

A Europa, que apostava no diesel como alternativa limpa e eficiente e demorou a aceitar o fato do hidrogênio ser mais competitivo, já esboça uma reação. A BMW tão logo mostrou o seu protótipo, o H2R, superou nove recordes de velocidade e eficiência entre os modelos movidos a hidrogênio. Outras montadoras européias como a Fiat seguem caminhos semelhantes.

3.2.1 Tipos de Pilha e Combustíveis Utilizados

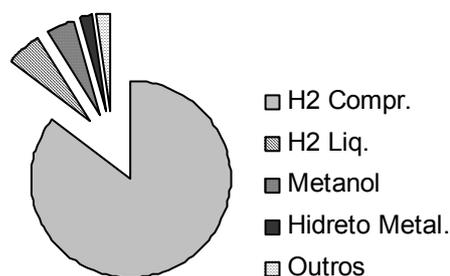
Um levantamento feito pelo *Fuel Cell Today* (CROPPER, 2004a) aponta a PEMFC como principal tecnologia empregada nos protótipos, aparecendo em quase a totalidade dos projetos. A principal razão é a baixa temperatura de operação. Em relação ao combustível empregado, a pesquisa afirma que hoje existe um consenso em torno do hidrogênio comprimido, armazenado em tanques sob alta pressão. Os Gráficos 3.4 e 3.5 apresentam a distribuição dos protótipos por tecnologia e por combustível empregado em 2004.

Gráfico 3.4 Distribuição dos Protótipos por Tecnologia em 2004



Fonte: Cropper, (2004a)

Gráfico 3.5 Distribuição dos Protótipos por Fonte de Combustível



Fonte: Cropper, (2004a)

3.2.2 Comparação com Outras Tecnologias

A utilização de pilhas a combustível no setor de transporte oferece duas vantagens potenciais: não gera poluição no local de sua utilização, o que facilita o controle de poluentes, e o fato de o hidrogênio poder ser produzido a partir de várias fontes. No entanto, ela só se consolidará quando esta tecnologia for capaz de oferecer mais vantagens aos usuários que a combustão interna. O discurso ambiental, a favor de uma tecnologia mais limpa, e o apoio social, apesar de imprescindíveis, perdem suas forças se os custos do veículo não puderem ser arcados pela população. As imposições legais podem forçar a sua entrada no mercado, mas a sua consolidação só ocorrerá se os veículos a hidrogênio puderem competir com os tradicionais em eficiência e custo.

A questão da eficiência exige uma forma sistemática de avaliação que envolve não somente o desempenho do veículo, mas também, a eficiência da cadeia do combustível empregado (*Fuel Chain Efficiency*). Essa abordagem tem por objetivo analisar a eficiência total do sistema, também chamada de eficiência do poço às rodas (*well-to-wheels*) (WALD, 2004). Desta forma, para se comparar as eficiências entre as tecnologias em análise, além do quanto o veículo consegue rodar por unidade de combustível – eficiência do veículo (*tank-to-wheels*) – será avaliado a quantidade de energia desperdiçada na produção e distribuição do combustível empregado, ou seja, a eficiência do poço ao tanque (*well-to-tank*). Torna-se, portanto, uma questão complexa, uma vez que a realidade mostra a existência de um paradoxo. Se por um lado a eficiência dos veículos movidos a pilhas de combustível atinge índices quase que duas vezes maiores que os seus concorrentes convencionais, por outro, a tecnologia de produção e distribuição de hidrogênio para geração de energia elétrica ainda é muito ineficiente, o que aumenta a atratividade de outras tecnologias e combustíveis.

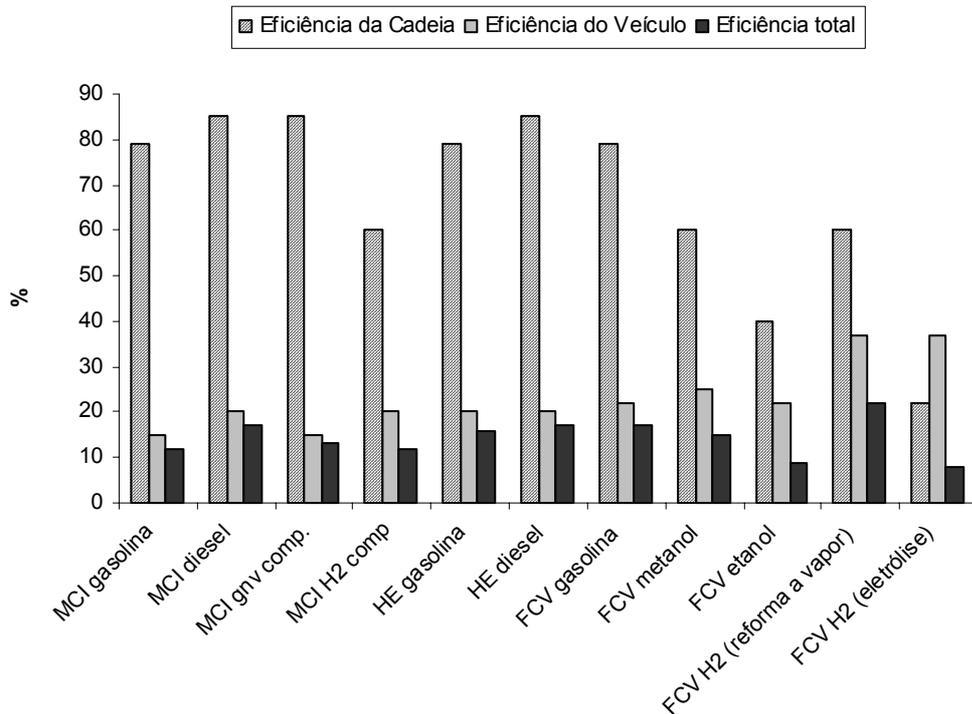
Em relação à eficiência no interior dos veículos, os resultados variam conforme o combustível utilizado, mas de um modo geral, o desempenho dos veículos elétricos é bastante superior ao dos movidos à combustão interna. Além disso, observa-se que o hidrogênio aparece como combustível mais eficiente, independentemente do tipo de motor, uma vez que a utilização deste gás puro nos motores elétricos alcança eficiência próxima a 40%, o dobro da obtida através da utilização de gasolina em motores à combustão interna, que é inferior a 20% (WALD, 2004). Essa diferença constitui uma vantagem para os veículos elétricos, pois uma eficiência maior significa um consumo menor por quilômetro rodado, permitindo assim que os consumidores diminuam seus

gastos com combustível e obtenham vantagens financeiras que compensem o custo adicional decorrente da compra de um veículo mais caro.

O grande obstáculo enfrentado por estes veículos refere-se à baixa eficiência dos processos de produção, distribuição e armazenamento de hidrogênio que compromete a eficiência total do sistema. Enquanto que as perdas energéticas na extração, produção e distribuição de gás natural e gasolina, referentes ao quanto de energia possível ser extraída é perdida durante o processo, sejam por ineficiência do processo ou pelo próprio consumo necessário para executar as atividades da cadeia de produção, ficam em torno de 15% e 20% de toda a energia contida no combustível, respectivamente, a obtenção de hidrogênio a partir do craqueamento do gás natural tem perdas de 40%. A diferença é ainda maior quando se compara a alternativa de geração de hidrogênio a partir de eletrólise da água utilizando energia elétrica da rede. Neste caso, as subtrações energéticas podem alcançar 80% (WALD, 2004).

Fica evidente, portanto, a existência de um paradoxo, se por um lado a eficiência dos veículos elétricos a hidrogênio é bem superior à dos convencionais movidos à combustão interna, por outro lado, a baixa eficiência da cadeia deste combustível diminui a eficiência total do sistema, diminuindo a eficiência total do primeiro grupo. Considerando as perdas energéticas totais, as do motor de combustão interna (MCI), com gasolina como combustível, são de aproximadamente 88%. Já o motor elétrico a hidrogênio tem perdas totais de 78%, se o combustível for o gás natural, e de 92%, se for carvão. O Gráfico 3.6 apresenta e compara as eficiências das principais opções de motores para veículos – motores a combustão interna (MCI), híbridos elétricos (HE) e veículos a pilhas a combustível (FCV) – em cada etapa do sistema – considerando a eficiência do poço ao tanque como a eficiência da cadeia e a eficiência do tanque às rodas, a eficiência do veículo – e também a eficiência total, obtida pelo produto das medições intermediárias.

Gráfico 3.6. Eficiência Energética dos Principais Tipos de Motores



Fonte: Wald (2004)

A viabilização da tecnologia depende, portanto, do estabelecimento da infraestrutura necessária para tornar eficiente a cadeia do hidrogênio. A utilização da energia da rede para produção de hidrogênio e, a partir deste, geração de energia elétrica é hoje uma alternativa ineficiente e praticamente descartada. A melhor alternativa, que seria produzir hidrogênio a partir da reforma a vapor do gás natural, no entanto, concorre em desvantagem com a aplicação deste recurso em turbinas de ciclo combinado de alta eficiência, considerada a melhor aplicação industrial deste combustível (WALD, 2004). O uso de carvão para este fim pode ter efeitos ambientais inversos aos que a tecnologia poderia proporcionar, agravando o problema do aquecimento global através do aumento das emissões de CO₂. Mesmo se fontes renováveis de energia forem utilizadas, a energia gerada seria disputada por aplicações mais rentáveis, tornando-se insuficiente para as suas aplicações em transporte.

Uma das principais dificuldades para se conseguir uma cadeia de hidrogênio eficiente está na dificuldade de armazenar o combustível. Neste caso, o problema está longe de uma solução definitiva, pois há várias rotas tecnológicas possíveis, oriundas de diferentes abordagens. A alternativa mais desenvolvida hoje é a utilização de

tanques de hidrogênio comprimido. No entanto, ela possui restrições quanto à segurança. Outra possibilidade, a utilização de hidrogênio líquido demanda uma grande quantidade de energia para liquefazer o gás, o que diminui o interesse por esta alternativa. Por fim, a alternativa mais promissora, mas também a que necessita mais desenvolvimento para atingir a maturidade comercial, é a de armazenagem através de hidreto metálico. A solução adotada será aquela que melhor atender os requisitos exigidos pelos usuários, entre eles (BURNS, McCORMICK e BORRONI-BIRD, 2002):

- Ser capaz de armazenar combustível suficiente para 300 milhas;
- Ter reabastecimento rápido e simples;
- O reservatório deve durar pelo menos 150 mil milhas;
- Operar com temperaturas entre -40 °C e +45°C;
- Atender os requisitos de segurança.

Outro obstáculo a ser superado é o preço. Segundo a pesquisa de mercado do *site Fuel Cell Today* (CROPPER, 2004a), o modelo mais barato de automóvel movido exclusivamente por pilhas a combustível já disponível no mercado, uma pick-up montada a partir de um Nissan Frontier (ANUVU, 2004), desenvolvido pela empresa norte-americana Anuvu, custa pelo menos US\$ 100 mil. No entanto, analisando-se os veículos híbridos que já chegaram ao mercado (Prius e Insight), pode-se imaginar como esta tecnologia poderá ser vantajosa para o consumidor quando um grande número de sistemas estiver em produção. Enquanto a eficiência média da frota americana movida à combustão interna é de 8,5 km/l, a dos veículos híbridos supera 25,5 km/l, ou seja, três vezes superior. Considerando que a diferença paga por um veículo deste seja de US\$ 3.000, para se justificar este investimento adicional são necessários 160 mil quilômetros rodados (REVISTA VEJA, 2004). A Tabela 3.4 apresenta a comparação de eficiência e custo entre os modelos de automóveis híbridos e convencionais mais eficientes vendidos nos EUA em 2004.

A eficiência dos FCVs, superior à dos híbridos, aliada à expectativa de desenvolvimento futuro da cadeia de hidrogênio, permite afirmar que, quando estes alcançarem a mesma diferença de preço, eles necessitarão de uma quilometragem menor para se tornarem economicamente viáveis.

