

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO – UNIFESP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, QUÍMICAS E FARMACÊUTICAS

ADRIANO HASEGAWA

**DESAFIOS TECNOLÓGICOS E ECONÔMICOS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS BASEADOS NA TECNOLOGIA
DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL**

BACHARELADO EM QUÍMICA INDUSTRIAL

ORIENTADOR: DR. ROQUE MACHADO DE SENNA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DIADEMA, JUNHO DE 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO – UNIFESP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, QUÍMICAS E FARMACÊUTICAS

ADRIANO HASEGAWA

**DESAFIOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS BASEADOS
NA TECNOLOGIA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL**

Trabalho de conclusão da unidade curricular
Projetos Dirigidos em Química Industrial,
como requisito parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Química Industrial.

Prof. Dr. ROQUE MACHADO DE SENNA

Orientador

DIADEMA, 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Hasegawa, Adriano

Desafios para o Desenvolvimento de Sistemas Baseados na Tecnologia de Células a Combustível / Adriano Hasegawa – Diadema, 2015.

84 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema, 2015

Orientador: Dr. Roque Machado de Senna

1. Células a Combustível. 2. Hidrogênio. 3. Desafios. I. Título.

CDD 621.312429

A todos aqueles cientistas e pesquisadores que trabalharam arduamente na construção desses conhecimentos, e que agora é selecionado e consolidado, com o fim de contribuir com as próximas gerações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço neste momento a família por nos acompanhar nesta jornada. A UNIFESP e seus funcionários e professores que atuam bravamente na educação, superando nesta empreitada diversas dificuldades. Ao professor Dr. Roque Machado de Senna que nos acompanhou e orientou neste trabalho.

Também agradeço aos demais profissionais de outras instituições de ensino que contribuíram em outros momentos de minha vida acadêmica.

“Aprendi o silêncio com os faladores, a tolerância com os intolerantes, a bondade com os maldosos; e, por estranho que pareça, sou grato a esses professores”.

Khalil Gibran, filósofo e poeta libanês, viveu no início do século XX.

RESUMO

Devido a crescente preocupação mundial com questões relativas ao meio ambiente e à sustentabilidade das atividades humanas, a geração de energia tem se apresentado como um grande desafio, particularmente devido ao fato de ser uma atividade extremamente poluidora (quando proveniente de combustíveis fósseis). Neste contexto buscam-se novas fontes de energia. Uma das alternativas mais promissoras é representada pelo hidrogênio. O hidrogênio serve como vetor energético e pode ser gerado por diversas tecnologias tais como solar, eólica, biomassa, dentre outras alternativas renováveis. Dentro do que se convencionou chamar de economia do hidrogênio, merece destaque especial a tecnologia das células a combustível. São dispositivos que oxidam eletroquimicamente um combustível (em geral hidrogênio) gerando energia elétrica e calor. Assim, descrever os desafios tecnológicos e econômicos que afetam a disseminação das células a combustível permite contribuir com os esforços de avançar na busca de sistemas de geração de energia mais sustentáveis. Neste trabalho fez-se uma revisão da tecnologia das células a combustíveis, coletado em base de dados científico acadêmicas, buscando os artigos, por critério de relevância e data de publicação (inferior a 10 anos). A partir deste levantamento, elaborou-se este texto de revisão bibliográfica. Pode-se constatar que a tecnologia de células a combustível possui diversos problemas em comum à disseminação da própria economia do hidrogênio, dentre os quais citam-se: elevado custo de geração, necessidade de altos investimentos em infraestrutura, baixa maturidade tecnológica. E possui também problemas específicos dentre os quais: alto custo de componentes, baixa autonomia e confiabilidade. Parte da contribuição deste trabalho foi a de identificar os desafios que afetam a economia do hidrogênio e separa-los dos que afetam a tecnologia das células a combustível. Algo que a literatura especializada costuma manter junto e que é um fator importante para impedir a disseminação das células a combustível.

Palavras chave: Hidrogênio: economia, produção; Células a Combustível; Desafios Tecnológicos; Desafios Econômicos;

ABSTRACT

Because of increasing worldwide concern with issues related to the environment and sustainability of human activities, power generation has emerged as a major challenge, particularly due to the fact that an extremely polluting activity (when coming from fossil fuels). In this context we are sought new sources of energy. One of the most promising alternatives is represented by hydrogen. Hydrogen serves as energy carrier and can be generated by various technologies such as solar, wind, biomass, among other renewable alternatives. Within the so-called hydrogen economy, deserves special mention the technology of fuel cells. Are devices that electrochemically oxidize a fuel (usually hydrogen) generating electricity and heat. So describe the technological and economic challenges that affect the spread of fuel cells enables contribute to efforts to advance the search for more sustainable power generation systems. This work was made a revision of the fuel cell technology, collected in academic scientific database, searching articles for relevance criteria and publication date (under 10 years). From this survey, it elaborated this text literature review. It can be seen that the fuel cell technology has several problems in common the spread of own hydrogen economy, among which are cited: the high cost of generation, need for high investments in infrastructure, low technological maturity. It also has specific problems among them: high cost of components, low autonomy and reliability. Part of the contribution of this work was to identify challenges affecting the hydrogen economy and separates them from affecting the technology of fuel cells. Something that the literature usually keep together and is an important factor to prevent the spread of fuel cells.

Keywords: Hydrogen: economy, production; Fuel Cells; Technological challenges; Economic Challenges

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Célula Galvânica	pg 06
Figura 02: Estrutura Química do Náfion	pg 10
Figura 03: DEFC com membrana trocadora de cátion	pg 10
Figura 04: DEFC com membrana trocadora de anion	pg 11
Figura 05: Esquema Simplificado de uma Célula a Combustível PEMFC	pg 15
Figura 06: Novo catalisador sintetizado em 2014, baseado em nanoestrutura de uma liga Pt-Ni com desempenho catalítico superior a 30 vezes aos catalisadores atuais.	pg 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Tipos de Células a Combustível	pg 17
Tabela 02: Aplicações e vantagens de algumas Células a Combustível	pg 18
Tabela 03: Resultados da busca por palavras chaves nas bases de dados selecionadas	pg 24
Tabela 04: Revistas Acadêmicas utilizadas	pg 26
Tabela 05: Custo da Produção de Hidrogênio (dados 2014)	pg 33
Tabela 06: Custo da Produção de Hidrogênio (2005-2013)	pg 34
Tabela 07. Tipos de armazenamento de hidrogênio	pg 35
Tabela 08. Comparação de eficiência entre geração distribuída e centralizada	pg 40
Tabela 09: Comparação entre Tecnologias de energia portáteis	pg 43
Tabela 10. Percurso tecnológico das células a combustível	pg 57

LISTA DO APÊNDICE

Tabela A1: Duração das Reservas conhecidas de Carvão (2013)	pg 75
Tabela A2: Fator de Impacto e Classificação Qualis	pg 75
Tabela A3. Conteúdo Energético de diferentes combustíveis	pg 76
Tabela A4. Tecnologias de produção de hidrogênio	pg 76
Tabela A5. Cadeia Produtiva do Hidrogênio	pg 77
Tabela A6. Comparação de tecnologias de produção do hidrogênio	pg 77
Tabela A7. Processos de conversão de Biomassa em energia	pg 78
Tabela A8: Custo de distribuição de H ₂ (2005-2020)	pg 78
Tabela A9: Custos de uma Célula a Combustível PEM (uso automotivo)	pg 79
Tabela A10: Evolução de custo de uma célula PEM para uso automotivo	pg 79
Tabela A11: Comparação de Tecnologias para uso em transporte	pg 80
Tabela A12. Comparativo de preço de veículos: combustão interna vs células a combustível	pg 80
Tabela A13. Custos de capital para diversos tipos de sistemas veiculares	pg 81
Tabela A14. Custos de operação de alguns combustíveis	pg 81
Tabela A15. Sumário dos custos e emissões	pg 81
Tabela A16. Comparativo de tecnologias aplicadas em sistemas CHP	pg 82
Tabela A17. Comparação dos preços de geração de energia em sistemas estacionários do tipo PEM	pg 82
Tabela A18. Evolução das células a combustível no Japão	pg 83
Tabela A19: Tecnologias de Geração de Energia Estacionária	pg 83
Tabela A20. Principais problemas apresentados pelos módulos de energia	pg 84
Tabela A21. Compilação dos problemas técnicos e possíveis soluções para células PEM	pg 84

SUMÁRIO

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
Lista do Apêndice	x
Sumário	xi
1 INTRODUÇÃO	pg 01
2 OBJETIVOS	
2.1 Objetivos Gerais	pg 04
2.2 Objetivos Específicos	pg 04
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	
3.1. Fundamentos de Eletroquímica	pg 05
3.2. Breves Definições	pg 09
3.2.1. Catalisadores	pg 09
3.2.2. Eletrocatalisadores	pg 09
3.2.3. Eletrólitos Sólidos	pg 09
3.2.4. Sistema CHP	pg 11
3.2.5. Técnicas de Produção de Hidrogênio	pg 12
3.2.5.1. Reforma a vapor	pg 12
3.2.5.2. Reforma a vapor etanol	pg 12
3.2.5.3. Produção Biológica	pg 12
3.2.5.4. Eletrólise	pg 12
3.2.5.5. Fotólise	pg 12
3.2.5.6. Gaseificação da Biomassa	pg 12
3.2.5.7. Produção de Hidrogênio	pg 13
3.2.6. Tipos de Armazenamento de Hidrogênio	pg 13
3.2.6.1. Físico	pg 13
3.2.6.2. Químico	pg 13
3.3. Células a Combustível	
3.3.1. Breve Histórico	pg 14
3.3.2. Tipos Principais de Células a Combustível	pg 16