Tabela 3.4 Custo e Consumo dos Automóveis mais Eficientes Vendidos nos EUA em 2004

Modelo	Preço (US\$)	Consumo urbano (km / l)	Consumo em Estrada (km / l)
Honda Insight Hybrid	19.180	25,51	28,06
Toyota Prius Hybrid	20.295	25,51	21,68
Honda Civic Hybrid	19.650	20,40	19,98
VW New Beetle TDI	19.760	16,15	19,55
VW Golf TDI	17.200	16,15	19,55
VW Jetta TDI	18.670	16,15	19,55
VW Jetta Wagon TDI	19.670	15,30	19,98
Toyota Echo	10.355	14,88	18,28
Toyota Corolla	13.570	13,60	17,00

Fonte: Hastings (2004)

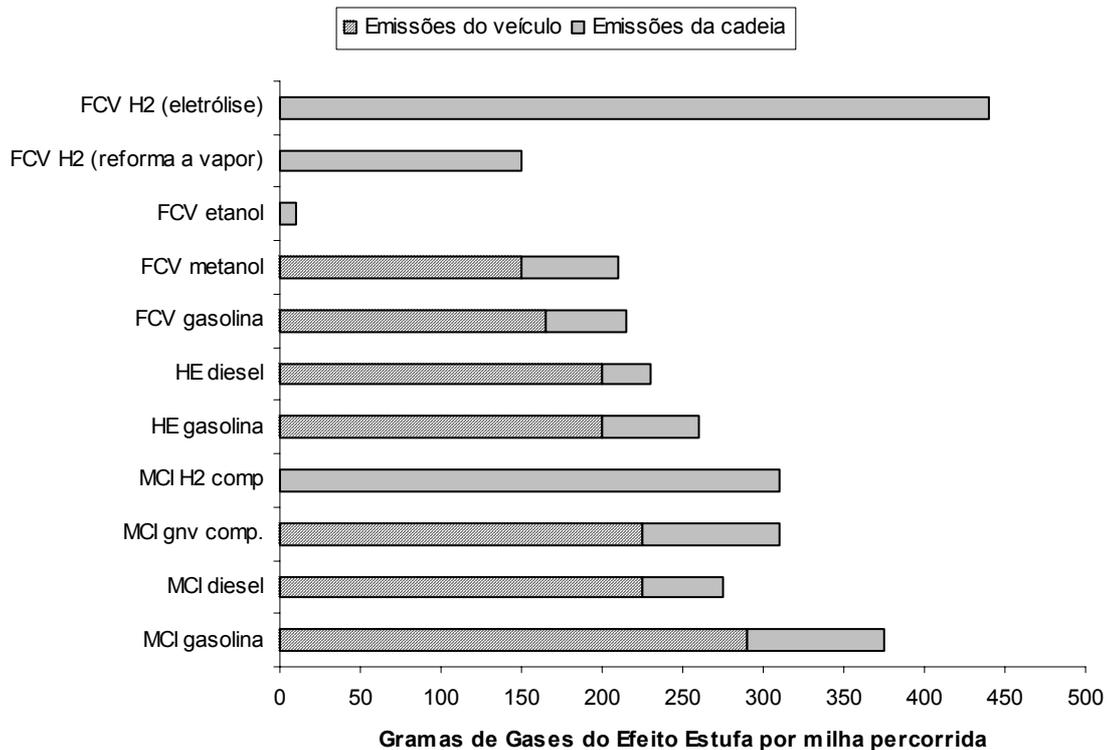
Também a segurança dos veículos é uma questão que necessita ser desenvolvida. Entre as desvantagens está o fato de o hidrogênio queimar rapidamente, pois a faixa de concentração em mistura com o ar na qual ele queima é de 2% a 75% de hidrogênio. Para efeito de comparação, a combustão do gás natural em mistura com o ar ocorre na faixa de 5% a 15% de gás natural (WALD, 2004). Além disso, a quantidade de energia necessária para que isto ocorra também é menor e a chama é invisível, o que dificulta a identificação da sua queima.

Outro critério de comparação, o nível de emissões de gases causadores do efeito estufa favorece os FCVs mas também varia conforme o combustível empregado. Comparando um motor de combustão interna à gasolina com um de pilhas a combustível utilizando o mesmo combustível, observa-se que o primeiro libera quase 400 gramas de gases do efeito estufa por milha percorrida, enquanto o segundo, algo em torno de 250 gramas por milha percorrida, ou seja, 37,5% menor (WALD, 2004).

Outros combustíveis conjugados com a tecnologia de pilha a combustível propiciam níveis ainda mais baixos de emissões: o metano gerado a partir da reforma a vapor do gás natural, por exemplo, libera cerca de 150 g de gases do efeito estufa por milha percorrida (62,5% menor), já o etanol, cujas emissões são reabsorvidas por plantações de cana-de-açúcar ou milho, tem saldo de emissões residual desprezível, ou

seja, subtraindo o que é reabsorvido do que foi emitido, o saldo é quase nulo. O Gráfico 3.7 apresenta e compara o nível de emissão de gases causadores do efeito estufa das principais opções de motores para veículos automotores e dos principais combustíveis.

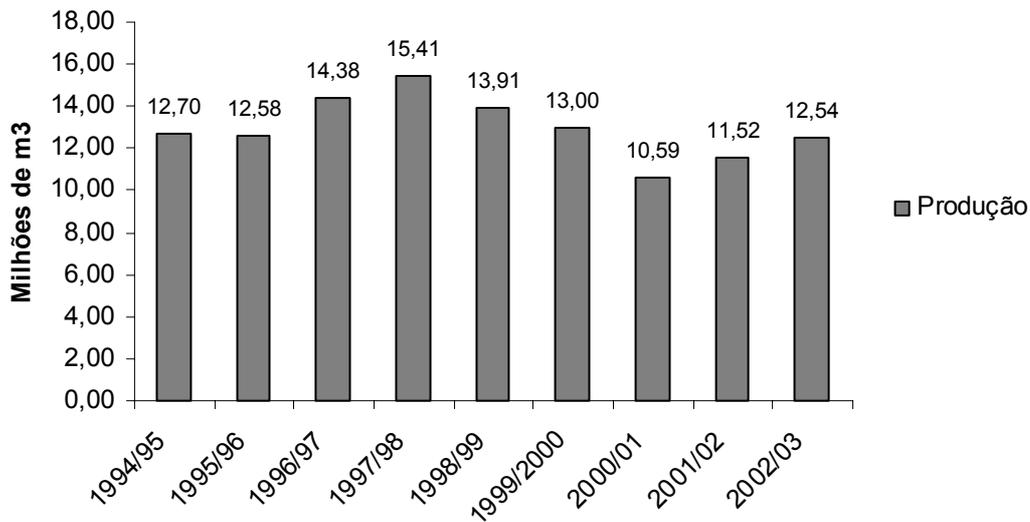
Gráfico 3.7 Nível de Emissões de Gases do Efeito Estufa por Tipo de Motor



Fonte: Wald (2004)

No Brasil, a utilização de etanol aparece como uma alternativa interessante. Além de o combustível ser quase isento de emissões indesejáveis, a produção do combustível no país já se encontra em estágio comercial maduro, tendo atingido a marca de 15 milhões de m³ na safra 1997/98. O Gráfico 3.8 apresenta a produção de etanol no Brasil entre as safras 1994/95 e 2002/03, demonstrando o potencial deste combustível no país. As vantagens ambientais da utilização deste combustível podem ser ainda maiores se for considerado o fato de que as plantações de cana-de-açúcar absorvem as emissões geradas no processo de produção do combustível.

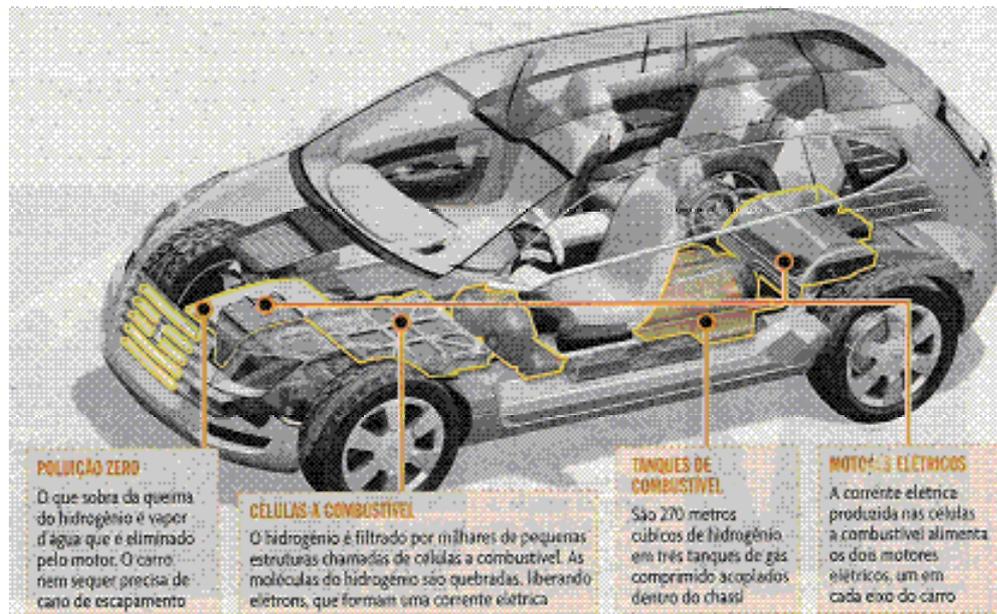
Gráfico 3.8 Produção de Etanol no Brasil de 1994/95 a 2002/03



Fonte: União da Agroindústria Canavieira de São Paulo – Única (2004).

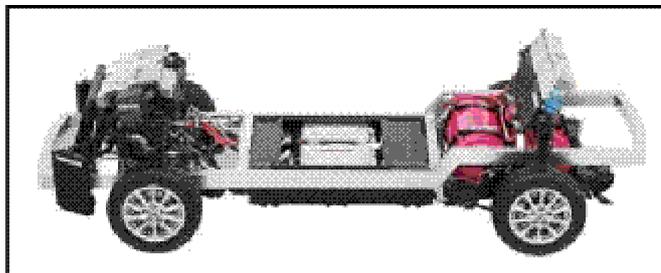
Outro aspecto favorável dos FCVs é a flexibilização de projeto permitida pela substituição do motor de combustão interna e de toda mecânica associada a ele. A nova tecnologia permite a utilização de um chassi plano que facilita a montagem e desmontagem da carroceria, simplificando o projeto e a produção do automóvel (BURNS, McCORMICK e BORRONI-BIRD, 2002). A partir de um número pequeno de chassis – que diferirão apenas pelo tamanho – será possível montar vários modelos pré-fabricados em módulos. Além disso, um mesmo chassi pode ser utilizado mais de uma vez, substituindo o modelo de carroceria, dando origem a um novo automóvel. A retirada do bloco do motor permite o rebaixamento do centro de gravidade do carro, tornando-o mais fácil de manobrar e mais estável. Além disso, diminui o número de partes e componentes, o que libera espaços e diminui os custos. Essa flexibilidade poderá contribuir para resolver as dificuldades de custos. A Figura 3.4 ilustra o chassi de um FCV. Já a Figura 3.5 mostra o chassi de um FCV da Honda.

Figura 3.4 Representação de Chassi de FCV



Fonte: Revista Veja (2005)

Figura 3.5 Chassi do Honda FCX



Fonte: Cropper, (2004a)

Desta avaliação, pode-se concluir que, apesar de a indústria automobilística constituir um mercado promissor para as pilhas a combustível, as características destas ainda não satisfazem os requisitos exigidos pelos consumidores. Um automóvel, por exemplo, requer cerca de 50 kW para se locomover e é utilizado em média por duas horas (WALD, 2004). Nessas condições, o investimento na tecnologia ainda é muito alto e as vantagens obtidas em decorrência de custos menores de operação não são suficientes para recompensar financeiramente esse gasto maior. Entretanto, o desenvolvimento de uma infra-estrutura voltada para a cadeia do hidrogênio, a esperada queda do preço da tecnologia decorrente do aumento do número de sistemas, a

crescente conscientização social e ambiental e um rigor maior das legislações sobre emissões de poluentes devem criar um ambiente muito mais favorável para a sua adoção. Desta maneira, é razoável prever que a maturação comercial desta aplicação provavelmente ocorrerá após a consolidação de aplicações em outros mercados.

A tabela 3.5 resume a comparação entre a tecnologia de pilhas a combustível e as suas principais concorrentes para aplicações em transporte, no caso os motores a combustão interna para os critérios apontados pela IPHE.

Tabela 3.5 Comparação entre o desempenho da tecnologia de Pilha a Combustível e o das Principais Tecnologias Concorrentes para Transporte

Critério	Pilha a Combustível	Motor de Combustão Interna
Eficiência da Cadeia (well-to-tank)	Entre 20% e 60%	Entre 80% e 85%.
Eficiência do veículo (tank-to-wheels)	Cerca de 40%.	Cerca de 20%.
Custo (preço ao consumidor)	US\$ 100 mil	US\$ 20.000
Segurança	Problemas na administração do metanol.	Utilização dos principais combustíveis empregados já é de domínio do usuário.
Emissões de gases do efeito estufa	250 g de gases do efeito estufa / milha percorrida utilizando gasolina como combustível.	400 g de gases do efeito estufa / milha percorrida utilizando gasolina como combustível.
Impactos ambientais locais	Pequenos	Grandes
Impactos econômicos	Possibilidade de converter automóveis em mini-usinas.	Ganhos apenas para a indústria automobilística.

Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 Aplicações Portáteis

As aplicações portáteis são aquelas cuja demanda de energia não ultrapassa 1,5 kW, além disso, são móveis, mas não se destinam à indústria automobilística (JOLLIE, 2004). Elas podem ser divididas em quatro grupos: mini-geradores, carregadores de baterias convencionais, aplicações militares e equipamentos eletrônicos. Os dois primeiros dispõem de alternativas de geração de energia elétrica menos dispendiosas e dominantes e, portanto, constituem nichos onde casos isolados com requisitos específicos, tais como baixos níveis de ruído e de poluição, podem criar oportunidades para a utilização de pilhas a combustível. As aplicações militares, por outro lado, constituem uma forma de acelerar o seu desenvolvimento, pois as forças armadas as avaliam com uma perspectiva de longo prazo e, por isso, entendem que seus benefícios tendem a compensar o investimento maior (CROPPER, 2003b). Em muitos casos elas atuam como os usuários iniciais, pagando valores altos para obter bons desempenhos em requisitos específicos. Neste caso, as pilhas poderiam ser úteis em rádios comunicadores e ferramentas portáteis, tais como furadoras, e as características valorizadas seriam:

- A alta densidade de potência;
- A facilidade de recarga;
- A redução do peso;
- Os baixos níveis de ruído; e,
- A possibilidade de utilizar o calor gerado.

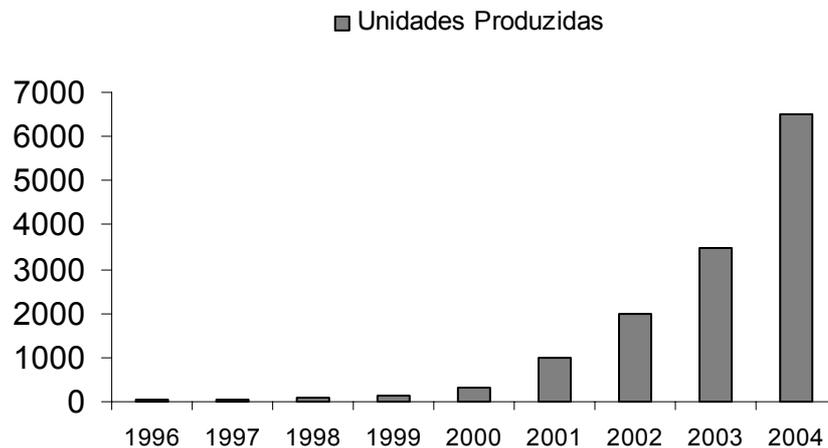
Mas o grupo que oferece a melhor perspectiva financeira é o de aparelhos eletrônicos portáteis. Telefones celulares, computadores portáteis, e APDs (Assistentes Portáteis Digitais, também conhecidos pelo termo inglês *PDA*s – *Portable Digital Assistants*) – poderiam ter seus desempenhos melhorados com a aplicação desta tecnologia. Além de maior autonomia, eles poderiam se beneficiar de uma disponibilidade maior de energia e, com isso, oferecer funções que antes não podiam ser suportadas pelas baterias convencionais tais como a terceira geração de celulares (3G) e a conectividade sem fio universal.

Apesar de os telefones celulares constituírem o maior mercado potencial nesta aplicação, os desafios relacionados à miniaturização dos componentes, controle da temperatura de operação e custos tendem a ser maiores. Os computadores portáteis

assumem a posição de equipamento eletrônico mais suscetível à introdução desta tecnologia porque suas dimensões e seu preço absorvem melhor os impactos da adição de novos componentes. Os APDs, por sua vez, tendem a englobar, no futuro, as funções de telefone celular, computador portátil, câmera digital e aparelho de música (MP3) e devem incorporar também a tecnologia, o que, no entanto, não deve ocorrer no curto prazo.

De todas as potenciais utilizações das pilhas a combustível, as portáteis são aquelas que parecem estar mais próximas do mercado, podendo sua entrada ocorrer antes das demais e, por isso, neste trabalho a análise se concentrará unicamente neste segmento. Este cenário favorável decorre principalmente do fato de suas principais concorrentes, as baterias de lítio e de níquel-cádmio, possuírem vida útil limitada, oferecerem uma autonomia muito pequena aos equipamentos e terem um alto custo por kW (BUCHMANN, 2001), além de constituírem dejetos potencialmente tóxicos cujo descarte exige atenção especial da sociedade. O número total de sistemas produzidos vem crescendo a cada ano, já tendo superado a marca de 6.000 em 2004 (JOLLIE, 2004). O Gráfico 3.9 apresenta a evolução deste número.

Gráfico 3.9 Sistemas Portáteis Construídos no Mundo de 1996 a 2004



Fonte: Jollie (2004)

3.3.1 Tipos de Pilha e Combustíveis Utilizados

Duas tecnologias competem pelo predomínio nas aplicações portáteis: a de membrana polimérica e a de metanol direto, com ligeira vantagem para o segundo tipo (JOLLIE, 2004). Entretanto, outros tipos de pilha vêm conseguindo espaço nesse segmento. É o caso, por exemplo, das pilhas a óxido sólido. Apesar de essa diversidade oferecer um número maior de possíveis soluções, pode causar uma perda de foco e retardar o progresso em direção ao mercado ao dispersar recursos, criando produtos concorrentes e eventualmente até códigos e padrões diferentes. Dado o grau de desenvolvimento da tecnologia em 2005, ainda é impossível prever se ela será bem sucedida nesta disputa. No entanto, há uma considerável especulação que a falta de regulamentações aplicáveis pode constituir um obstáculo a sua disseminação (JOLLIE, 2004).

A preferência pela DMFC pode ser explicada em parte pela facilidade de se usar metanol diretamente. É possível que este combustível se torne a opção para os sistemas portáteis uma vez que ele é a alternativa mais barata e a mais simples existente atualmente. As PMFC, por sua vez, utilizam hidrogênio puro, o que exige um processamento anterior do combustível fonte do gás e também implica em dificuldades técnicas para o seu armazenamento e manipulação. O Metanol é fácil de armazenar e, nos EUA, já conta com uma rede de distribuição, um fator crítico na criação de um mercado para as aplicações portáteis e poderia ser obtido em cartuchos descartáveis ou reutilizáveis da mesma forma como o butano é armazenado e vendido como combustível para isqueiros (CROPPER, 2003b). O obstáculo para a sua ampla utilização reside na sua toxicidade, o que exigirá padrões de segurança rígidos da produção à utilização. As demais alternativas de combustível possuem como desvantagem o alto custo de desenvolvimento. É improvável que, no curto prazo, os usuários estejam dispostos a pagar mais por elas.

3.3.2 Comparação com Outras Tecnologias

Apesar de os equipamentos eletrônicos oferecerem cada vez mais funções, as baterias de lítio e níquel-cádmio que os alimenta não evoluíram no mesmo ritmo e podem em breve limitar o seu desenvolvimento. Isto porque são pesadas, possuem um alto custo por kW gerado e uma vida útil muito pequena (DYER, 1999). Mesmo assim, comercialmente, ainda são a única opção para uma série de aparelhos – que varia de brinquedos a computadores portáteis – o que cria condições e um ambiente receptivo para a introdução de uma nova tecnologia, como a de pilhas a combustível.

Em relação à eficiência com que geram a energia, pilhas a combustível e baterias convencionais não diferem muito, pois ambas são excelentes para converter energia química em elétrica. Entretanto, se analisada a quantidade de energia por unidade de massa dos combustíveis usados, as primeiras têm vantagem. A utilização de hidrogênio líquido puro pode fornecer 800 vezes a energia eletroquímica contida por unidade de massa de níquel-cádmio. Essa superioridade também ocorre quando o combustível é um composto rico em hidrogênio. Um litro de metanol, por exemplo, teoricamente, poderia gerar cerca de 5.000 Wh, o suficiente para manter em funcionamento um computador portátil por um mês. Um volume comparável de lítio, cuja densidade de corrente é a maior entre as baterias recarregáveis, seria capaz de fornecer apenas um décimo dessa capacidade, ou seja, 500 Wh ou três dias de autonomia (DYER, 1999).

A conveniência é outro aspecto positivo a favor das pilhas a combustível. Além de poderem utilizar uma ampla gama de combustíveis, o seu carregamento é rápido, podendo ser feito por meio de ampolas de metanol ou do combustível utilizado, diferentemente das baterias convencionais que levam horas para estarem plenamente recarregadas. A vida útil é outro fator conveniente desta tecnologia. Enquanto as baterias convencionais possuem vida útil limitada, com seu desempenho sendo comprometido com o consumo dos seus componentes, o que implica a sua substituição, as pilhas a combustível podem gerar energia por mais tempo, necessitando apenas que mais combustível seja fornecido.

Os custos de instalação e operação, que para outras aplicações constituem obstáculos significativos, para as aplicações portáteis são menores do que os das tecnologias concorrentes disponíveis. O custo de instalação de uma pilha a combustível de 1 kW em 2001 era de entre US\$ 3.000 e US\$ 7.500, enquanto que para uma bateria

de níquel-cádmio de mesma capacidade, esse custo é de US\$ 7.100 (BUCHMANN, 2001), ou seja, apenas nos casos extremos o preço de uma pilha a combustível é superior. Ainda que o preço do combustível seja favorável às baterias convencionais – US\$ 0,15/kWh contra US\$ 0,35/kWh das pilhas a combustível – os custos totais de operação por kW, que incluem custos de manutenção, gastos com combustíveis e substituição de equipamento, também são favoráveis à nova tecnologia, variando em uma faixa de US\$ 1,85 a US\$ 4,10 para elas, contra um custo de US\$ 7,10 para as tecnologias convencionais (BUCHMANN, 2001). Com relação à vida útil, as pilhas também estão em vantagem em relação às baterias de níquel-cádmio. Enquanto as primeiras conseguem operar por 2.000 horas antes de uma grande revisão ou troca, as segundas só atingem 1.500 horas. A Tabela 3.6 apresenta a comparação dos custos para gerar 1 kW de energia entre as pilhas a combustível e as baterias de níquel-cádmio, considerando o investimento inicial, o consumo de combustível, manutenção e eventual substituição do equipamento, utilizando valores de 2001.

Tabela 3.6 Custos de Instalação e Operação de Pilhas a Combustível e de Baterias de Níquel-Cádmio

Fonte de Energia	Investimento ⁷ (US\$)	Vida útil (em horas, antes de grande revisão ou troca)	Custo do Combustível (US\$ / kWh)	Custo total ⁸ (US\$ / kWh)
Bateria de NiCd (para aplicações portáteis)	7.000	1.500	0,15	7,50
Pilha a combustível (para aplicações portáteis)	3.500 – 7.500	2.000	0,35	1,85 – 4,10

Fonte: Buchmann (2001)

Também com relação aos impactos ambientais as pilhas a combustível parecem desfrutar de uma posição mais competitiva. Apesar de ambas terem baixos níveis de

⁷ Para um equipamento capaz de gerar 1 kW.

⁸ Inclui combustível, manutenção e substituição de equipamento.

emissão de gases poluidores e de ruído, o descarte das baterias convencionais envolve cuidados especiais uma vez que estas utilizam metais pesados que, quando não são descartados adequadamente podem contaminar o ambiente. As pilhas a combustível, por originarem apenas água, calor e energia elétrica como resultado de sua operação, não necessitam um tratamento tão rigoroso, podendo inclusive o seu módulo principal (*stack*) ser reutilizado.

Quanto à segurança, este talvez seja o único critério no qual as baterias convencionais superam as pilhas a combustível. A dificuldade das pilhas reside em determinar uma forma segura e eficiente de armazenamento do combustível. A utilização de hidrogênio puro sob a forma de gás comprimido é perigosa devido à facilidade com que o gás queima. A liquefação do gás também acarreta transtornos visto que seriam necessários equipamentos criogênicos para isto. A opção do metanol diminui os riscos, mas de qualquer forma ele ainda seriam superiores aos oferecidos pelas baterias convencionais.

Em virtude de o desempenho das pilhas a combustível para esta aplicação ser superior ao da tecnologia concorrente em quase todos os critérios de comparação, incluindo custo, é possível que este seja o segmento escolhido para a entrada comercial da tecnologia. Entretanto, antes que isto ocorra, será necessário superar alguns obstáculos, tais como:

- A miniaturização dos componentes sem que isto comprometa o desempenho ou os custos;
- A eliminação de elementos prejudiciais às células do combustível utilizado, como CO e CO₂;
- A determinação de uma forma segura para o usuário final lidar com o combustível.

A tabela 3.7 resume a comparação entre a tecnologia de pilhas a combustível e as suas principais concorrentes para aplicações em eletroeletrônicos portáteis, no caso as baterias de NI-Cd para os critérios apontados pela IPHE.

Tabela 3.7 Comparação entre o desempenho da tecnologia de Pilha a Combustível e o das Principais Tecnologias Concorrentes para Pequenas Aplicações Portáteis.

Critério	Pilha a Combustível	Baterias de Ni-Cd
Eficiência	Alta. Superior em quantidade de energia por unidade de massa.	Alta.
Custo	Entre US\$ 1,85 / kW e US\$ 4,10 / kW.	US\$ 7,50 / kW.
Segurança	Problemas na administração do metanol.	Utilização segura para os usuários.
Emissões de gases do efeito estufa	Baixos níveis de emissões.	Baixos níveis de emissões.
Impactos ambientais locais	Pequenos.	Grandes preocupação com o descarte final.
Impactos econômicos	Possibilidade de aumentar a autonomia de aparelhos eletroeletrônicos portáteis.	Pequenas oportunidades de melhoria de desempenho.

Fonte: Elaborada pelo autor

3.4 Resumo Comparativo das Aplicações

Neste capítulo foi realizada a avaliação das pilhas a combustível. Para isso, foi necessário selecionar uma metodologia de avaliação de tecnologia que compreendesse os aspectos destes dispositivos e que, portanto, fosse apropriada para este caso. A opção pela proposta da IPHE ocorreu devido ao fato de esta ser especificamente direcionada para a tecnologia em estudo e ser desenvolvida por uma entidade de âmbito global que visa a criar condições para organizar, avaliar e coordenar programas multinacionais de pesquisa, desenvolvimento e extensão. Os resultados obtidos a partir da sua aplicação permitem identificar os pontos fortes e fracos das pilhas a combustível perante dispositivos concorrentes nas suas três principais aplicações: geração estacionária de energia, transporte e aplicações portáteis. O cruzamento entre os obstáculos identificados nesta etapa e as características do tipo de pilha dominante em cada aplicação, descritas no capítulo anterior permite apontar as prioridades para seu desenvolvimento.

Para a geração de energia estacionária, observa-se a existência de dois grandes mercados: o de pequenas aplicações, que engloba residências e escritórios, e o de grandes aplicações, que inclui hospitais, indústrias e grandes centros comerciais. Em ambos, a utilização desta tecnologia seria adequada em projetos de fornecimento ininterrupto de energia, de energia de reserva ou de co-geração. Outro argumento a seu favor é a expansão da geração distribuída, que possibilitaria aumentar a oferta de energia, diminuir as perdas na distribuição, melhorar a confiabilidade do sistema elétrico e expandir o percentual populacional que tem acesso a energia elétrica. Além disso, em comparação a outras fontes de energia, é uma opção que apresenta boa eficiência elétrica e poucos impactos ambientais.

Entretanto, apesar de todas as potenciais vantagens oferecidas, há duas barreiras que retardam a disseminação das pilhas a combustível e explicam o pequeno número de sistemas produzidos: os altos custos, de instalação e manutenção, e a reduzida vida útil. Os principais obstáculos encontrados refletem as dificuldades encontradas no desenvolvimento dos tipos de pilha mais empregados neste caso, que são: PEMFC, SOFC e MCFC. Estes três tipos de pilhas encontram problemas com peças e componentes, o que indica que o foco para as pesquisas futuras neste campo deve incluir o desenvolvimento de catalisadores e eletrodos melhores, mais baratos e mais

tolerantes a impurezas, melhorar os materiais de conexão e os sistemas de controle e aperfeiçoar a compreensão das estruturas e da dinâmica das reações.