3.3.3. Possíveis Aplicações, vantagens e desvantagens dos tipos de Células a Combustível	pg 17
3.3.4. Tipos particulares de células a combustível	pg 18
3.3.4.1. AEMFC	pg 18
3.3.4.2. DEFC	pg 19
3.4. Fontes de Energia Sustentáveis	pg 19
4 METODOLOGIA	pg 23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	pg 27
5.1. Breve Cenário	pg 27
5.2. Produção, armazenamento e distribuição de Hidrogênio	pg 28
5.3. Panorama tecnológico e econômico das células a combustível em diferentes modais de utilização	pg 36
5.3.1. Células a Combustível – uso automotivo	pg 36
5.3.2. Célula a Combustível – Geração Distribuída	pg 39
5.3.3. Células a Combustível – Aplicações Portáteis	pg 43
5.3.4. Células a Combustível a Etanol Direto (DEFC)	pg 43
5.4. Desafios Tecnológicos e Econômicos das Células a Combustível	pg 46
6 CONCLUSÕES	pg 58
REFERÊNCIAS	pg 60
APÊNDICE	pg 75

1 INTRODUÇÃO

Apesar de sua enorme relevância social e econômica, as atividades relacionadas com a obtenção, distribuição e uso da energia provocam enormes impactos no meio ambiente, ao passo que lançam substâncias na atmosfera, nas fontes de água e no solo, comprometendo a saúde e a sobrevivência de todo o ecossistema terrestre. As várias etapas dos sistemas energéticos, tais como, as atividades extrativistas, sua conversão, distribuição e uso estão intimamente relacionados entre si e com o desenvolvimento de toda a humanidade. Há uma crescente necessidade de encontrar soluções para os efeitos negativos da cadeia dos processos de produção, distribuição e uso de energia a fim de minimizar os prejuízos sociais, ambientais e econômicos (ALDABÓ, 2004). O crescimento populacional, em especial nos países em desenvolvimento (BONIFÁCIO, 2011), e o crescente consumo de recursos energéticos, por habitante, vem trazendo preocupações relativas à sustentabilidade das atividades humanas (FUKUROZAKI, 2006).

Parte dessas preocupações se manifesta em controles mais rigorosos no que se refere a emissões ambientais e a exploração de recursos (por exemplo, sistemas de Certificação Ambiental, certificação da origem matéria prima, iniciativas em Conservação de Energia; MATELLI, 2001) e parte se manifesta na busca e no desenvolvimento de alternativas para o fornecimento de energia oriunda de matérias primas com tecnologias de exploração e uso mais amigáveis ao meio ambiente (ALDABÓ, 2004).

Isso tudo nos dá a certeza de que a energia é de fundamental importância para o desenvolvimento da humanidade. (BONIFÁCIO, 2011).

Dentro deste cenário, o hidrogênio surge como uma alternativa promissora. O hidrogênio possui todo um conjunto de iniciativas institucionais, financeiras, de pesquisa e tecnologia, disseminação e ganhos de escala, aos quais se dá o nome de Economia do Hidrogênio. Dentro da chamada Economia do Hidrogênio está inserida a Tecnologia das Células a Combustível (ALDABÓ, 2004) que, são transformadores que convertem energia eletroquímica em energia elétrica e calor, por meio da alimentação de reagentes, sendo o hidrogênio no anodo e oxigênio no cátodo (SENNA, 2012).

Historicamente as células a combustível surgiram em 1839 com os trabalhos de pesquisa em eletroquímica, do cientista inglês William Grove, entretanto a primeira célula a combustível com aplicação prática resultou de um trabalho, iniciado na Inglaterra em 1932,

por FT Bacon. A célula a combustível objeto desse trabalho foi uma unidade de 5 kW_e (quilowatt elétrico) de potência, alimentada pelo gás hidrogênio e o gás oxigênio, suportada em um sistema que possuía um eletrólito alcalino. Essa unidade geradora demonstrou ser capaz de alimentar uma máquina de solda, uma serra circular e uma empilhadeira de 2 toneladas (WARSHAY, 1989). No entanto, foi à atenção mundial para as missões espaciais da NASA (Agência Espacial Norte Americana) ocorrida nos anos 60 do século 20 que introduziram "célula de combustível" no vocabulário de milhões de pessoas (SOMMER, 2012).

As células a combustível possuem regimes diferenciados de temperatura de operação, que dependem do eletrólito utilizado, do combustível utilizado no anodo e na espécie iônica que atravessa o eletrólito (MEDEIROS, 2013).

Dentre as vantagens das células a combustível pode-se destacar: alta eficiência de conversão energética, geração distribuída de energia, baixa emissão de particulados e poluentes, operação silenciosa e sem partes móveis, alta confiabilidade, baixo impacto ambiental, versatilidade de operação (potência flexível, construção modular, flexibilidade), possibilidade de cogeração energética (LINARDI, 2010; ALDABÓ, 2004).

Dados de 2011 indicam que o setor de transportes representa 70% do consumo de petróleo (EIA, 2014). Assim, neste setor as células a combustível poderão oferecer os maiores benefícios. A "The National Academies Press" dos EUA publicou um estudo (NA, 2008) que mostra que somente nos EUA as células a combustível poderão reduzir em 24% o consumo de gasolina nos EUA em 2035 e 69% em 2050.

Uma característica associada ao hidrogênio é que ele pode ser usado como meio de armazenar energia útil. Assim, pode ser acoplado com sistemas de geração de energia renovável que possam sofrer de problemas de intermitência, como a sazonalidade, clima, energia solar, eólica, das marés. Assim, quando a produção por estes meios cai, usa-se o hidrogênio acumulado em períodos de maior disponibilidade. Outro benefício importante é sistêmico: a distribuição e armazenagem locais de energia aumentam a estabilidade e qualidade do fornecimento de todo o sistema elétrico, além de reduzir perdas com transmissão (NEGRO, 2004).

Isso tudo nos dá a certeza de que a energia elétrica produzida por intermédio das células a combustível é de fundamental importância para o desenvolvimento da humanidade e

este trabalho pretende contribuir no estímulo e para que os sistemas baseados nessa tecnologia aumentem a sua presença na matriz energética mundial.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Expor e discutir os desafios tecnológicos e econômicos que afetam o desenvolvimento, disseminação e comercialização de sistemas baseados na tecnologia de células a combustível.

2.2 Objetivos Específicos

- * Expor e discutir os desafios para obtenção, estocagem e distribuição de hidrogênio.
- * Expor e discutir os desafios para a redução do custo de geração de energia pelas células a combustível;
- * Contribuir para a disseminação e comercialização da tecnologia das Células a Combustível para diversos setores da economia.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Fundamentos de Eletroquímica

O objeto de estudo da Eletroquímica é a relação entre energia elétrica e transformação química (SKOOG, 2002). Ela descreve os fenômenos que ocorrem na interface de um condutor eletrônico (eletrodo) com um condutor iônico (eletrólito) (VARELA, 2000). A transformação se dá por meio de células eletroquímicas, que são dispositivos onde ocorrem reações de óxido redução. Como se trata de uma inter-conversão de energia química para energia elétrica é de se imaginar que existem dois tipos de células eletroquímicas: células galvânicas e células eletrolíticas (KORYTA, 1993).

- Células Galvânicas: também chamadas de células voltaicas, são aquelas onde ocorre a conversão de energia química para energia elétrica; portanto geram energia elétrica.
- Células Eletrolíticas: são aquelas onde a energia elétrica é convertida em energia química; portanto consomem energia elétrica (VILLULLAS, 2002).