Nas aplicações em transporte, reside o que talvez seja o potencial mais promissor e revolucionário das pilhas a combustível, capaz de promover mudanças econômicas, ambientais e sociais significativas. Os transportes equipados com estes dispositivos utilizam o combustível contido em seus tanques de maneira mais eficiente (eficiência do veículo) além de constituírem uma alternativa limpa e silenciosa frente aos atuais, movidos à combustão interna. No entanto, a sua característica mais extraordinária é a possibilidade de eles se transformarem em mini-usinas de energia elétrica no período em que permanecem estacionados. Essa associação entre transporte e geração de energia elétrica será capaz de aumentar de maneira expressiva a oferta de energia elétrica, gerar inclusão social e promover alterações no comportamento dos organismos sociais, vez que os consumidores deixarão de consumir produtos e demandarão serviços.

A evolução e a penetração dos FCVs no mercado, no entanto, encontram obstáculos associados à tecnologia, à cadeia do hidrogênio e a seu projeto. Em relação ao primeiro tipo de obstáculo, as dificuldades encontradas refletem os problemas enfrentados pelo tipo de pilha dominante, no caso, a PEMFC, e explicam o seu custo maior. Quanto ao segundo tipo, o problema verificado reside na baixa eficiência da produção, distribuição e armazenamento do hidrogênio (eficiência do poço ao tanque ou *well-to-tank*), que acaba prejudicando a eficiência geral da cadeia do hidrogênio, tornando-a igual à dos veículos à combustão interna. Por fim, problemas relacionados ao projeto dos veículos também constituem dificuldades para a transição para este novo dispositivo. Aspectos como a temperatura de operação e o tamanho do módulo das pilhas se confrontam com as exigências de conforto dos usuários. Deste modo, a pesquisa para esta aplicação deve ocorrer de forma mais abrangente. Esforços no desenvolvimento de novos materiais são tão necessários quanto melhorias nos processos de produção, distribuição e armazenamento de hidrogênio.

A terceira aplicação potencial desta tecnologia refere-se a sua utilização em situações cuja demanda de energia é inferior a 1,5 kW, classificadas em quatro grupos: mini-geradores, carregadores de baterias convencionais, aplicações militares e equipamentos eletrônicos, sendo este último, composto por telefones celulares, computadores portáteis e APDs, o que apresenta a melhor perspectiva financeira. De todas as potenciais utilizações das pilhas a combustível, as portáteis são aquelas que

parecem estar mais próximas do mercado, podendo sua entrada ocorrer antes das demais. E dentro deste grupo, os computadores portáteis assumem a posição de equipamento eletrônico mais suscetível à introdução desta tecnologia visto que suas dimensões e preço absorvem melhor os impactos da adição de novos componentes. Os PDAs, por sua vez, tendem a englobar, no futuro, as funções de telefone celular, computador portátil, câmera digital e aparelho de música (MP3) e devem seguir a tendência e incorporar tecnologia, assim como os telefones celulares. Estes dois grupos de aparelho apresentam como desafios à utilização de pilhas a combustível: a miniaturização dos componentes, o controle da temperatura de operação e os custos que podem aumentar. Mas, ainda assim, representam o maior mercado dentro desta aplicação.

Entre as vantagens imediatas possibilitadas em decorrência do seu uso estariam o aumento da autonomia de funcionamento destes aparelhos e o conseqüente suporte a novas funções. Além disso, os custos por kW e a vida útil, duas características que nas demais aplicações aparecem como pontos fracos, neste caso, também constituem vantagens competitivas em virtude das tecnologias concorrentes, as pilhas de níquel-cádmio e as de lítio, demonstrarem um desempenho pior, ou seja, as pilhas a combustível produzem energia a um custo menor e duram mais que as suas concorrentes. Outras vantagens seriam a relação entre energia gerada e quantidade de massa superior, a conveniência de poder utilizar uma ampla gama de combustíveis e o fato de gerar rejeitos menos agressivos ao meio-ambiente e de possuir um descarte mais simples.

Apenas no quesito segurança as pilhas concorrentes apresentam um desempenho superior, indicando que as pesquisas devem se concentrar nesta questão. Aspectos relacionados à tecnologia dominante, no caso a DMFC, também devem ser foco de pesquisas futuras, em especial no que se refere à miniaturização dos componentes e a sua tolerância a impurezas. A Tabela 3.5 resume as características de cada aplicação potencial das pilhas a combustível.

**Tabela 3.8 Resumo das Características e Tecnologias das Aplicações
Potenciais das Pilhas a Combustível**

Aplicação	Pilhas Dominantes⁹	Vantagens	Desvantagens
Aplicações Estacionárias	PAFC, MCFC, PEMFC e SOFC (grandes aplicações); PEMFC, SOFC e AFC (pequenas aplicações)	<ul style="list-style-type: none"> – Alta eficiência; – Baixos níveis de emissão de poluentes e ruídos; 	<ul style="list-style-type: none"> – Altos custos de instalação, operação e manutenção; – Necessidade de novos padrões de segurança.
Transportes	PEMFC, PAFC e AFC	<ul style="list-style-type: none"> – Altíssimo rendimento (km/l); – Possibilidade de gerar energia com veículo estacionado; – Baixos níveis de emissão de poluentes e ruídos; 	<ul style="list-style-type: none"> – Ineficiência da cadeia energética do H₂; – Custo superior; – Redução do espaço interno disponível para o usuário; – Desconforto causado pelas altas temperaturas;
Aplicações Portáteis	PEMFC e DMFC	<ul style="list-style-type: none"> – Maior autonomia proporcionada; – Facilidade de recarga; – Peso menor; – Custo competitivo; – Vida útil maior; – Variada gama de combustíveis; – Poucos rejeitos; – Fácil descarte. 	<ul style="list-style-type: none"> – Necessidade de novos padrões de segurança.

Fonte: Elaborada pelo autor

⁹ Em 2004.

4. Pesquisa de Mercado para Aplicações de Pilhas a Combustível em Comunidades sem Fornecimento de Energia Elétrica

Uma vez apresentada e avaliada a tecnologia, inicia-se uma tentativa de compreensão de como ela poderia evoluir dos desenvolvimentos laboratoriais para a consolidação definitiva em aplicações práticas e correntes, ou seja, de que forma poderia ocorrer o surgimento e a comercialização de produtos e sistemas que utilizem pilhas a combustível. Desta forma, o objetivo deste capítulo é entender como as necessidades e os requisitos dos usuários serão atendidos em uma situação que pressuponha o uso deste mecanismo como alternativa de fonte de energia elétrica. Esta pode ser considerada a etapa de especificação do projeto, cujo propósito segundo Baxter (1998) é fixar objetivos para o novo produto. Segundo o mesmo autor, se a orientação dada durante o desenvolvimento for direcionada para o mercado as chances de sucesso comerciais desta inovação aumentam por um fator igual a cinco, ou seja, produtos elaborados a partir de uma orientação voltada para o mercado têm cinco vezes mais chances de serem bem sucedidos quando atingirem a fase comercial do que produtos que eram considerados “marginalmente diferentes”. Para que isto ocorra, é necessário:

“Orientar o produto para o mercado significa analisar os produtos concorrentes e fazer uma pesquisa preliminar de mercado para identificar a melhor oportunidade de produto” (pg. 208).

A etapa de especificação envolve considerações sobre os propósitos, usuários e público-alvo e o cruzamento destas de maneira lógica e seqüencial. Esta é uma tarefa importante, pois depende dela o desenvolvimento do produto.

“Os aspectos incluídos na especificação do projeto são aqueles que serão incorporados ao produto e oferecidos ao consumidor. Por outro lado, aqueles aspectos omitidos ou desprezados, provavelmente não serão incluídos no produto. Portanto, é muito importante que a especificação do projeto seja bem feita, para que o novo produto possa ser desenvolvido corretamente” (pg. 208).

Uma análise comparativa com as tecnologias concorrentes foi realizada no capítulo anterior como requisito da metodologia utilizada para avaliar a tecnologia. Resta, portanto, realizar a pesquisa preliminar de mercado a identificar a melhor oportunidade do produto. Entretanto, como requisitos e necessidades diferem conforme a situação estudada, num primeiro momento, será necessário caracterizar e delimitar a aplicação e definir o que se espera do seu desempenho. A partir destas considerações, esse desempenho esperado será confrontado com os atributos do produto e desta comparação será possível extrair os pontos fortes e fracos do sistema em estudo. Além disso, a interface com o usuário também será suposta com o intuito de ser analisada em relação à sua adequação.

4.1 Definição e Caracterização da Aplicação em Análise

A primeira etapa da pesquisa preliminar de mercado consiste em escolher uma aplicação da tecnologia entre as três potenciais aplicações detalhadas no capítulo 3. Para a decisão, considerou-se o tempo previsto até a sua entrada no mercado e a sua adequação e a relevância em relação às condições sócio-econômicas brasileiras. Em relação ao tempo de entrada no mercado, quanto maior for o tempo necessário para uma determinada inovação atingir o estágio de comercialização, maior será a dificuldade de se prever as suas características e requisitos, o que resultará num maior grau de incerteza. Em relação às características sócio-econômicas do Brasil, devem ser considerados os benefícios à sociedade que tal tecnologia possa oferecer.

Assim, dentre os mercados potenciais para este dispositivo, aquele cujos atributos estavam mais próximos do nível de desenvolvimento das pilhas a combustível em 2005 era o das aplicações portáteis. Esse mercado, no entanto, é composto por quatro grupos de produtos, cada um deles possui características específicas, sendo diferente dos demais: mini-geradores, carregadores de baterias convencionais, aplicações militares e equipamentos eletrônicos. Sob a análise social, a escolha por um determinado grupo deve decorrer dos potenciais benefícios oferecidos pela integração desta tecnologia face às necessidades de uma sociedade com desigualdades sociais e econômicas. Neste caso, os usuários que mais poderiam ser beneficiados no curto prazo seriam as populações isoladas da rede de fornecimento de energia elétrica.

Dos quatro grupos citados anteriormente que compõe esta categoria, o de mini-geradores é aquele que possivelmente melhor se encaixa no contexto em análise. Desta forma, o caso analisado refere-se ao desenvolvimento de produtos que proporcionem o fornecimento de energia elétrica para comunidades não atendidas pela rede elétrica com a utilização de pilhas a combustível em mini-geradores. No entanto, uma vez que isso seja feito, torna-se razoável analisar também a possibilidade de fornecer energia a partir da geração estacionária com esta tecnologia, o que é feito com o propósito de comparação.

4.2 Metodologia de Avaliação da Utilização de Pilhas a Combustíveis em Comunidades Isoladas

A descrição da metodologia empregada para avaliar a utilização de produtos desenvolvidos a partir da tecnologia de pilhas a combustível na comunidade de Marujá tem por objetivo estabelecer um referencial para futuras avaliações da utilização desta tecnologia em outras comunidades.

A primeira etapa consistiu em selecionar uma comunidade isolada da rede convencional de fornecimento de energia elétrica. Para este trabalho, foi escolhida a comunidade de Marujá, localizada no município de Cananéia, no estado de São Paulo.

Marujá é uma vila praiana turística cuja população permanente em 2004 era de 113 moradores, mas com capacidade para receber até 844 turistas, o que seria suficiente para aumentar o tamanho de sua população em quase 700%. As suas principais atividades econômicas são a pesca, realizada para subsistência, e o ecoturismo, que se beneficia da proximidade tanto de praias de mar aberto quanto de lagunas de água salobra, propiciando que muitos dos moradores ofereçam alojamento e serviços aos turistas, que aparecem nos finais de semana, feriados prolongados e nas férias de verão.

Uma vez selecionada a comunidade, foi necessário identificar os requisitos, as necessidades e fatores de desempenho e de excitação desses potenciais usuários quanto ao fornecimento de energia elétrica, seguindo o modelo de Kano para desenvolvimento de produtos. Visto que a tecnologia em questão constitui um exemplo de inovação baseada no conhecimento científico, foram consideradas algumas observações feitas pelo instituto norte-americano de padrões e tecnologias (NIST), que desenvolveu literatura específica para este tipo de inovação.

Uma vez identificadas as necessidades e exigências dos usuários e conhecendo as características das pilhas (vistas nos capítulos anteriores) procurou-se identificar como a tecnologia em estudo poderia atender essa demanda.

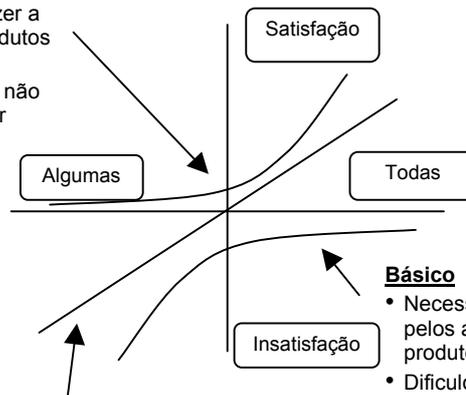
4.3 Identificação de Exigências e Desejos dos Usuários

A segunda questão que se impõe é como analisar as expectativas dos usuários. Baxter (1998) sugere “adotar uma postura mais abrangente” para lidar com esta questão. Neste caso, a percepção do consumidor sobre a qualidade seria mais bem definida pelo modelo de Kano, apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 Modelo de Kano

Excitação

- Necessidade e desejos não declarados e aspectos ainda inexistentes em produtos concorrentes.
- Satisfazem às necessidades reais, não são apenas paliativos.
- Podem ser extrapolados a partir das pesquisas de mercado, para satisfazer a frustrações não resolvidas pelos produtos existentes.
- A ausência dos fatores de excitação não provoca insatisfações do consumidor



Desempenho

- Necessidade e desejos declarados para as características presentes em produtos concorrentes.
- Facilmente acessíveis à pesquisa de mercado.
- A presença aumenta a satisfação do consumidor.
- O baixo nível de atendimento aos fatores de desempenho provoca insatisfação do consumidor.