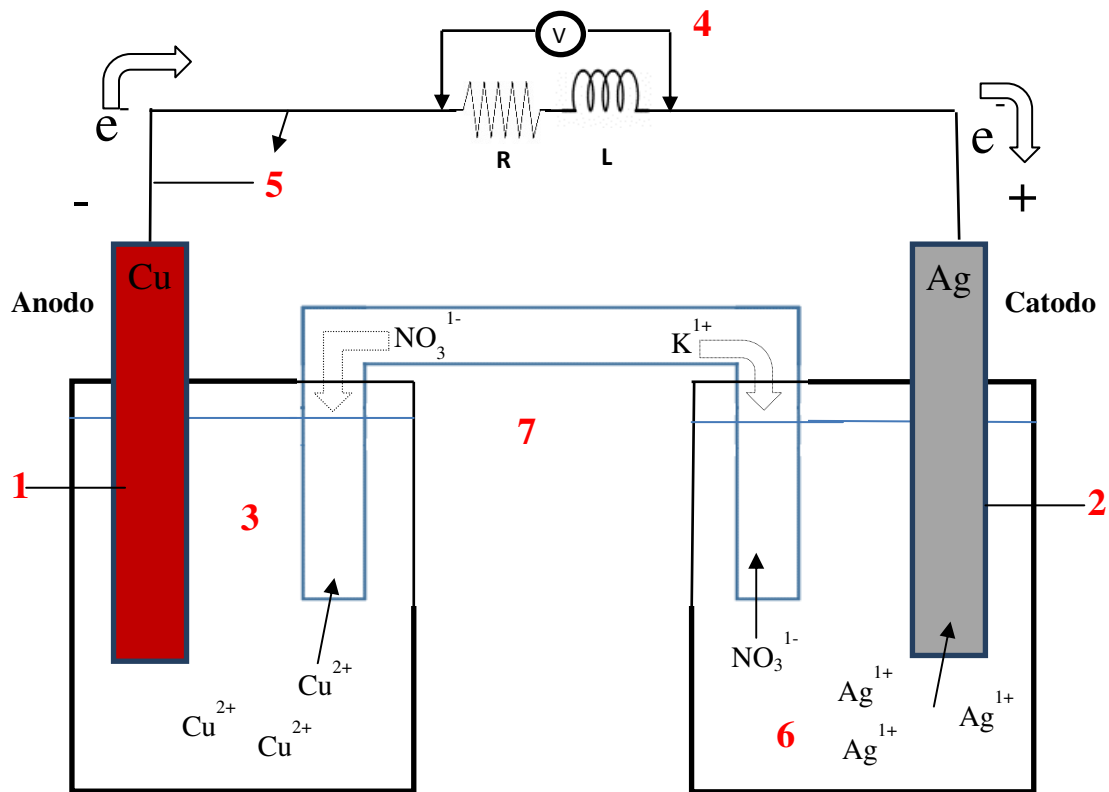
As Células Galvânicas são classificadas como primárias (não podem ser recarregadas) e secundárias (podem ser recarregadas) (LINARDI, 2010).

Numa reação eletroquímica dois processos correm em paralelo:

- Transferência de carga elétrica: na interface/superfície do eletrodo com o eletrólito;
- Transferência de massa (transporte de massa) das espécies redox na matriz do eletrólito (este transporte se dá por difusão, convecção ou migração) (KORYTA, 1993).

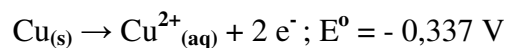
Mostra-se na Figura 01 uma célula galvânica elementar de Cobre (Cu) e Prata (Ag). E em [1] tem-se o eletrodo de cobre que atua como anodo, isto é, fornece elétrons, que por conveniência se encontra do lado esquerdo do desenho; em [2] encontra-se o eletrodo de prata que atua como catodo, ou seja, reduzindo-se. No anodo ocorre a oxidação. É o polo negativo. No cátodo ocorre redução, é o polo positivo. Em [3] tem-se uma solução aquosa de sulfato de cobre (CuSO_4) e em [6] solução aquosa de nitrato de prata (AgNO_3). Em [5] tem-se o circuito externo consumidor da energia elétrica útil produzida, onde é inserido a carga e também um voltímetro [4] para registrar o potencial ocorrido.

Figura 01: Célula Galvânica



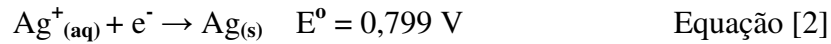
Fonte: adaptado de (GENTIL, 1996)

No anodo ocorre a reação de oxidação mostrada na equação [1] onde se manifesta a perda de massa no eletrodo de cobre para a solução de sulfato de cobre. O potencial de redução apresentado em relação ao hidrogênio $E^{\circ} = -0,337 \text{ V}$.



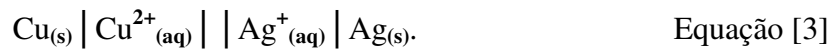
Equação [1]

Em [5] os elétrons liberados como mostrado na equação [1] percorrem o caminho externo à solução fornecendo energia e seguindo até o sítio reacional do cátodo onde ocorre um processo de redução da prata que é extraída da solução de nitrato de prata [6] e se incorpora ao eletrodo de prata [2]. A reação de redução química que se processa no catodo é a seguinte:



A fim de manter o equilíbrio elétrico entre as semi-reações existe um eletrólito imerso em uma ponte salina que permite a condução dos íons nitrato (NO_3^-) no sentido do anodo e os íons K^+ no sentido do catodo; sendo a ponte salina [7] a solução aquosa de KNO_3 que compõe o eletrólito. A ponte salina permite a passagem de íons entre as duas semi-reações, sendo desejável que não reajam nos sítios do cátodo e do anodo.

Mostra-se na equação [3] a notação para um diagrama de célula galvânica de cobre e prata (SKOOG, 2002).



Esta célula galvânica possui uma diferença de potencial elétrico, que pode ser medido por meio de um voltímetro como mostrado em [4]. Esta diferença de potencial, obtido na equação [3] é válido para temperatura de 25°C , concentração das soluções em 1 M, ou atividade unitária, o que geralmente não ocorre. O cálculo da força eletromotriz da pilha representada na figura 01 pode ser feito por meio da Equação de Nernst (SKOOG, 2002) representada por:

$$E = E^0 - (RT/nF) \cdot \ln(a_{\text{red}}/a_{\text{oxi}}). \quad \text{Equação [4]}$$

Sendo E^0 o potencial nas condições padrões. T a temperatura em Kelvin. R a constante geral dos gases que vale $8,31 \text{ J/K.mol}$; F representa a constante de Faraday que vale $9,65 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$; a_{red} e a_{oxi} representam respectivamente a atividade do estado reduzido e oxidado do eletrodo. E n representa o número de elétrons nas semi-reações.

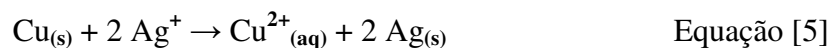
Com base na equação de Nernst [4] podemos calcular o potencial E do catodo e do anodo e com eles, podemos calcular o potencial da célula galvânica.

- *Determinação do potencial do Anodo (Cu):* supor eletrodo imerso em solução de 0,01 M de Cu^{2+} a 25°C ; $E_o = -0,337 \text{ V}$ (GENTIL, 1996); $\ln = 2,3 \log$; $n = 2$ (de [1]); $a_{\text{red}} = a_{\text{Cu}} = 1 \rightarrow$ para um metal puro, no estado sólido, a atividade é unitária (GENTIL, 1996); $a_{\text{oxi}} = a_{\text{Cu}^{2+}} = 0,01 \rightarrow$ considerar a atividade numericamente igual a concentração molar (GENTIL, 1996).
 $E_A = -0,337 - (8,314.298/2.96500).2,3\log(1/0,01) = -0,337 - (0,0591/2).(2) \rightarrow$
 $E_A = -0,3961 \text{ V}$

- *Determinação do potencial do Catodo (Ag):* supor eletrodo imerso em solução de 0,01 M de Ag^{1+} a 25°C : $E_o = +0,799 \text{ V}$ (GENTIL, 1996); $\ln = 2,3 \log$; $n = 2$ (vide equação[2]); $a_{\text{red}} = a_{\text{Ag}} = 1 \rightarrow$ por definição, para um metal puro, no estado sólido, a atividade é unitária; $a_{\text{oxi}} = a_{\text{Ag}^{1+}} = 0,02 \rightarrow$ para soluções diluídas pode se considerar a atividade numericamente igual a concentração molar; $E_{\text{Ag}} = 0,799 - (8,314.298/2.96500).2,3\log(1/0,02) = 0,799 - (0,0128).2,3.1,6989 \rightarrow E_{\text{Ag}} = 0,7489 \text{ V}$;

- *Determinação da Diferença de Potencial de Reação:*

O potencial do cátodo é $E_C = 0,7489 \text{ V}$ e do ânodo é $E_A = -0,3961 \text{ V}$. Assim podemos representar a diferença de potencial da reação descrita na célula galvânica da figura 01 como:



$$E = E_{\text{pilha}} = E_{(\text{cátodo})} - E_{(\text{ânodo})}$$

$$E_{\text{pilha}} = 0,7489 \text{ V} - (-0,3961 \text{ V})$$

$$E_{\text{pilha}} = 0,7489 \text{ V} + 0,3961 \text{ V}$$

$$E_{\text{pilha}} = 1,145 \text{ V}$$

Para se obter o valor da ddp (diferença de potencial) efetivamente mostrada no voltímetro [4] é necessário, adicionalmente, considerar a queda de potencial ocorrida em cada eletrodo devido ao efeito da polarização, associada em cada eletrodo, bem como a resistência ôhmica do eletrólito, das conexões, entre outros fatores que ao final do processo, promovem uma queda de potencial resultando num menor valor para a ddp (LINARDI, 2010).

3.2. Breves Definições

3.2.1. Catalisadores: materiais que alteram a velocidade na qual uma reação química ocorre, sem ser consumido neste processo. Pode ser orgânico (origem biológica tais como enzimas) ou inorgânico (tais como a platina, rutênio). (SKOOG, 2002). Nos processos eletroquímicos de interesse para células a combustível, a maioria dos catalisadores envolvem metais (Pt, Ru, Ni, Sn) em nanopartículas estruturadas em carbono (LINARDI, 2010) esta configuração permite menor uso de platina.