Básico

- Necessidade e desejos não declarados pelos aspectos típicos ou normais nos produtos concorrentes.
- Dificuldade de descobrir com pesquisa de mercado.
- Podem ser descobertos pela análise dos produtos concorrentes.
- A ausência de qualquer característica básica no produto causará insatisfação do consumidor.

Fonte: BAXTER (1998 p.210)

O modelo de Kano considera quatro aspectos:

- Desejos não declarados: difíceis de serem identificados pelas pesquisas de mercados, eles muitas vezes estão atrelados às necessidades básicas dos consumidores. Muitas vezes o usuário não percebe o valor atribuído a determinada função, pois a considera intrínseca ao produto, entretanto, ele

certamente notará a sua ausência, caso ela não esteja disponível. Em geral, estes desejos podem ser identificados pela análise dos produtos concorrentes;

- Necessidades básicas: são requisitos mínimos exigidos do produto pelo consumidor para adquiri-lo. Estes, no entanto, são valorizados até um certo nível de atendimento, a partir do qual o usuário deixa de atribuir valor a eles;
- Fatores de excitação: são atributos capazes de diferenciar um produto de seu concorrente. Quanto mais fatores de excitação tem um produto, maior é sua atratividade.
- Fatores de desempenho: referem-se ao quão bem as funções básicas e de excitação de um produto são executadas.

A percepção de qualidade dos consumidores em relação a um produto depende de um equilíbrio entre estes quatro fatores que podem ser divididos em dois grupos: as exigências e os desejos. As exigências possuem caráter eliminatório, uma vez que refletem as características que os produtos devem obrigatoriamente possuir e cuja ausência é suficiente para a desconsideração da possibilidade de realização da compra. Assim, devem atender aos desejos não declarados e às necessidades básicas. Já os desejos possuem um caráter classificatório e representam os fatores de excitação e de desempenho. Será com base nos desejos que os usuários decidirão quais são os melhores produtos disponíveis no mercado.

A criação de valor ocorre em dois estágios (BAXTER, 1998). No primeiro, são avaliadas se as exigências são atendidas. Se isto ocorrer, o produto terá um valor básico. Caso contrário, provocará insatisfação dos consumidores. No segundo, ocorre a avaliação dos fatores de excitação e de desempenho e a comparação entre os diversos produtos disponíveis. A partir desta etapa, o usuário consegue identificar quais produtos compensam o valor a ser pago por eles e qual constitui a melhor relação entre custo e benefício.

Além das exigências e dos desejos dos consumidores, o fato de as pilhas a combustível constituírem um tipo específico de inovação, baseada no conhecimento científico, implica a necessidade de se observar os fatores relacionados ao desenvolvimento de inovações e os determinantes de sucesso. O trabalho de identificar variáveis que possam ser avaliadas como indicadores de sucesso de uma determinada

inovação não é trivial. Um esforço mais específico na avaliação deste tipo de inovação pode ser encontrado no programa de tecnologia avançada (*ATP – Advanced Technology Program*) do instituto norte-americano de padrões e tecnologia (*NIST – National Institute of Standards and Technology*) (BRANSCOMB, 2000). Este programa se destina a preencher a lacuna existente entre a criação de um conceito técnico comercialmente promissor e a demonstração de que a tecnologia em questão pode atender às exigências de potenciais aplicações do mercado. Como resultado, torna-se possível comercializar mais rapidamente novas tecnologias e descobertas científicas.

David Lewis, na publicação referida acima, argumenta que o processo de desenvolvimento de produtos possui três estágios que interagem de maneira não-linear: conceito ou invenção técnica, atendimento das exigências do mercado e comercialização robusta. O primeiro estágio descreve o trabalho desenvolvido nas empresas e em laboratórios de universidades. Este estágio acaba com uma demonstração laboratorial do fenômeno que, se comercializado, pode oferecer oportunidades de negócios. O segundo estágio se inicia quando uma empresa dedica-se a esse conceito e começa a transformá-lo em uma aplicação (processo designado pelo termo “*reduce to practice*”), ou seja, ela demonstra o projeto e os processos para atender às exigências dos consumidores. O último estágio engloba a resposta da empresa para uma oportunidade de mercado bem entendida com uma linha de produtos completa a custos e qualidade competitivos.

Há uma distância significativa entre a criação de um conceito técnico com potencial para comercialização e o estabelecimento do projeto e dos processos (BRANSCOMB, 2000). A constante busca pelo perfeito desempenho técnico por parte do cientista deve ser trabalhada em conjunto com as orientações de mercado captadas pelo departamento de marketing. O desafio competitivo deve ser entendido como estímulo para o progresso técnico. Dentro deste contexto, observa-se que as especificações do produto se tornam a ligação entre o desafio técnico e o mercado, ainda que se mostrem mutáveis ao longo do processo. Essas mudanças exigem ajustes nas especificações, o que torna o processo um ciclo re-alimentado.

Outro fator que deve ser observado é o risco incorrido, em especial porque quando se trata de uma inovação baseada no conhecimento científico a dificuldade de quantificar as incertezas associadas com projetos técnicos em estágio inicial é apenas uma das dificuldades conceituais. Além disso, tanto sucesso quanto fracasso são

definidos em termos de objetivos. Daí a necessidade de definir sob que perspectiva será analisada a tecnologia.

De acordo com o Programa Luz para Todos do Ministério das Minas e Energia (MME), havia no Brasil, em 2003, cerca de 12 milhões de pessoas em comunidades que não possuem acesso à energia elétrica (MME, 2005). Segundo o Censo Demográfico realizado em 2000 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a maior parte desta população residia em cerca de 2 milhões de domicílios situados em áreas rurais, geralmente dispersos em localidades isoladas e de difícil acesso. Valente e Almeida, citados em (MEINECKE e BRASIL, 2004), entendem que a comunidade isolada é aquela para a qual a extensão da rede elétrica é tecnicamente inviável ou excessivamente onerosa, tanto para a empresa prestadora de serviço quanto para o consumidor.

Grandes distâncias, preocupações ambientais, custos altos de implantação e manutenção e limitações físicas são alguns dos problemas encontrados pelas concessionárias prestadoras deste serviço. Repassar os custos reais implicaria tarifas altíssimas para o consumidor, o que explicaria a falta de investimentos para a expansão da rede em direção a essas comunidades e exige que o governo conceda subsídios rateados nacionalmente. Como solução, Muylaert *et al.* (2004) apontam a descentralização da produção energia, especialmente em relação a comunidades rurais e isoladas onde fontes locais renováveis de energia poderiam ser aproveitadas, oferecendo a flexibilização de suprimento energético em pequena escala, propício para servir à demanda por energia em pequena escala.

“No contexto das áreas rurais e isoladas, as energias renováveis devem ser aproveitadas como soluções locais descentralizadas que podem reduzir o custo da universalização para o conjunto de consumidores, fazendo com que a expansão do atendimento não seja interrompida por falta de financiamento. Positivamente, torna-se inevitável a vinculação do uso das energias renováveis ao arcabouço regulatório do setor elétrico brasileiro para a universalização da eletrificação rural, prioritariamente dentre estas, as tecnologias nacionais. (...) A disponibilidade de energia acarreta aumento substancial de padrões de qualidade de vida se complementada pela aquisição de comodidades tais como água tratada, cuidados médicos, eletricidade com qualidade alta, entre outras” (pg. 2359).

Entretanto, apesar de todo o potencial brasileiro para utilização de recursos renováveis com base em novas tecnologias, os esforços governamentais têm se concentrado na extensão da rede elétrica convencional. A utilização de pilhas a combustível pode representar um ponto de inflexão neste processo e acelerar a disseminação do fornecimento de energia elétrica a estas comunidades.

Os produtos desenvolvidos para estas populações devem considerar suas exigências (desejos não declarados e necessidades básicas) e os seus desejos declarados (fatores de excitação e de desempenho). Quanto às exigências, deve-se ter em mente que estes usuários, acima de tudo, precisam ter energia elétrica disponível em suas residências, no mínimo suficiente para atender suas necessidades básicas, a um custo que eles possam pagar. Isto significa uma baixa demanda energética, mas com fornecimento confiável, que no mínimo seja capaz de atender suas necessidades básicas com pouca manutenção e sem falhas, pois a quebra de um equipamento pode significar a interrupção do fornecimento por semanas. Por isso, os produtos desenvolvidos para este fim devem ser capazes de superar os obstáculos comuns à rede convencional de energia elétrica, que são: a baixa renda destes consumidores, as grandes distâncias, a baixa densidade de carga e as dificuldades de acesso.

A identificação dos desejos destes usuários, no entanto, requer cuidados a fim de evitar falsas conclusões. Meinecke e Brasil (2004) ressaltam que as diferenças existentes entre duas comunidades isoladas distintas podem implicar exigências e desejos diferentes quanto ao fornecimento de energia elétrica.

“Portanto, consideradas as diferenças entre os ecossistemas e entre os recursos naturais que estes oferecem (tipo de solo, cobertura vegetal, pluviosidade, rede hidrográfica), bem como as diferenças no estágio de desenvolvimento social e econômico em que se encontram as comunidades que deles vivem, é lícito supor que as condições em que a energia elétrica deva ser fornecida a cada comunidade também difiram” (pg. 2304).

Macedo *et al.* (2004) possuem opinião semelhante.

“A necessidade de energia elétrica em áreas não atendidas depende fundamentalmente das características do contexto em que ela está inserida tais como: suas atividades econômicas e sócio-culturais, recursos energéticos disponíveis no local, padrões de demanda, tamanho da carga, grau de dispersão da comunidade e condições ambientais” (pg. 2457).

Visto que diferentes comunidades possuem diferentes necessidades, torna-se necessário selecionar uma, caracterizá-la e identificar suas exigências e desejos. Para este caso, será analisada a comunidade de Marujá, vez que esta possui um levantamento detalhado de suas demandas energéticas (MACEDO et al., 2004).

Marujá é uma vila praiana turística cuja demanda por energia elétrica oscila bastante, principalmente em função do aumento de habitantes proporcionado pelos meses de férias. A demanda energética era suprida até 2004 por 15 geradores, sendo 13 deles a diesel e dois à gasolina, e 31 sistemas complementares compostos por painéis fotovoltaicos, que são utilizados quando os geradores não estão em funcionamento.

Os fatores de excitação desejados pelos usuários estão relacionados à disponibilidade de carga suficiente para atender suas aspirações de consumo, isto é, se as exigências dizem respeito às necessidades básicas de energia elétrica e às características de fornecimento, muitas vezes não declaradas, os desejos dos usuários se referem a sobras de energia que lhes permitissem melhorar sua qualidade de vida. Para identificar a quantidade de carga desejada foi considerado o levantamento das aspirações de consumo realizado em 37 das 41 famílias da comunidade (MACEDO et al., 2004). Os resultados, apresentados na Tabela 4.1, mostram que os principais itens de desejo são: geladeira, ventilador, chuveiro elétrico, televisor, freezer e som.

À exceção do chuveiro elétrico, que consome entre 1.000 W e 1.500 W, todos os outros cinco aparelhos mais desejados requerem potência numa faixa entre 40 W e 200 W. Essas aspirações de consumo indicam que uma disponibilidade extra de energia elétrica capaz de prover um mínimo de entretenimento ou melhorar as condições de vida desta população é um fator de excitação. Os produtos e sistemas desenvolvidos devem se preocupar não somente em suprir as necessidades mínimas, mas em disponibilizar esta demanda extra de energia. Outros fatores de excitação seriam a facilidade de utilização, que permitisse ligar e desligar facilmente os aparelhos, a manutenção simples, que permitiria que as próprias comunidades realizassem-na, e a flexibilidade no uso de combustíveis, tornando possível o aproveitamento de recursos locais disponíveis como, por exemplo, rejeitos agrícolas.

Tabela 4.1. Aspirações de Consumo da Comunidade de Marujá

Equipamento	Penetração ¹⁰ (%)	Potência por Equipamento (W)
Geladeira	89	200
Ventilador pequeno	40,5	65
Chuveiro elétrico	36	3.500
Televisor portátil	30	40
Freezer	13,5	200
Aparelho de som pequeno	11	20
Ferro de passar	8	1.000
Liquidificador	8	300
Computador ¹¹	5	160
Microondas	5	1.200
DVD	3	20
Máquina de lavar	3	500
Estufa	3	200
Batedeira	3	120

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de Light (2005) e Macedo *et al.* (2004)

¹⁰ Considera o percentual do total de famílias da comunidade que deseja determinado bem.

¹¹ Está considerado o consumo de um microcomputador e de um monitor colorido.

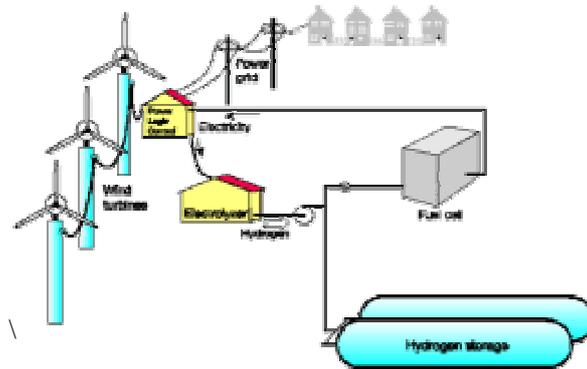
4.4 Avaliação de Desempenho das Pilhas a Combustível em Função das Necessidades e Desejos dos Usuários

As pilhas a combustível surgem como opção de fornecimento de energia elétrica para esta comunidade sob dois formatos: através da geração estacionária e a partir de mini-geradores. Em ambos, elas apresentam características que seriam capazes de transpor os obstáculos relativos às dificuldades constituídas pelo isolamento geográfico e ainda oferecem como fatores de desempenho alta eficiência, grande confiabilidade e baixos níveis de emissões e ruídos.