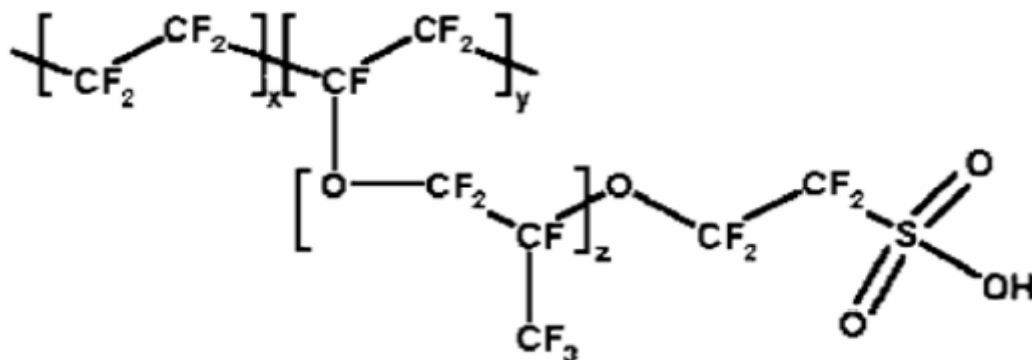
3.2.2. Eletrocatalisadores: são catalisadores que atuam em reações eletroquímicas. (SKOOG, 2002) por fenômeno de quimissorção ou ainda uma etapa de reordenamento na superfície do eletrodo, de modo a tornar a velocidade da reação mais elevada (SUMODJO, 1985). A platina é o principal metal utilizado como eletrocatalisador em células a combustível. Em células do tipo PEM (membrana trocadora de prótons) a platina atua como catalisador no anodo (oxidando o combustível) e no cátodo (reduzindo o oxigênio). A substituição da platina por um metal como o cobalto ou ligas metálicas, seria significativo na redução de custos, pois o cobalto estava cotado em US\$ 90,00/kg (2009) enquanto nesta mesma data a platina custava US\$ 37000,00/kg (GVOZDEN, 2009). Outro fator limitante à platina, além do custo, é o processo de envenenamento desse metal pela adsorção de impurezas que limitam sua eficiência catalítica, sendo uma das mais conhecidas impurezas o monóxido de carbono (CO) (LINARDI, 2010);

3.2.3. Eletrólitos Sólidos: material sólido (na forma de géis, cerâmicas ou polímeros) com capacidade de condução iônica (MACHADO, 2004). No caso de células a combustível, o tipo mais comum é o eletrólito polimérico; que se apresenta como uma membrana trocadora de íons (cátion ou ânion);

- *Membrana trocadora de cátion:* proporciona meio de condução dos prótons entre os eletrodos. A condução protônica se dá através de grupos iônicos dentro da estrutura do polímero (ALDABÓ, 2004). Também exerce a função de separar o combustível do oxidante, evitando sua mistura. Este polímero deve possuir pequena espessura, alta condutividade de prótons, estabilidade física, química e mecânica, baixa permeabilidade gasosa, baixo custo e disponibilidade. A membrana mais conhecida e utilizada nesta categoria é o Náfion

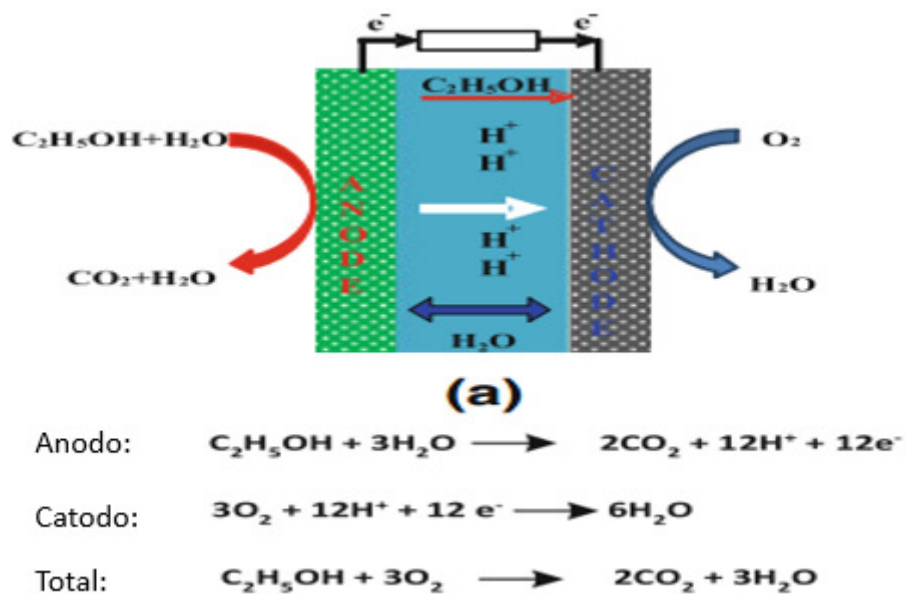
(LINARDI, 2010), que é um polímero derivado do PTFE (politetrafluoretileno). Ele sofre modificação química para ganhar grupos sulfônicos (HSO_3) que conferem a capacidade de troca catiônica ao polímero. Na figura 02 mostra-se a estrutura química do Náfion. E na figura 03 mostra-se um esquema de célula a combustível, com membrana trocadora de prótons, alimentada por etanol.

Figura 02: Estrutura Química do Náfion



Fonte: (SAHU, 2009)

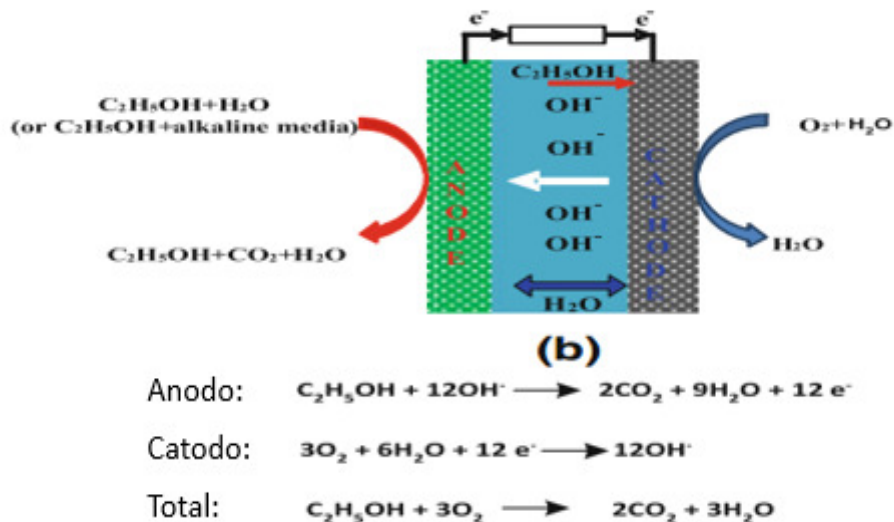
Figura 03: DEFC com membrana trocadora de cátion



Fonte: adaptada de (BROUZGOU, 2013).

- *Membrana trocadora de ânion*: proporciona meio de condução dos ânions (hidróxido, carbonatos) entre os eletrodos. As demais qualidades (resistência, estabilidade, custo) devem ser similares as membranas catiônicas. Na figura 04 mostra-se um esquema de célula a combustível, com membrana trocadora de ânions, alimentada por etanol.

Figura 04: DEFC com membrana trocadora de ânion



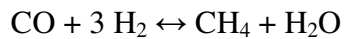
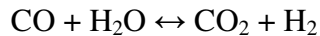
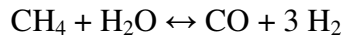
Fonte: adaptado de (BROUZGOU, 2013).

3.2.4. Sistema CHP (combined heat and power – calor e energia combinado): são sistemas que combinam a produção conjunta de calor (energia térmica) e eletricidade (energia elétrica) a partir do mesmo combustível, num único e integrado sistema. É com isso mais eficiente pois o calor que seria perdido na produção de energia é em parte reaproveitado no sistema integrado. Existe ainda um sistema conhecido como CCHP (Combined Cooling Heat and Power) ou sistema de terceira geração. Este último consiste em utilizar parte do calor recuperado pelo CHP em processos de resfriamento, oferecendo altas taxas de eficiência na conversão de energia (ELMER, 2015). O sistema CCHP consegue converter até 80% da energia como energia útil.

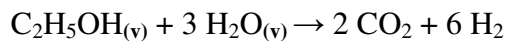
Estes sistemas podem ser acoplados a células a combustível do tipo PEM, aumentando a eficiência do sistema. Existem dispositivos micro-CHP do tipo PEM vendidos comercialmente no Japão, com capacidade de gerar até 2 kW (energia térmica + energia elétrica) para uso residencial (LEWIS, 2014).

3.2.5. Técnicas de Produção de Hidrogênio:

3.2.5.1. *Reforma a Vapor*: consiste em converter um hidrocarboneto em uma mistura de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano (SHREVE, 1997):



3.2.5.2. *Reforma a Vapor do Etanol*: consiste em converter o etanol em Hidrogênio (SHREVE, 1997):



3.2.5.3. *Produção biológica*: são 3 os bio-processos de geração biológica do hidrogênio (NEVES, 2009).

- * Biofotólise da água por algas: algas, por meio de energia solar e processos metabólicos próprios, quebram a molécula de água gerando hidrogênio.

- * Fermentação escura (dark fermentation): a digestão anaeróbica de matéria orgânica;

- * Processo Duplo: fermentação luminosa e escura.

3.2.5.4. *Eletrólise*: processo de oxirredução, não espontâneo, que separa o hidrogênio do oxigênio numa molécula de água pelo uso da eletricidade. Ocorre em duas etapas: primeiro ocorre a ionização ou dissociação do composto em íons que, são então transformados em elementos químicos ou no caso da eletrólise da água, formam-se hidrogênio e oxigênio moleculares. Pode ocorrer em soluções aquosas ácidas ou básicas (SHREVE, 1997).

3.2.5.5. *Fotólise* (fotovoltaico): processo de oxirredução da água, que utiliza a energia solar, gerando oxigênio e hidrogênio moleculares.

3.2.5.6. *Gaseificação da Biomassa*: toda matéria orgânica, oriunda de recurso renovável, de origem vegetal ou animal, que por meio de uma série de reações simultâneas (pirólise,

gaseificação, combustão) transforma um material muito heterogêneo em um combustível rico em hidrogênio e carbono (FUKUROZAKI, 2011).

3.2.5.7. Produção do hidrogênio

- . Geração Distribuída: quando a produção for menor que 1500 kg/dia;
- . Geração Centralizada: produção superior a 50000 kg/dia; (MILLER, 2014)

Além disso um tipo específico de geração distribuída, ocorre quando utilizamos o hidrogênio, como combustível para transporte. Trata-se da geração embarcada (sistema embarcado), onde a geração do hidrogênio é feita por meio de sistema acoplado ao sistema do veículo (um reformador a vapor, por exemplo, acoplado a uma célula a combustível).

3.2.6. Tipos de Armazenamento do Hidrogênio (DUTTA, 2014):

3.2.6.1. Físico (DUTTA, 2014) que se divide em - Comprimido: hidrogênio armazenado em tanques com pressões de 350 bar (maiores volumes) e 750 bar (por exemplo para sistemas veiculares); Temperatura (criogênico) e pressão: armazenado na forma líquida; Rede: o hidrogênio fica em poros de materiais ricos em redes de coordenação;

3.2.6.2. Químico (DUTTA, 2014) principalmente pelo uso de Hidretos metálicos: metais do grupo 1 A ou 2 A (Mg, Na, Li) podem se associar ao hidrogênio servindo como reservatórios químicos.

3.3. Células a Combustível.

3.3.1. Breve Histórico e descrição

Ao longo da História é cada vez maior o consumo de energia pela humanidade. Tem-se então na década de 70 a crise do petróleo. Com o advento da década de 90 surgem questões ambientais tais como o aquecimento global (IPCC nasce em 1988). Passa a se entender necessária a “descarbonização” das fontes de energia e, para atender à essa necessidade surgiu uma proposta de solução associada ao conceito de “economia do hidrogênio”.

A primeira forma de produzir hidrogênio, a eletrólise, data da década de 1920. Cabe a John B.S. Haldane, o mérito de iniciar a disseminação da tecnologia, e explicar sobre suas vantagens – e o que significa a “economia do hidrogênio”. Este termo em si aparece em 1970 (John Bockris). O Departamento de Energia dos EUA disse após 11/09: “O hidrogênio é a escolha dos EUA para energias limpas” (CHUM, 2002).

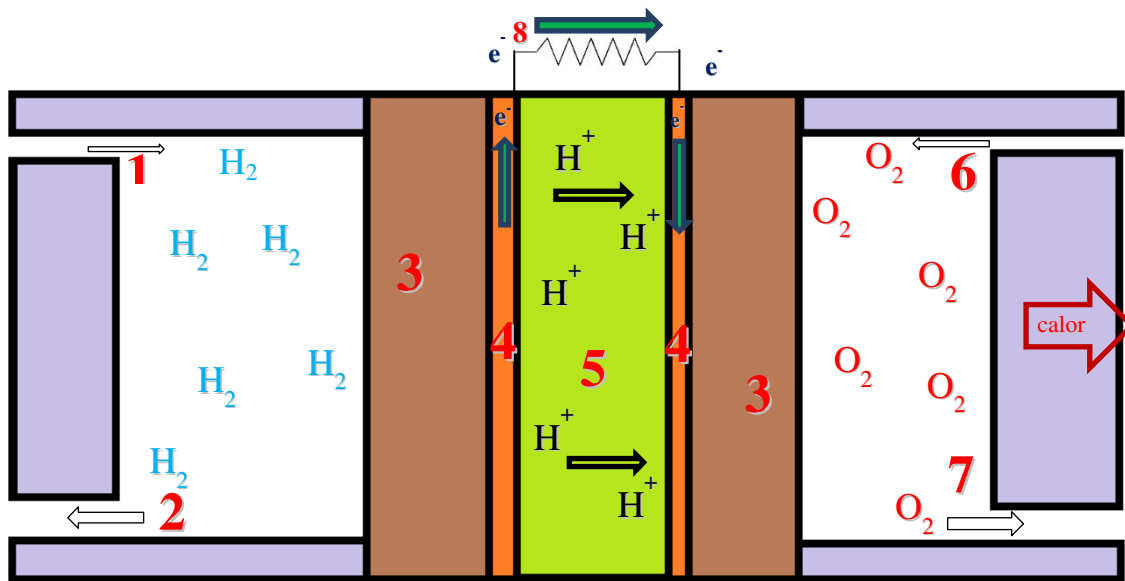
Atualmente o hidrogênio é produzido por reforma a vapor e eletrólise. Outras fontes possíveis: metano (gás natural), metanol. Existe uma preocupação com a segurança deste combustível, mas este quesito não é muito diferente em relação aos demais combustíveis (hidrocarbonetos). Existem barreiras técnicas a economia do hidrogênio: política, custo e infraestrutura de distribuição e armazenamento, dentre outras (ALDABÓ, 2004).

Em 1839, Willian Robert Grove inicia as primeiras pesquisas com células a combustível. Já em 1889, Ludwig Mond e Charles Langer criam os primeiros dispositivos. Em 1932, Francis Bacon realizava os primeiros experimentos bem-sucedidos. E em 1959 ele cria uma célula a combustível de 5kW (ALDABÓ, 2004).

No fim dos anos 50 com a corrida espacial, a NASA começa a pesquisar as células a combustível como dispositivo eficiente e seguro para fornecimento de energia aos ônibus espaciais (ALDABÓ, 2004).

A alimentação dos combustíveis nas células a combustível é feita de modo contínuo. A Figura 05 mostra um modelo simplificado de célula a combustível.

Figura 05: Esquema Simplificado de uma Célula a Combustível PEMFC



Fonte: Adaptado de (LINARDI, 2010)

Temos no item [1] a entrada de hidrogênio. Este hidrogênio pode ter diversas origens: pode ter sido gerado por processo eletrolítico alimentado por outra fonte de energia (solar, eólica), ou pode ter sido originado de etapa anterior de conversão de um combustível primário (metanol, metano, dentre outros). No item [2] temos a saída do hidrogênio não oxidado (que pode ser reciclado de volta ao sistema). O item [4] representa a camada catalítica que no caso de uma PEMFC consiste em nanopartículas metálicas (platina ou ligas metálicas com platina) suportadas por carbono, o item [3] local onde ocorre a difusão gasosa do hidrogênio rumo a superfície catalítica item [4] onde de fato ocorrerá o processo de oxidação química. O anodo também pode oxidar outras espécies químicas que não o hidrogênio, por exemplo o metanol (DMFC – Células a Combustível a Metanol Direto). O eletrólito no item [5], é uma membrana (Náfion, polímero derivado do tetrafluoretileno), que promove o transporte das espécies iônicas (LINARDI, 2010). No item [4], tem-se uma camada catalítica, onde se promove a redução da espécie química, neste caso do oxigênio, que entra pelo item [6]. No cátodo se cria a interface na camada catalítica que permite o encontro dos elétrons cedidos no anodo com a espécie química presente no cátodo (oxigênio) (LINARDI, 2010). A saída do comburente que não reagiu (oxigênio), da água formada, e do calor liberado é representado pelo item [7]. O item [8] representa o circuito externo por onde passam os elétrons.

Por se tratar de dispositivos práticos, as células a combustível, podem operar com diversas matrizes de combustível. A escolha se dará em função de disponibilidade, custo, estabilidade, temperatura de operação (VILLULLAS, 2002). Mas em todos os casos, o combustível primário deve sofrer modificação química gerando hidrogênio, exceto as células a combustível, supridas diretamente com metanol (DMFC – Direct Methanol Fuel Cell).

Os dois principais componentes de uma célula a combustível são o eletrólito e os eletrodos (WENDT, 2002). Existem ainda sistemas periféricos tais como as unidades de processamento de combustível, responsáveis por transformar um combustível primário, como o gás natural, em hidrogênio.

3.3.2. Tipos Principais de Células a Combustível

Vários tipos de células estão sendo desenvolvidos. O que as diferenciam são:

- o combustível e oxidante utilizados;
- se o combustível é processado externa ou internamente à célula;
- o tipo de eletrólito;
- a temperatura de operação;
- se os reagentes são fornecidos por meio externo ou interno;

No entanto, a classificação da célula a combustível é feita pelo *tipo de eletrólito* utilizado. Mostra-se na tabela 01 esta classificação e os tipos de células a combustível mais comuns e os diversos regimes de temperatura de operação.