Projetos de geração estacionária para comunidades isoladas que consideram a utilização deste mecanismo já estão em desenvolvimentos. Dentre eles, há certa ênfase naqueles que consideram sistemas regenerativos, isto é, projetos onde a pilha funciona em circuito fechado em conjunto com um fonte de energia intermitente, geralmente solar ou eólica. A vantagem destes sistemas é que a armazenagem de energia sob a forma de hidrogênio é capaz de compensar a queda de força quando as condições ambientais das fontes intermitentes são inadequadas como, por exemplo, quando há pouco vento ou durante a noite. Essa integração entre fonte intermitente e adequada armazenagem de energia pode prover um suprimento constante de eletricidade à comunidade e se tornar competitiva frente às fontes fósseis de energia (diesel, gasolina e carvão) (CHULAKI, 2005).

A Figura 4.2 apresenta o desenho esquemático de um sistema regenerativo que utiliza energia eólica para geração de energia. Se a quantidade de energia produzida é maior que a demanda, o controle computadorizado do sistema automaticamente identifica esta sobra e liga o eletrolizador, que utilizará este excedente para produzir hidrogênio (comprimido e armazenado) e oxigênio (liberado para a atmosfera). Quando a demanda for maior que a produção, então o sistema desligará o eletrolizador e acionará o módulo da pilha (*stack*) que fornecerá a energia que falta para suprir a demanda. Durante o início deste processo, uma pequena bateria regulará a tensão e fornecerá a energia nos momentos de pico de potência até que a pilha a combustível esteja em pleno funcionamento (CHULAKI, 2005).

Figura 4.2 Desenho Esquemático de Sistema Regenerativo



Fonte: Rambach e Haberman (1997)

As características de uma pilha usada em uma aplicação estacionária na comunidade de Marujá podem ser imaginadas a partir da comparação com outra utilizada em projeto semelhante, financiado pelo Ministério de Minas e Energia e pelo Fundo Setorial CT-Energ e implantado na comunidade de Arixí, com cerca de 600 habitantes, localizada no município de Anamá, no estado do Amazonas, através de uma parceria entre o Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (Nipe), o Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais (Nepam), o Laboratório de Hidrogênio do Instituto de Física (LH2), todos pertencentes à Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), com o Departamento de Eletricidade da Universidade Federal do Amazonas (PORTAL CÉLULA A COMBUSTÍVEL, 2005).

O projeto prevê o fornecimento de 5 kW de potência e a utilização de reforma de gás natural para o fornecimento de hidrogênio, aproveitando a proximidade do gasoduto que leva o gás até Manaus. O sistema é composto por um reformador de gás natural, um purificador de hidrogênio e uma célula a combustível de potência igual a que se deseja fornecer, que deverá ter 1,5 metro de altura, um metro de largura e 1,5 de comprimento, e visa a minimizar a manutenção, sendo de pouco desgaste e não possuindo partes móveis. O reformador é uma espécie de reator onde entra gás natural e sai hidrogênio. O hidrogênio atua no módulo da célula combustível junto com o ar e produz energia elétrica e água (PORTAL CÉLULA A COMBUSTÍVEL, 2005). Um sistema para Marujá provavelmente teria capacidade e dimensões semelhantes, mas exigiria adaptações, em especial no que se refere ao combustível utilizado. Para esta comunidade, o mais indicado seria um gaseificador de biomassa ou um biodigestor que

permitisse utilizar os rejeitos orgânicos. O emprego de biomassa para a geração de biogás pressupõe a existência de material orgânico disponível em quantidade apropriada. Não é objetivo deste trabalho detalhar as especificações do biodigestor ou do volume de biomassa necessária. Entretanto, deve ser a consideração de que caso não haja a disponibilidade de material suficiente, o emprego do biodigestor pode ocasionar problemas de degradação ambiental. Neste caso, outras alternativas devem ser consideradas como, por exemplo, a utilização de aguardente como combustível em um sistema que utilize pilha de óxido sólido.

A utilização desta tecnologia para geração estacionária de energia deve privilegiar o uso de equipamentos coletivos, como televisão e rádio, a fim de promover a organização da comunidade e evitar muitos pontos de energia no local. Alguns autores, como Meinecke e Brasil (2004), defendem que devem ser priorizados equipamentos geradores de renda, como máquinas de costura e de farinha, ao invés de utilizar a energia para atividades domésticas de lazer – posto que estas últimas constituem mais uma fonte de despesa e não geram compensações financeiras.

Entretanto, apesar da carência de energia vivenciada por essa comunidade e dos altos custos da extensão da rede, condições que criariam uma potencial entrada de mercado para estas aplicações, as aplicações estacionárias ainda são prejudicadas pelos seus altos custos de manutenção e operação, sendo justificáveis apenas com incentivos e subsídios do governo. Fato que não ocorre com as aplicações portáteis em mini-geradores. Para estas, as necessidades, os desejos e os fatores de excitação e desempenho, já discutidos para as aplicações estacionárias, são válidos, mas as características e o estágio de desenvolvimento são diferentes e, em 2005, eram mais promissores no curto prazo.

Os mini-geradores permitem que sejam fornecidas baixas cargas de potência, na faixa entre 50 W e 500 W, mais adequadas individualmente, pois cada família pode ter um produto de acordo com o seu consumo, independente das demais. Isto reduz o custo para aquelas que consomem menos, assim como o desperdício, e torna a comunidade menos vulnerável a interrupções no fornecimento. Além disso, são mais simples de usar e podem acompanhar os usuários em atividades no exterior de suas residências além de se encontrarem em um estágio mais próximo da comercialização.

Em relação às características dos produtos disponíveis, observa-se a disponibilidade no mercado de modelos de dimensões compactas e capazes de atender as aspirações de consumo da comunidade de Marujá apresentadas anteriormente na

Tabela 4.1. Admitindo como exemplo o sistema de 150 W da empresa IdaTech, pode-se ter uma idéia das dimensões e utilidades deste produto. Segundo a empresa (2004), o sistema completo, incluindo reformador e purificador de hidrogênio possui as dimensões de uma lancheira grande, isto é, aproximadamente 30 x 20 x 15 cm e peso de 6 quilos, o que de fato indica um produto facilmente transportável.

A potência fornecida por ele é capaz de alimentar alguns dos eletrodomésticos desejados pela comunidade e até mesmo um televisor portátil e um ventilador conjuntamente, mas pequenos acréscimos o tornariam mais atraente, pois permitiriam utilizar aparelhos maiores e fazer outras combinações sem que isso resultasse em grandes aumentos nas dimensões. Um aumento de 10 W, por exemplo, seria suficiente para alimentar um microcomputador com monitor colorido, enquanto que uma potência 50 W maior já seria suficiente para alimentar uma geladeira.

Para potências iguais ou menores que 100 W, necessárias para carregar a bateria de uma câmera digital ou de um telefone celular, existem produtos ainda menores. Um deles é o módulo de 50 W da Ball Aerospace & Technologies Corp., ilustrado na Figura 4.3, que mede aproximadamente 11 x 19,25 x 20 cm e pesa cerca de 3 quilos (BALL CORP., 2004). Este sistema seria suficiente para acender uma lâmpada incandescente de 40 W e teria utilidade em situações de isolamento total, como em acampamentos ou em trabalhos noturnos fora da comunidade.

Figura 4.3 Sistema de Potência de 50 W da Ball Aerospace & Tech. Corp.



Fonte: Ball Corp (2005)

Apesar de todas as vantagens oferecidas pelos mini-geradores, as opções disponíveis no mercado em 2005 ainda possuíam limitações em relação ao combustível consumido. O produto da IdaTech requer uma mistura de metanol e água, que apesar de constituir uma fonte mais duradoura de hidrogênio, é de difícil obtenção para a comunidade de Marujá. A Ball, por sua vez, sugere a utilização de um cilindro de hidrogênio puro, pressurizado e comercializado pela empresa para alimentação de seus sistemas, o que é de igual dificuldade de obtenção. Desta maneira, a utilização de recursos locais exigiria infra-estrutura necessária para a produção de hidrogênio a partir destes e constitui um ponto a ser explorado durante o desenvolvimento de produtos para este fim. A Tabela 4.2 resume as exigências e desejos da comunidade e os confronta com as características das pilhas a combustível.

Tabela 4.2 Resumo das Exigências e Desejos da Comunidade de Marujá e Características das Pilhas a Combustível

Mini-geradores	Desempenho das Pilhas
Necessidades	
Baixa demanda energética	Bom
Fornecimento confiável	Bom
Baixo custo	Necessita escala de produção e comercialização
Pouca necessidade de manutenção	Bom
Geração distribuída	Bom
Desejos	
Disponibilidade de energia extra (potência entre 40 e 200 W)	Bom
Facilidade de uso	Necessita desenvolvimento
Diversidade de combustíveis (possibilidade de usar recursos locais)	Necessita desenvolvimento
Alta eficiência	Bom

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da análise das necessidades e dos desejos dos usuários em comparação com o rendimento das pilhas a combustível é possível entender como deve ocorrer a entrada desta tecnologia no mercado representado pelo caso estudado, ou seja,

fornecimento de energia elétrica para aplicações portáteis em comunidades isoladas da rede.

No caso de mini-geradores, estes se encaixariam bem para fornecer a quantidade de energia elétrica extra, capaz de proporcionar alguma melhoria na qualidade de vida dos habitantes dessas comunidades. Assim, através destes, poderia ser fornecida a energia necessária para ligar alguns eletrodomésticos relacionados ao lazer, como televisores e aparelhos de som, ou pequenas máquinas de trabalho, como máquinas de costura, capazes de gerar renda para os usuários. Além dessas utilizações, os mini-geradores também poderiam ser empregados para iluminação elétrica em situações de interrupção de funcionamento dos geradores à diesel ou à gasolina. Entretanto, apesar de todas as suas potenciais utilizações, estes produtos ainda precisam melhorar três atributos: preço, facilidade de uso e aceitação de recursos locais como combustível. Os modelos existentes no mercado em 2004 ainda possuíam alto custo para aquisição e tinham restrições quanto ao combustível consumido, fato que aumenta a sua complexidade de uso.

Essas condições apesar de dificultarem a ampla adoção das pilhas a combustível, não inviabilizam-na. Contudo, exigem que sejam elaborados programas de incentivo e treinamento técnico das comunidades para que estas tenham contato com a tecnologia.

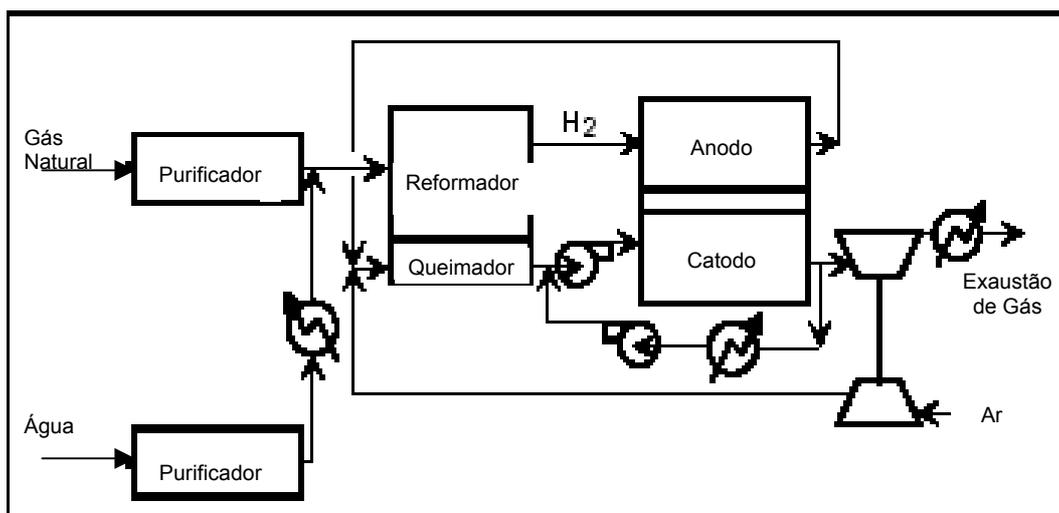
5. Considerações sobre o desenvolvimento do estágio laboratorial da tecnologia até a obtenção de um protótipo

Este capítulo tem por finalidade sugerir um encaminhamento para desenvolvimento de uma aplicação para a pilha a combustível que atendesse a uma demanda real, ainda que esta ocorresse por meio de um protótipo. Em resumo, o que se pretende apresentar é a composição necessária para aplicar a tecnologia à uma situação que possa ser comercialmente vantajosa no futuro.

Já foi visto que a aplicação deste dispositivo para geração distribuída de energia elétrica pode constituir uma boa oportunidade, especialmente quando se trata de fornecer energia elétrica a comunidades isoladas da rede. Considerando a situação de fornecimento de energia elétrica para a comunidade de Marujá, pretende-se esboçar o que seria um sistema de fornecimento baseado na tecnologia de pilhas a combustível.

O *Fuel Cell Handbook* (DOE, 2000) descreve dois sistemas de geração de energia elétrica a partir da utilização de pilhas a combustível. No primeiro, apresentado na Figura 5.1, há a reforma externa do combustível, isto significa que o combustível é processado antes de entrar em contato com o módulo de pilhas. Este é o caso, por exemplo, das pilhas de membrana polimérica que são alimentadas por meio de hidrogênio puro.