Tabela 01: Tipos de Células a Combustível

Tipo de Célula	Eletrólito/Carga	T (°C) Operação	Reações
Ácido Fosfórico (PAFC)	H ₃ PO ₄ /H ⁺	160-220°C	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻ 1/2 O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O
Alcalina (AFC)	KOH/OH ⁻	< 100°C	H ₂ + 2OH ⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻ 1/2 O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → 2 OH ⁻
Eletrólito Polimérico (membrana PEMFC)	membrana/H ⁺	60-120°C	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻ 1/2 O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O
Metanol Direto (DMFC)	membrana/H ⁺	60-120°C	CH ₃ OH + H ₂ O → CO ₂ + 6H ⁺ + 6e ⁻ 3/2 O ₂ + 6 H ⁺ + 6e ⁻ → 3 H ₂ O
Óxido Sólido (SOFC)	ZrO ₂ /O ²⁻	800-1000°C	H ₂ + O ²⁻ → H ₂ O + 2e ⁻ 1/2 O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻
Carbonato Fundido (MCFC)	LiCO ₃ + K ₂ CO ₃ / CO ₃ ²⁻	600-800°C	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻ 1/2 O ₂ + CO ₂ + 2e ⁻ → CO ₃ ²⁻

Fonte: Adaptado de (VILLULLAS, 2002)

3.3.3. Possíveis Aplicações, vantagens e desvantagens dos tipos de Células a Combustível

As células a combustível possuem um variado espectro de aplicações. As que mais se destacam são os transportes, fontes estacionárias (geração distribuída), utilidades portáteis. Nenhuma outra tecnologia de geração de energia tem a combinação de benefícios que as células de combustível oferecem. Estes incluem: nível de emissão baixo, alta eficiência, confiabilidade, flexibilidade de combustível, segurança energética, robustez e durabilidade, escalabilidade, operação silenciosa, portabilidade, compatibilidade de tecnologia, leve e de longa duração (LINARDI, 2010; ALDABÓ, 2004), conforme pode-se observar na Tabela 02.

Cada tipo de célula a combustível em função da tecnologia utilizada, custos de operação e manufatura, possuem aplicações bem específicas, geralmente baseadas em uma relação de custo benefício (SENNA, 2012).

Tabela 02: Aplicações e vantagens de algumas Células a Combustível

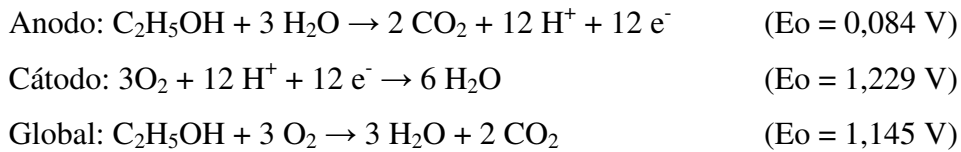
Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Alcalina (AFC)	- Alta eficiência (83% teórica)	- Sensível a CO ₂ - Gases ultra puros, sem reforma do combustível	- Espaçonaves - Aplicações militares
Membrana (PEMFC)	- Altas densidade de - Operação flexível	- Custo da membrana potência e eficiência - Contaminação do catalisador com CO	- Veículos automotores e catalisador - Espaçonaves - Mobilidade
Ácido fosfórico (PAFC)	- Maior desenvolvimento tecnológico	- Controle da porosidade do eletrodo - Sensibilidade a CO - Eficiência limitada pela corrosão	- Unidades estacionárias - Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) - Cogeração eletricidade/calor
Carbonatos fundidos (MCFC)	- Tolerância a CO/CO ₂ - Eletrodos à base de Ni	- Problemas de materiais - Necessidade da reciclagem de CO ₂ - Interface trifásica de difícil controle	- Unidades estacionárias de algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor
Cerâmicas (SOFC)	- Alta eficiência (cinética favorável) - A reforma do combustível pode ser feita na célula	- Problemas de materiais - Expansão térmica - Necessidade de pré-reforma	- Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor

Fonte: adaptado de (WENDT, 2000)

3.3.4. Tipos particulares de células a combustível

3.3.4.1. **AEMFC** (Ânion Exchange Membrane Fuel Cells): Célula a Combustível com membrana trocadora de ânions. É um tipo de célula a combustível que vem sendo considerada um substituto à célula do tipo PEM (membrana trocadora de próton). A célula AEMFC é particularmente vantajosa quando se utiliza etanol ou metanol como combustível (ao invés de hidrogênio), pois em condições alcalinas a reação de redução do oxigênio é favorecida. Além disso, metais mais baratos do que a platina, podem ser utilizados devido ao menor nível de ataque químico (corrosão) em relação aos sistemas do tipo PEM (ácidos). E dos 12 elétrons disponíveis por molécula de etanol, no sistema alcalino se consegue oxidações eficientes de até 10 elétrons (BROUZGOU, 2013).

A reação completa para o etanol em uma célula a combustível (liberando 12 elétrons) é descrita abaixo (SILVA, 2009).



3.3.4.2. **DEFC** (direct ethanol fuel cells) ou **DMFC** (direct methanol fuel cells): Células a combustível a etanol/metanol direto. São células a combustível que utilizam como combustível etanol ou metanol (ao invés do hidrogênio). Este combustível então sofre oxidação parcial em um dos anodos liberando elétrons que irão reduzir o oxigênio no outro terminal do eletrodo. Podem operar em condições ácidas ou alcalinas. Quando em condições ácidas, é uma forma de PEM, tendo inclusive o uso do Náfion. O melhor desempenho das células DEFC ocorre em condições alcalinas (BROUZGOU, 2013).

3.4. Fontes de Energia Sustentáveis

Fontes de energia renováveis são entendidas como aquelas que provem de recursos renováveis. Entre os exemplos destas fontes de energia destacam-se: solar, eólica, maremotriz (das marés), energia geotérmica. Além destas, ainda podemos citar aquelas provenientes de biomassa (etanol, biocombustíveis, material lignocelulósico) (FAPESP, 2010).

A Assembleia Geral da ONU em 2011 declarou que 2012 seria o "Ano Internacional de Energia Sustentável para Todos". Foi criada uma iniciativa internacional conhecida como Se4All (Energia Sustentável para Todos) que estabeleceu metas para o uso e disseminação de energias renováveis (BANCO MUNDIAL, 2013). Mostra-se na tabela A1 (Apêndice), a duração das reservas conhecidas de carvão, que são suficientes para os próximos 250 anos. Entretanto novas fontes de energia devem ser desenvolvidas considerando as necessidades das próximas gerações.

O desenvolvimento de fontes de energia renováveis traz benefícios ambientais diversos como: menor emissão de material particulado, SO_x, NO_x, precursores de ozônio troposférico, melhoria na saúde pública e na segurança energética (geração distribuída aumenta eficiência e confiabilidade do sistema elétrico); maior segurança também quanto ao fornecimento (não depender de países politicamente instáveis ou de oscilações fortes de preços no mercado internacional); geração local de empregos; disseminação do acesso a eletricidade em zonas remotas e rurais (AIE, 2014).

Qualquer fonte de energia substituta ou mesmo complementar a matriz fóssil (petróleo, carvão) deve levar em conta que a energia possui dimensões sociais, tecnológicas, econômicas e políticas, em escala local e global (BANCO MUNDIAL, 2013). Esta energia também deve oferecer uma oferta adequada à demanda atual e futura e ao mesmo tempo ser compatível com a preservação e integridade do seu ambiente de entorno, preservando a qualidade ambiental e os organismos por ele sustentados.

Simultaneamente ao desenvolvimento dessas novas formas de energia sustentáveis, outras ações devem ser implementadas em paralelo tais como, melhorar a eficiência energética ou o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia (por exemplo, sob a forma de hidrogênio) e sistemas de gerenciamento de redes de energias (gestão de demanda, “smart grids”: rede digital que detecta e reage a demandas na rede elétrica).

A preocupação em desenvolver fontes de energia renováveis está disseminada no mundo. Segundo relatório publicado em 2014, 144 países (destes 95 são países em desenvolvimento) possuem políticas locais de suporte e incentivo econômico e tecnológico ao desenvolvimento de tecnologias, visando desenvolvimento de energias renováveis (REN21, 2014). Hoje aproximadamente 22% da produção de energia mundial vêm de fontes renováveis (REN21, 2014). Dados de 2012 indicavam 19% da energia mundial para fontes renováveis sendo que a distribuição se dava entre fontes não biológicas com 10% (4,2% de reuso de calor, 3,8% hidroeletricidade, 2% representando a soma das contribuições solares, eólica, geotérmica) e 9% de biomassa (fontes biológicas) (REN21, 2014).

Os novos investimentos mundiais em energias e combustíveis renováveis somaram, em 2013, US\$ 249,4 bilhões de dólares (REN21, 2014). Destes novos investimentos, 53% foram destinados à energia solar (REN21, 2014). Na União Europeia, 73% dos novos sistemas implantados de geração de energia são baseados em fontes renováveis (REN21, 2014).

Este esforço global de investimentos é facilitado pela globalização dos mercados, que permite uma maior flexibilidade das indústrias em responder a demandas e a diversificar seus produtos e a desenvolver uma cadeia global de suprimentos.

Das novas tecnologias de energias sustentáveis, a energia solar fotovoltaica é que apresenta a maior taxa de crescimento com crescimento de 55% anuais durante os últimos 5 anos (REN21, 2014). Em 2014, 63 países já adotam alguma política que promova o consumo e utilização de biocombustíveis no transporte (REN21, 2014).

Estima-se que 1,3 bilhões de pessoas em todo o mundo não tenham acesso à eletricidade. Para estas pessoas e para aquelas que se encontram em regiões remotas e rurais, a solução tecnológica que apresenta o melhor custo benefício é a implantação de mini-redes de distribuição eletrificadas, combinadas com eficientes sistemas de gerenciamento de energia e redes, e baseadas em fontes renováveis. Ou seja, a expansão para estas áreas deve se basear em sistemas descentralizados, de geração distribuída, baseadas em energias renováveis (REN21, 2014). Isto traz ainda outros benefícios como redução de emissões, criação de indústrias locais (geração de empregos), alívio na rede do sistema elétrico (aumenta sua confiabilidade e reduz perdas), aumenta as oportunidades de educação e reduz a pobreza (REN21, 2014).

A biomassa continua com sua produção voltada a atender a demanda nos setores de transporte, energia e geração de calor (maior uso). Dentre as tecnologias de biomassa destacamos: produção de calor e energia combinados (co-geração), gás metano oriundo de aterros ou estações de tratamento de esgotos (biodigestores), biocombustíveis (etanol, biodiesel e material lignocelulósico – etanol de segunda geração), gaseificação (formação do gás de síntese) (FAPESP, 2010). No entanto questões importantes na produção de biomassa devem ser estudadas: mudanças no uso dos solos (desmatamento), segurança alimentar, uso da água, manejo de pesticidas e outros agroquímicos, perdas de biodiversidade (FAPESP, 2010).

A energia geotérmica por sua vez, apresenta uma capacidade global instalada de 12 GW tendo crescido apenas 4% nos últimos anos (REN21, 2014). A hidroeletricidade tem capacidade global instalada em 3,75 TWh, tendo sido, em 2013, instalada novos 40 GW. Os países com maior número de projetos de instalação em andamento são Turquia, China, Brasil e Vietnam, Índia e Rússia (REN21, 2014). Esforços também têm sido feitos em modernizar instalações já existentes, aumentando a eficiência e incorporando maior capacidade instalada (REN21, 2014).

A energia dos oceanos (maremotriz) possui hoje capacidade instalada de 530 MW, basicamente em plantas pilotos, sendo a vanguarda desta tecnologia a França e o Reino Unido (REN21, 2014). Já a energia solar fotovoltaica (PV – solar photovoltaics) possui hoje 139 GW de capacidade instalada. Sendo a China o país que lidera os investimentos (REN21, 2014), possuindo um terço de toda a capacidade instalada desta tecnologia. A redução de custos desta tecnologia está permitindo sua entrada em mercados da África, Oriente Médio e

América Latina. Mas ainda é uma tecnologia que precisa reduzir os custos e aumentar a eficiência das células solares (REN21, 2014).

A energia eólica possui capacidade instalada de 318 GW, no entanto tem visto seu mercado se reduzir em função da redução de custos de outras tecnologias (REN21, 2014).

Frente a este cenário, pode-se constatar que o atendimento as demandas energéticas futuras e crescentes pode envolver o uso de tecnologias sustentáveis (solar, eólica, biomassa), ao utilizar-se das sinergias e recursos naturais em cada país e não apenas predominante o petróleo; portanto com a produção e a distribuição descentralizada, benefícios indiretos podem ser obtidos como a redução de conflitos políticos, devido a um número reduzido de países exportadores de matéria prima (AIE, 2014).

Pode-se, ao considerar sua transitoriedade, usar o carvão acoplado com tecnologias eficientes de sequestro de carbono, aumentar a eficiência energética dos processos, produtos e redes de distribuição; desenvolver a economia do hidrogênio como vetor de armazenamento energético e conectado as fontes renováveis geração de energia. Isso é fundamental devido à intermitência de algumas fontes como a solar e eólica. A energia solar não funciona a noite, bem como a energia eólica tem picos de produção ao longo do ano e períodos de produção menor em outros momentos. Assim, é fundamental aperfeiçoar as tecnologias de armazenamento, transmissão e conversão energética (AIE, 2014).

4. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos de expor e discutir os desafios apresentados na viabilização das tecnologias de sistemas baseados nas células a combustível consultou-se as bases de dados: OECD iLibrary, Portal de Periódicos da Capes, BDTD (Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações). Também consultou-se Relatórios do Banco Mundial, da Agência Internacional de Energia (ONU), do Balanço Energético Nacional do Ministério das Minas e Energia (BEN/MME) e, REN21(Renewable Energy Policy Network for the 21st Century).

Para iniciar o trabalho de busca, utilizou-se de filtros, disponíveis no mecanismo de busca do Portal Capes, de “classificação por relevância” e “revisado por pares”. Foram usadas as seguintes palavras chaves, *combinadas* ou *separadas* (uso dos conectivos “AND” ou “OR”): ‘hydrogen’, ‘fuel cell’, ‘economy’, ‘scenario’, ‘roadmap’, ‘review’, ‘forecast’, ‘challenge’, ‘technological’, ‘state of art’, ‘barriers’ (MCDOWALL, 2006).

Na sequência dessa busca procurou-se estudos cujos temas estivessem relacionados a PEMFC (Células a Combustível com membrana trocadora de próton), SOFC (Células a Combustível de óxido sólido) e DMFC (Célula a Combustível a metanol direto). Isto se deve ao fato de que estes três tipos de células a combustível respondem por mais de 75% dos estudos em células a combustível (HO, 2014), o que sinaliza para um maior potencial que estas tecnologias têm de avançar rapidamente.

Mostra-se na tabela 03 as palavras chaves utilizadas e os resultados quantitativos obtidos nos bancos de dados selecionados.

Tabela 03: Resultados da busca por palavras chaves nas bases de dados selecionadas

Base de Dados	Palavras chaves	Refino/Filtro	número de artigos
Portal Periódico Capes*	Fuel Cell + review	Article	187
		Review	157
	Hydrogen + Economy	Hydrogen Economy	158
	Fuel Cell + challenge	Hydrogen	105
		PEM fuel cell	27
	Hydrogen + State of Art	Fuel Cells	146
		Economics	43
	PEMFC + Review	Fuel Cells	436
		Article	141
	PEMFC + Economic	Hydrogen	168
		Article	113
	SOFC + review	Fuel Cells	297
	SOFC + Economic	Article	177
	DMFC + review	Fuel Cells	244
		Article	96
DMFC + Economic	Methanol	46	
	Article	46	
OECD iLibrary	Fuel Cell + review		621
	Hydrogen + Economy		1323
	Fuel Cell + challenge		1852
	Hydrogen + State of Art		567
	Fuel Cell + State of Art		1034
	PEMFC + Review		20
	PEMFC + Economic		29
	SOFC + review		36
	SOFC + Economic		50
	DMFC + review		3
	DMFC + Economic		7

* com filtro de Relevância e Revisado por Pares; tem em sua base de dados, dentre outras, o Science Direct e o Web of Science

** com filtro de Relevância

Fonte: tabela elaborada pelo autor

Os artigos selecionados tiveram como critério de seleção: proximidade do título ao tema de interesse, presença no Abstract de assuntos e discussões tais como: células a combustível (desafios econômicos e tecnológicos), economia do hidrogênio, DMFC, PEMFC, SOFC e palavras como: review, state of art, challenge, economic, technical, barriers, fuel cell. Se priorizou artigos mais recentes (até 10 anos de publicação). Metodologia parecida foi utilizada por MCDOWALL, 2006. No entanto, a pesquisa deste autor envolvia mais filtros e um maior espaço temporal. Com isto restou-se menos de 50 artigos, distribuídos em diversas revistas acadêmicas (tabela 04), que foram efetivamente utilizados.

O WebQualis classifica as publicações científicas em função do seu fator de impacto em 8 categorias conforme descrito na tabela A2 (Apêndice).

Mostra-se na tabela 04 os *periódicos utilizados no presente trabalho* e os respectivos fatores de impacto e WebQualis.

Tabela 04: Revistas Acadêmicas utilizadas

Revista (ISSN)	Fator de Impacto (2014)	WebQualis
Energy (0360-5442)	4,844	A2 (Eng II)
Engineering Science and Education Journal	n/d	n/d
International Journal of Hydrogen Energy (0360-3199)	3,313	A1 (Eng II)
Journal of Industrial and Engineering Chemistry (1226-086X)	3,512	B1 (Eng II)
Journal of Power Sources (0378-7753)	6,217	A1 (Eng II)
Química Nova (1678-7064)	0,658 (2013)	B2 (Eng II)
Renewable and Sustainable Energy Reviews (1364-0321)	5,510	A1 (Eng II)
Renewable Energy (0960-1481)	3,361	A1 (Eng II)
Revista Brasileira de Energia	n/d	n/d
Technological Forecasting & Social Change	n/d	n/d
n/d – não disponível		
Eng II – Engenharia Química		

Fonte: (CAPES, 2015)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Iniciar-se-á apresentando um breve cenário para os sistemas baseados na tecnologia de células a combustível onde se descreve as posições de comercialização, vendas, pesquisas bem como programas governamentais em execução. Na sequência mostra-se o panorama de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio, bem como das células a combustível e suas aplicações. Finalizar-se-á mostrando os desafios tecnológicos e econômicos para a inserção dos sistemas de células a combustível na matriz energética mundial.