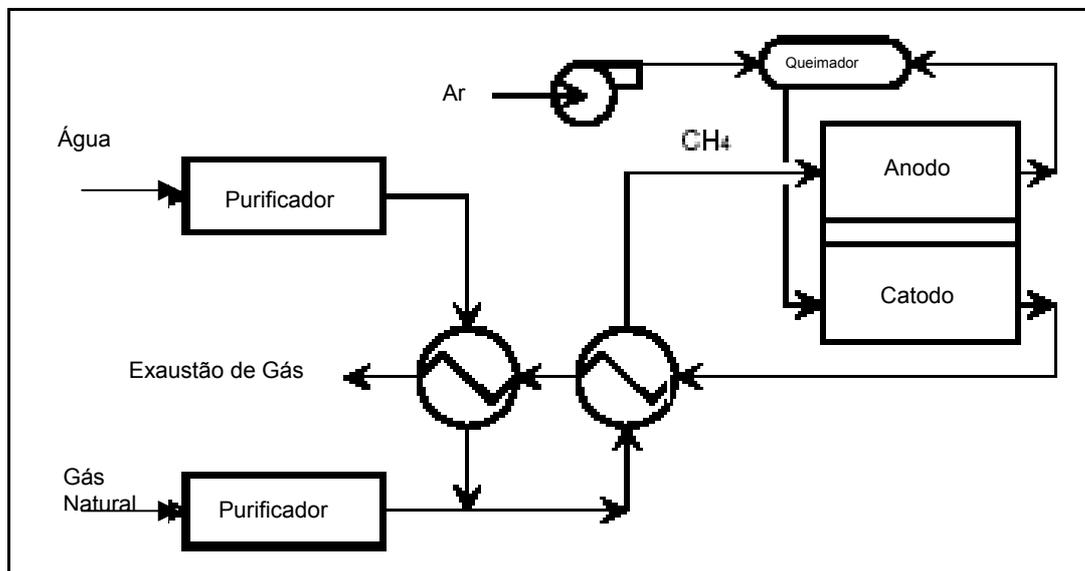
Figura 5.1 Sistema de Pilha com Reforma Externa do Combustível



Fonte: *Fuel Cell Handbook*, 2000

No segundo caso, a reforma ocorre internamente, permitindo a utilização direta de combustível. É o caso, por exemplo, das pilhas a combustível de óxido sólido. A composição de um sistema deste tipo é apresentada na Figura 5.2. A reforma interna pode ser benéfica ao sistema porque permite uma efetiva transferência de calor da reação exotérmica ocorrida na pilha para a reação endotérmica de reforma do combustível. Essa dinâmica permite que uma maior quantidade de energia gerada seja aproveitada, o que aumenta a eficiência do sistema. Além disso, os custos com reformador são eliminados. Apesar de todas estas vantagens, a complexidade da pilha e a necessidade de manutenção desta configuração aumentam (DOE, 2000).

Figura 5.2 Sistema de Pilha com Reforma Interna do Combustível



Fonte: *Fuel Cell Handbook*, 2000

O fornecimento de energia elétrica para a comunidade de Marujá pressupõe uma necessidade média de 400 W por residência, suficiente para alguns pontos de iluminação e para alguns eletrodomésticos, o que seria suficiente para melhorar a qualidade de vida daquela comunidade, conforme anteriormente descrito no capítulo 4. A julgar apenas por estas características, esta aplicação admitiria a possibilidade de utilização de qualquer uma das duas configurações, sendo a primeira, utilizando uma pilha de membrana polimérica, e a segunda, a partir da utilização de uma pilha de óxido sólido.

Entretanto, na primeira alternativa, além do módulo de pilhas unitárias, e dos sistemas de controle de alimentação e de eletrônica de potência, seriam necessários um

reformador de combustível e um purificador de hidrogênio, em virtude de a PEMFC operar apenas com hidrogênio puro. Estas características invalidariam a premissa de utilizar recursos locais, principalmente o aguardente produzido artesanalmente na comunidade.

Desta forma, a segunda alternativa, ou seja, a utilização de uma SOFC, aparece como configuração mais promissora para este caso. Pois, com a utilização deste tipo de pilha, o combustível poderia ser fornecido diretamente, eliminando a necessidade do reformador e do purificador, conforme apresentado anteriormente.

De maneira geral, o sistema pode ser decomposto em quatro subsistemas: o de processamento de combustível, o do módulo de pilhas, o de controle de potência e o de co-geração, ou re-aproveitamento de calor. O subsistema de processamento de combustível tem como objetivo preparar o combustível para ser utilizado no anodo. Em geral, isto significaria remover os compostos que possam ser prejudiciais, transformá-lo em um gás rico em hidrogênio e reformá-lo conforme as necessidades de operação da pilha empregada. Como a reforma será feita internamente, o processador de combustível apenas removerá os compostos nocivos, sendo necessário apenas o purificador de combustível.

Por sua vez, o módulo de pilhas é a associação de várias pilhas unitárias que gerará energia elétrica sob a forma de corrente contínua. Além destas, fazem parte deste subsistema o selante, o coletor de corrente, e a estrutura para distribuir o gases reagentes através da superfície dos eletrodos. O selante funciona como uma placa separadora capaz de impedir que o combustível e o gás oxidante se misturem, mas permitindo que pilhas adjacentes se conectem eletricamente.

O terceiro subsistema, o de controle de potência, visa a transformar a energia gerada em energia estável e própria para o consumo. Desta forma, são necessários um conversor de corrente, capaz de transformar a corrente contínua gerada para corrente alternada e um controle de potência e voltagem, para monitorar a intensidade da corrente gerada.

Por fim, o módulo de co-geração ou re-aproveitamento de calor que pode ser utilizado para recuperar parte do calor gerado na operação das pilhas. Este calor pode ser usado no aquecimento de água, na produção de vapor ou na geração de mais energia, o que aumentaria a eficiência do sistema.

Salvo em situações especiais, os equipamentos citados dispensam adaptações especiais para uma utilização conjunta com pilhas a combustível. Isto significa que, por

exemplo, não é necessário um purificador de combustível específico para esta aplicação. Os purificadores convencionais são apropriados para esta aplicação.

Em relação aos obstáculos encontrados para a construção de um protótipo, são relevantes as barreiras encontradas para o desenvolvimento de materiais e para a produção de componentes das pilhas. Para os materiais, a principal barreira consiste na identificação e desenvolvimento de materiais compatíveis, especialmente para o selante e para os catalisadores. Além da compatibilidade há o problemas com o alto custo e a dificuldade de obtenção dos compostos e elementos químicos. Por fim, quanto à produção, a complexidade das estruturas dos componentes é outra dificuldade que aumenta o custo das pilhas. A inexistência de processos de produção eficientes também contribui para agravar o problema.

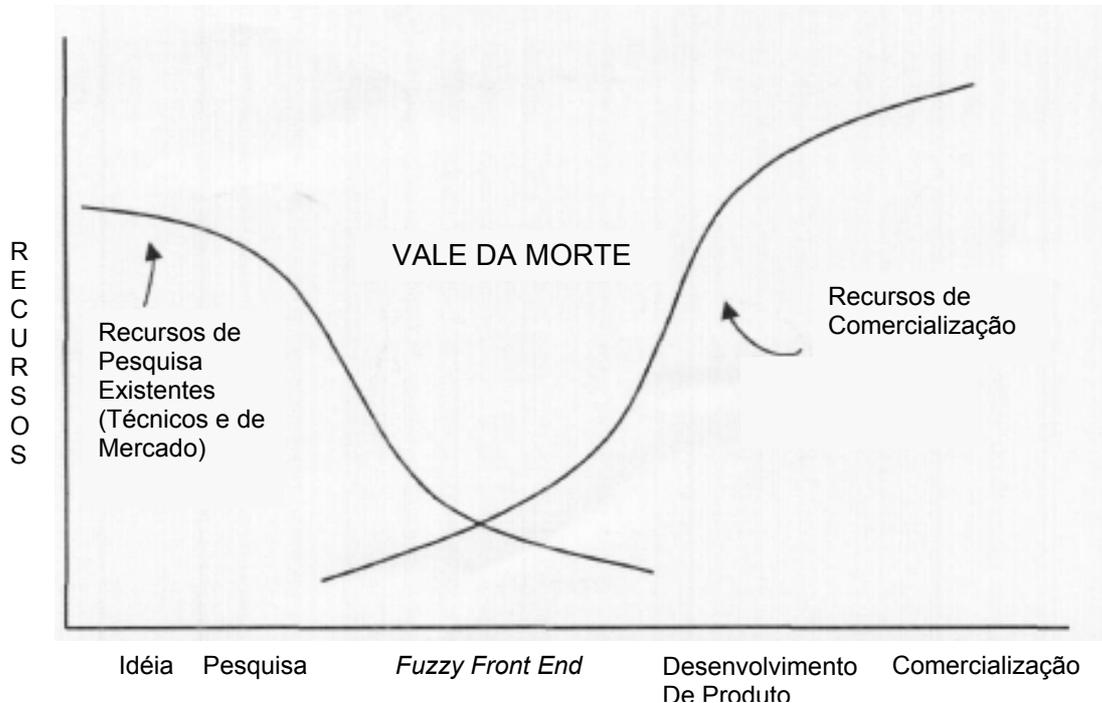
Os problemas descritos acima tornam-se dificuldades para o desenvolvimento dos principais módulos constituintes da pilha. Desta forma, desenvolver um selante ou um catalisador mais eficiente é prerrogativa do fabricante do módulo de pilhas (*stack*) e não do projetista do sistema que integrará este módulo aos demais. Por outro lado, encontrar configurações que tornem mais simples e acessíveis sistemas que englobem a utilização de pilhas deve ser preocupação do responsável pela montagem do sistema. Uma cooperação entre estes dois participantes do sistema é interessante, ainda que difícil na maioria dos casos.

No entanto, esta tarefa se mostra prejudicada pelos obstáculos técnicos mencionados anteriormente, necessitando que estes sejam solucionados. Esse descompasso entre a invenção técnica ou o seu reconhecimento comercial e os esforços para comercializá-la, denominado “Vale da Morte” (MARKHAM, 2002), constitui um espaço temporal dentro da evolução do projeto onde os recursos técnicos não satisfazem os interesses dos recursos de comercialização e vice-versa. Este ponto ocorre, em geral, entre a fase de pesquisa e de desenvolvimento de produto, conforme pode ser visto na Gráfico 5.1.

Ainda segundo o mesmo autor, há várias explicações para isto. As diferenças culturais entre equipes técnicas e comerciais é uma delas. O fato de uma não entender ou compartilhar as preocupações e necessidades da outra reflete as diferenças dos valores cultuados por ambas. Enquanto as equipes técnicas valorizam a descoberta científica e a ampliação das fronteiras da tecnologia, as equipes comerciais dão preferências a estabelecer uma rede de relacionamentos e a aprimorar o gerenciamento de contratos. Além disso, é comum que haja diferentes estruturas de remuneração para

estas equipes. Com tantas diferenças, o desenvolvimento de produtos baseados em novas tecnologias pode acabar envolvido em uma disputa de interesses.

Gráfico 5.1 Utilização de Recursos Técnicos e Comerciais em Função do Estágio de Desenvolvimento do Projeto



Fonte: Markham (2002)

Por isso, Markham (2002) ressalta o papel e as atribuições do líder “campeão”. O “campeão” é um líder informal que emergirá subitamente, sem que haja uma nomeação formal. Isto ocorre quando alguém, determinado a promover certo projeto, convencido do seu potencial, decide assumir responsabilidades além das atribuídas à sua função. Convém ressaltar que, no momento em que ele aparece, ele ainda não pode ser chamado de campeão, mas a sua capacidade de influenciar outras pessoas a apoiar seu projeto e sua determinação são pré-requisitos em um projeto de desenvolvimento de produto baseado em tecnologia emergente.

Em reunião realizada¹² com o chefe do Laboratório de Hidrogênio da COPPE, Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda, estas questões foram debatidas com o intuito de se especular sobre um possível prognóstico sobre o desenvolvimento da tecnologia. Considerando as necessidades da comunidade de Marujá, um sistema capaz de fornecer

¹² Realizada no dia 15/04/05.

400 W seria suficiente para alimentar uma geladeira em regime contínuo (200 W) e gerar energia para pequenos eletrodomésticos ou para iluminar uma residência. Para casos como este, seriam exigidas cerca de 160 pilhas com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm.

Entretanto, o desenvolvimento das mesmas indica que num prazo entre 3 e 10 anos é possível que já estejam disponíveis pilhas de maiores, de até 20 cm x 20 cm, que permitiriam um fornecimento de 480 W com apenas 3 unidades, ou seja, um acréscimo de 20%, com uma substancial redução do número de pilhas unitárias.

Em resumo, a execução de um protótipo a partir do conhecimento existente hoje deve considerar a integração de outros três sistemas com o módulo das pilhas combustível. Desta forma, a elaboração de um sistema de fornecimento de energia elétrica a comunidades isoladas necessitará de um purificador de combustível, de um reformador de combustível (caso seja escolhida a reforma externa), de um conversor de corrente, de um de controle de potência e voltagem e de um sistema de reaproveitamento de calor (se a pilha utilizada operar a altas temperaturas). O selante e o coletor de corrente, mencionados, também constituem componentes essenciais, mas, em geral, estão sempre presentes no módulo de pilhas. Além dos componentes, o projeto também deverá considerar as dificuldades referentes a desenvolvimento de materiais e produções para a sua execução.

Conclusão

Este trabalho procurou ampliar a compreensão de como uma tecnologia com forte base científica, no caso as pilhas a combustível, pode evoluir do estágio laboratorial para uma aplicação prática e corrente, encontrando mercados receptivos a produtos desenvolvidos a partir dos seus fundamentos. Pela literatura disponível sobre o assunto, entende-se que a transição de um conceito científico do laboratório para o mercado, através do desenvolvimento de produtos, exige a identificação de oportunidades a serem exploradas e que os produtos originados devem ser orientados de forma a atender os desejos e as necessidades do mercado para o qual ele está voltado.

Entre as principais dificuldades que envolvem a análise de uma nova tecnologia está o inicial desequilíbrio entre os benefícios potenciais oferecidos por ela e a suas limitações técnicas que existem durante a fase laboratorial. Desta forma, o seu sucesso comercial depende da superação de barreiras tecnológicas, comerciais e de produção que permita a disseminação deste dispositivo a custos aceitáveis e sob padrões de qualidade que atendam as exigências dos consumidores.

Quanto mais recente uma tecnologia, maiores são as dificuldades de analisá-la. O pequeno volume de informações disponíveis e a necessidade de convergência de conhecimentos de diferentes áreas da ciência criam um ambiente incerto para o desenvolvimento. Identificar oportunidades para o desenvolvimento de produtos corresponde a entender as vantagens que a inovação oferece e imaginar que segmentos poderiam se beneficiar destas.

As pilhas a combustível constituem exemplo de inovação originada a partir do conhecimento científico. Elas são dispositivos capazes de gerar energia elétrica a partir da energia química de certos combustíveis, sendo o principal deles o hidrogênio. Assim, a fim de identificar as potenciais aplicações e os mercados mais receptivos a este dispositivo, foi inicialmente necessário entender as condições do ambiente no qual se desenvolve a tecnologia, os seus princípios de funcionamento e suas características. As suas principais aplicações estão nas indústrias de energia, automotiva e de equipamentos eletroeletrônicos portáteis onde suas características de operação, entre elas a alta eficiência, os baixos níveis de emissão e de ruído e a possibilidade de estimular a geração distribuída, constituem fonte de vantagem para os produtos concebidos baseados neste dispositivo. Com isso, espera-se que a sua disseminação

deva causar efeitos geopolíticos, econômicos e sociais capazes de estabelecer uma nova ordem mundial.

A partir dessa compreensão, tratou-se de avaliar o seu desempenho frente ao de outras tecnologias, já consolidadas ou igualmente novas, em cada campo de aplicação. Para isso, foi preciso eleger uma metodologia de avaliação tecnológica capaz de evidenciar os pontos fortes e fracos para cada mercado. A metodologia escolhida foi a da IPHE por ser específica para o caso em questão.

Da avaliação da tecnologia resultou a identificação de oportunidades no curto prazo, em relação a 2005, no segmento de eletroeletrônicos portáteis. Este segmento reúne boas condições para a sua entrada, tais como a superioridade das pilhas em quase todos os quesitos - com exceção da questão relativa à segurança - em relação aos seus principais concorrentes nesta aplicação (as baterias de níquel-cádmio e de lítio). Além da superioridade das pilhas, o segmento é composto por consumidores de todas as faixas de renda, existindo inclusive os entusiastas por tecnologia que aceitariam pagar um valor extra para obter um produto de desempenho superior e alto grau tecnológico. As aplicações nas indústrias de geração de energia e automotiva dependem da melhoria de alguns fatores de desempenho, em especial, os custos de operação e manutenção.

Por fim, dar uma orientação de mercado para os produtos desenvolvidos significava identificar as necessidades, desejos e fatores de excitação e de desempenho para uma população usuária potencial. O desenvolvimento de produtos, por sua vez, deve ser orientado para o mercado para o qual eles se destinam. Além disso, devem ser consideradas as características dos usuários, bem como as condições do ambiente no qual estes se encontram. Considerando as aplicações portáteis, por serem as mais próximas do mercado, um grupo se destaca em virtude dos potenciais benefícios sociais que podem gerar no país: o de mini-geradores. Neste caso, os produtos devem atender a uma baixa demanda energética, mas com fornecimento confiável e ser capazes de superar os obstáculos comuns à rede convencional de energia elétrica, que são: a baixa renda destes consumidores, as grandes distâncias, a baixa densidade de carga e as dificuldades de acesso.

Os mini-geradores desenvolvidos a partir de pilhas a combustível possuem atributos capazes de atender a quase todos os requisitos e desejos dos usuários. Eles são fáceis de operar e de manter, possuem uma alta eficiência, podem ser produzidos para pequenas potências e são portáteis. Contrários a sua disseminação está o fato de ainda

não serem flexíveis o suficiente para permitir a utilização de recursos locais disponíveis.

Entretanto, os prognósticos de desenvolvimento são otimistas. O potencial econômico indica que a disseminação desta tecnologia pode levar o mundo a viver um novo ciclo de crescimento sendo que este, pela primeira vez seria ecologicamente sustentável. Para que isto ocorra, será necessário resolver os problemas relacionados à compatibilidade e ao alto custo dos materiais e desenvolver processos de produção mais eficientes.

Concluindo, em se tratando de desenvolvimentos para o curto prazo a partir de 2005, as aplicações portáteis, com baixa potência, devem ser privilegiadas pois aparentam ser as que abrirão o mercado para as demais, permitindo que se alcance uma produção em grande escala de peças e componentes, o que permitiria a redução de custos e, possivelmente, facilitaria a evolução das demais aplicações. Considerando este mercado, observa-se que o desenvolvimento de produtos deve se concentrar inicialmente em sistemas de baixa potência e dimensões reduzidas, seja para celulares ou em mini-geradores.

Bibliografia

- ANUVU INCORPORATED. Disponível em www.anuvu.com. Visitado em 18/10/04.
- AVADIKYAN, A. et al. *The Economic Dynamics of Fuel Cell technologies*. Ed. Springer, Berlin, Alemanha, 2003.
- BALL AEROSPACE & TECHNOLOGIES CORP. *Portable Power System – 50 Watts*. Disponível em www.ballaerospace.com
- BAKER, A., JOLLIE, D. *Fuel Cell Market Survey: Large Stationery Applications*. Fuel Cell Today, 2004. Disponível em www.fuelcelltoday.com. Visitado em 11/02/05.
- BAXTER, M. R. *Projeto de Produto*. 1ª ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1998
- BLOMEM, L. J. M. J. *Fuel Cell Systems*. Nova Iorque, Ed. Plenum Press, 1993.
- BRANSCOMB, L. M. *Managing Technical Risk: Understanding Private Sector Decision Making on Early Stage, Tecnology-based Projects*. NIST, 2000.
- BUCHMANN, I. *The Fuel Cell: is it Ready?*, 2001. Disponível em www.buchmann.ca. Visitado em 27/04/04.
- BURNS, L. D., McCORMICK, J. B., BORRONI-BIRD, C. E., “Vehicle of Change”. *Scientific American*, Volume 287, Nº 4. (Outubro de 2002). Pp. 64-73. Ed. Scientific American, EUA, 2002.
- CHULAKI, A. *Renewable Hydrogen Power System for Isolated Communities*. National Hydrogen Association. Disponível em www.hydrogenus.com. Consultado em 25/01/2005.
- CROPPER, M. *Fuel Cell Market Survey: Buses*, 2003a. Disponível em www.fuelcelltoday.com. Visitado em 27/04/04.
- _____. *Fuel Cell Market Survey: Portable Applications*. Fuel Cell Today, 2003b. Disponível em www.fuelcelltoday.com. Visitado em 27/04/04.
- _____. *Fuel Cell Market Survey: Light Duty Vehicles*. Fuel Cell Today, 2004a. Disponível em www.fuelcelltoday.com. Visitado em 27/04/04

- _____. *Fuel Cell Market Survey: Niche Market Vehicles*. Fuel Cell Today, 2004b. Disponível em www.fuelcelltoday.com. Visitado em 10/10/04
- DRUCKER, P. *Inovação e espírito empreendedor: práticas e princípios*. São Paulo, Ed. Enio Matheus Guazzelli, 1998.
- DYER, C. L. "Replacing the Battery in Portable Electronics". *Scientific American*, (Julho de 1999). Pp. 88-93. Ed. Scientific American, EUA, 1999.
- ENERGY NEXUS GROUP. *Technology Characterization: Fuel Cells*. Energy Nexus Group, 2002.
- FUEL CELL TEST AND DEVELOPMENT CENTER. *Direct Methanol Fuel Cell*. Disponível em www.fctec.com/fctec_types_dmfc.asp. Visitado em 30/03/05.
- GEIGER, S., CROPPER, M. *Fuel Cell Market Survey: Small Stationery Applications*, 2003. Disponível em www.fuelcelltoday.com. Visitado em 27/04/04.
- GITMAN, L. J. *Princípios de Administração Financeira*. 7ª edição, São Paulo, Ed. Harbra, 1997.
- GOMES NETO, E. H. *Aplicações Estacionárias de Células a Combustível*. Portal Célula a Combustível. Disponível em ww.celulaacombustivel.com.br. Visitado em 27/04/04.
- GUTERL, F., ROMANO, A. "People Power". *Newsweek*, vol. CXLIV, Nº 10, (6-13 de setembro de 2004). Pp. 34-41. Ed. Newsweek, EUA, 2004.
- HASTINGS, M. "The Gas Misers". *Newsweek*, vol. CXLIV, Nº 10, (6-13 de setembro de 2004). Pp. 50-55. Ed. Newsweek, EUA, 2004.
- IBGE. *Censo Demográfico*. IBGE, 2000.
- IDATECH. *IdaTech Unveils Portable Fuel Cell System at 2004 Fuel Cell Seminar*. Disponível em www.idatech.com. Consultado em 02/02/2005
- INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN ECONOMY. *Terms of Reference*. IPHE. Disponível em www.iphe.net, consultado no dia 29/06/04.

- _____. *Socio-economics of Hydrogen. Scoping Paper*. IPHE, 2004.
- JACOBSON, M. *Fuel Cells: A Technology & Applications Overview*. Strategic Clean Energy.
- JOLLIE, D. *Fuel Cell Market Survey: Portable Applications*. Fuel Cell Today, 2004. Disponível em www.fuelcelltoday.com. Visitado em 10/10/04.
- LIGHT. Simulador de Consumo. Disponível em www.light.com.br. Consultado em 01/02/2005.
- LIMA, J. H. G. *Geração Distribuída: Possibilidades de Aplicação no Brasil*. Apresentação realizada no Seminário Rede Cooperativa Pilhas a Combustível de Óxido Sólido, Rio de Janeiro, 2004.
- LLOYD, A. C. "The Power Plant in Your Basement". *Scientific American*, (Julho de 1999). Pp. 80-86. Ed. Scientific American, EUA, 1999.
- LOKURLU, A. et al. "Fuel cells for mobile and stationary applications – cost analysis for combined heat and power stations on the basis of fuel cells". *International Journal of Hydrogen Energy*. Nº 28, 2003. Pp. 703-711. Disponível em www.sciencedirect.com.
- MACEDO, W. N. et al. "Metodologia de Avaliação do Problema de Suprimento de Energia Elétrica em Comunidades não atendidas: o Caso da Comunidade de Marujá". In: anais do X Congresso Brasileiro de Energia, pp.2302-2312, Rio de Janeiro, Out. 2004.
- MARKHAM, S. K., "Moving Technologies From Lab to Market". *Research Technology Management*, ano 45, nº 6 (Novembro/Dezembro de 2002). Pp.31-42.
- MEINECKE, P. R., BRASIL, A. C. P., "Estudo das Condições para Fornecimento de Energia a Comunidades Isoladas – Observando os Preceitos do Desenvolvimento Sustentável". In: anais do X Congresso Brasileiro de Energia, pp.2302-2312, Rio de Janeiro, Out. 2004.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. *Programa Luz para Todos*. MME. Disponível em www.mme.gov.br. Consultado em 24/01/05.

- MIRANDA, P. E. V. et. al., "Pilhas a Combustível". In: Tolmasquim, M. T., *Fontes Renováveis de Energia no Brasil*. Rio de Janeiro, ed. Interciência, 2003.
- MUYLAERT, M. S., SIMÕES, A. F., LA ROVERE, E. L. "Pobreza e Universalização do Acesso à Energia Elétrica no Brasil". In: anais do X Congresso Brasileiro de Energia, pp.2302-2312, Rio de Janeiro, Out. 2004.
- PAULA, M. C. de, *Avaliação das Pilhas a Combustível como Principal Promotor do Hidrogênio como Vetor Energético*. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- PIETZAK, B., RAAK, H. "The 1 kW Fuel Cell for power and Heat Generation in Single Family Homes". In: Proceedings of the International Conference with Exhibition The Fuel Cell World. Lucerne, Suíça, Jun-Jul. 2004.
- PORTAL CÉLULA A COMBUSTÍVEL. *Células a combustível levarão eletricidade a comunidades isoladas na Amazônia*. Disponível em www.celulaacombustivel.com.br/noticiasnews. Visitado em 21/01/2005.
- RAMBACH, G., HABERMAN, D. (1997) "Uninterruptable, Renewable, Hydrogen-Based Energy for Isolated Communities Worldwide". *Advocate of the National Hydrogen Association*, 2, 2, 6-7. Apresentado no 8th Annual U.S. Hydrogen Meeting, Washington, DC, EUA, Março 1997.
- REVISTA VEJA. "Veloz e limpo". *Revista Veja*, edição 1874, ano 37, nº 40 (06 de outubro de 2004). Pp. 72. Ed. Abril, Brasil, 2004.
- REVISTA VEJA. "Este é para valer". *Revista Veja*, edição 1887, ano 38, nº2 (12 de janeiro de 2005). Pp. 86. Ed. Abril, Brasil, 2005.
- RIFKIN, J. A. *Economia do Hidrogênio*. São Paulo, Ed. M.Books, 2003.
- SAMPAIO, M. R. *O hidrogênio como vetor energético alternativo – Perspectivas para o transporte rodoviário brasileiro, empregando veículos movidos por pilhas a combustível*. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL. "Energias do Futuro". *Scientific American Brasil*. Edição especial nº 3 (dezembro 2003). Pp. 70-73. Ed. Ediouro, Brasil, 2003.

WALD, M. L. "Questions about a Hydrogen Economy". *Scientific American*, (Maio de 2004). Pp. 66-73. Ed. Scientific American, EUA, 2004.

UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO. Disponível em www.unica.com.br

U.S. Department of Energy (DOE), *Fuel Cell Handbook* (5ª edição). EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation. Morgantown, West Virginia, EUA, 2000.