5.1. Breve Cenário

Nesta etapa levantou-se e se discutiu os mais relevantes desafios tecnológicos e econômicos ao desenvolvimento, disseminação e comercialização de sistemas baseados na tecnologia de células a combustíveis. Em 2013, as vendas de dispositivos com a tecnologia das células a combustível ultrapassaram US\$ 1,3 bilhão de dólares em vendas. Foram vendidas em 2013, aproximadamente 35000 sistemas de células a combustível, o que representa um aumento de 26% em relação a 2012 e mais de 400% sobre o ano de 2008 (CURTIN, 2014). Os principais países em número de patentes relacionadas a células a combustível no período 2002-2013 são: EUA (43% do total), Japão (33%), Coréia do Sul (8%) e Alemanha (6%) isto representa 90% do total de patentes depositadas no mundo, os demais países representam apenas 10% (CURTIN, 2014). Entre as fontes de energia renováveis os sistemas de células a combustíveis perderam seu posto de primeiro lugar em número de patentes para as fontes de energia solar. Em 2013 foram depositadas, em todo o mundo, 965 patentes sobre energia solar e 886 sobre células a combustível (CURTIN, 2014). No segundo semestre de 2012, foram depositadas ao redor do mundo, 3286 patentes sobre células a combustível, sendo destas, apenas 1 (uma) de pesquisador brasileiro (INPI, 2012). Destas patentes, 3118 envolvem aspectos de fabricação de célula a combustível, 555 envolviam eletrodos, 173 aspectos variados da produção do hidrogênio (INPI, 2012).

Ainda em 2013, o Japão, dentro do programa EneFarm (células micro-CHP do tipo PEM para uso residencial) vendeu mais de 26000 unidades. Este modelo tem durabilidade de 60000 h e custa US\$ 19650,00 (27% mais barato que o último modelo lançado em 2011) (CURTIN, 2014).

Na pesquisa de materiais, o ano de 2013 trouxe uma novidade baseado em Molibdênio (Laboratório Nacional de Brookhaven – EUA) (CURTIN, 2014), catalisadores baseados em nano-partículas de grafeno (forma alotrópica do carbono), outro catalisador baseado no molibdênio também foi desenvolvido (Universidade de Wisconsin – Madison – EUA) (CURTIN, 2014). Também foi desenvolvido um catalisador a base de ouro e óxido de ferro (Universidade DUKE – EUA) (CURTIN, 2014).

5.2. Produção, armazenamento e distribuição de Hidrogênio

O foco ao longo dos anos tem sido em desenvolver tecnologias que permitam viabilizar o hidrogênio como vetor energético para uma ampla gama de aplicações (MILLER, 2012). Sempre buscando acoplar tecnologias de baixo carbono e fontes renováveis. Campos de pesquisa envolvem a produção biológica de hidrogênio, a sua produção por energia solar (termoquímica). O conteúdo energético de diversos combustíveis é descrito na tabela A3 (Apêndice).

No Brasil não há produção de hidrogênio para fins energéticos, apenas para uso industrial como insumo (CGEE, 2010). Esta produção é estimada em 5000 m³/ano consumida em projetos de demonstração. A produção do hidrogênio por fontes renováveis tais como reforma do etanol, gaseificação da biomassa e conversão biológica encontra-se nos estágios iniciais de desenvolvimento (CGEE, 2010). Vale destacar ainda que não existe infraestrutura logística de armazenamento e distribuição que permita sua comercialização como combustível.

A produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis pode se dar de duas formas: distribuída ou centralizada (NEGRO, 2004). Na produção distribuída alguns estudos em andamento incluem a reforma de líquidos bioderivados renováveis (bio-óleos, açúcares, alcoóis) (KING, 2013), a eletrólise da água. Na produção centralizada temos a eletrólise integrada com geração de energia renovável (solar, eólica, geotérmica), gaseificação de biomassa, quebra termoquímica da água por energia solar, quebra fotoeletroquímica da água, e processos biológicos (USDE, 2013).

Nas pesquisas de produção de hidrogênio por produção biológica, uma das abordagens tem sido a de se utilizar de algas ou cepas de cianobactérias para produzir hidrogênio por meio de atividade fotossintética. Estudos de otimização de absorção da luz e outras técnicas

envolvendo os pigmentos dos organismos tem sido utilizado (MELIS, 2013). Isto é importante, pois diminui a dissipação da luz solar, aumentando a transmitância o que permite uso mais eficiente da energia luminosa pela cultura (MELIS, 2013). O custo de produção de hidrogênio a partir da gaseificação da biomassa está em 2,5 US\$/kg-H₂, (EUA, 2012) espera-se atingir o patamar de 1-2 US\$/kg-H₂ em 2020 (MILLER, 2012). O Brasil não produz hidrogênio para uso energético (CGEE, 2010). Devido a diversidade de matérias primas, variações nos processos biológicos, o gás de síntese e o biogás gerado nos processos de conversão de biomassa, apresentam diversos contaminantes tais como CO, CO₂, H₂S, NH₃, por isso células a combustível que operam em altas temperaturas (MCFC e SOFC) são as mais indicadas para utilizarem estes gases combustíveis provindos da biomassa, pois são menos afetados pela presença de contaminantes (BOCCI, 2014).

A produção de hidrogênio por energia solar também tem apresentado avanços. A ênfase consiste em desenvolver materiais fotoativos de baixo custo integrados a células solares baseadas em carbeto de silício (HU, 2013). Estes materiais devem apresentar desempenho de geração de corrente superior a 4mA/cm², durabilidade superior a 500 horas, com eficiência maior que 5%, com custo de geração de US\$ 22/kg-H₂ (HU, 2013). Pesquisa de materiais envolvendo eficiência, estabilidade, custo, modelagem, otimização são as abordagens mais usadas (HU, 2013).

Ainda vale destacar a geração de hidrogênio por outros meios tais como a eletrólise e possíveis ganhos com esta tecnologia (AYERS, 2013). A geração de hidrogênio, por meio da eletrólise, usando uma PEM (membrana trocadora de prótons) possui um custo aproximado (EUA, 2014) de US\$ 4,80-5,50/kg-H₂. Deste custo, os mais significativos se devem a energia elétrica, eficiência eletrolítica e custos de capital (AINSCOUGH, 2014).

Sistemas estacionários ou de geração distribuída frequentemente incluem subsistemas de processamento e conversão de um combustível inicial (gás natural, gás liquefeito de petróleo, combustíveis renováveis tais como aqueles resultados de biodigestores, oriundos de aterros, biodiesel, metanol, etanol, reforma a vapor) no combustível de interesse (o hidrogênio) (CHUM, 2002). Todos estes combustíveis primários exigem variados graus de tratamento a fim de gerar o hidrogênio adequado ao uso como combustível. Dentre estes citamos: retirada de impurezas presentes na matéria prima, modificação de estado físico e reações intermediárias. Outros problemas podem ocorrer em função de sua composição, bem

como os tipos de células a combustível a quais estão acopladas. Dentre os problemas citamos as impurezas do material de partida, como o conteúdo de enxofre e amônia (WENDT, 2002).

Diversas impurezas presentes no material de partida podem ocasionar danos ao sistema de processamento de combustível ou mesmo a célula a combustível propriamente, como o envenenando dos catalisadores (ALDABÓ, 2004). Assim desenvolver sistemas de limpeza acoplados ao processamento primário é na maioria dos casos necessário. Entretanto estes sistemas devem buscar a simplicidade de operação e os baixos custos a fim de não comprometer o desempenho global do sistema de célula a combustível.

O principal requisito para um sistema de distribuição de hidrogênio é seu grau de confiabilidade e segurança. Para isso pesquisa em materiais que aumentem estas características, mantendo os custos em patamares aceitáveis, deve ser o objetivo. Tubulações de alta pressão, sistemas eficientes de compressão e outras abordagens são as mais praticadas (SUTHERLAND, 2013). Atualmente um sistema de distribuição de hidrogênio, com pressão operacional de 350 bar (35 MPa) possui um custo de 4,5 US\$/kg-H₂. O objetivo, nos EUA, é atingir custos menores que 2 US\$/kg-H₂ em 2020 (AINSCOUGH, 2014).

Células a combustível, utilizadas para geração distribuída, quando acopladas com dispositivos de reaproveitamento de calor, pode gerar rendimentos da energia do combustível utilizado da ordem de 80%. Já usinas termoelétricas a carvão ou gás natural conseguem eficiência de 45-50% (USDE, 2012). Vale ainda destacar que a operação das células a combustível se faz silenciosa, livre de vibrações, pode ser alimentada localmente com biogás (de fontes locais como gás de sistemas de tratamento de águas, gás gerado em locais como aterros) (ALDABÓ, 2004).

Como sistema de energia estacionária, as células a combustível, possuem larga aplicação comercial, industrial e residencial e podem complementar ou substituir a energia da rede externa. Devido a sua modularidade podem ser implementados sistemas com capacidade de geração de 1 kW (pequenas unidades para backup), 1kW-3MW (sistemas domésticos, prédios comerciais e geração distribuída) (NEGRO, 2004). Estes sistemas aumentam a confiabilidade e reduzem as emissões, eliminam as perdas por transmissão e distribuição do sistema elétrico, contribuindo para reduzir o stress do sistema elétrico como um todo. Para estes sistemas de operação continuada, existe ainda a possibilidade de se acoplar um sistema CHP (Combined Heat and Power) (ALLANE, 2004), que ao reaproveitar o calor gerado, aumenta o rendimento global do sistema de 45-50% (sistemas térmicos de geração elétrica)

para até 80%. Além disso, são dispositivos que operam silenciosamente, sem vibrações, que podem ser alimentados com combustíveis para os quais já existe infraestrutura de distribuição estabelecida (ALDABÓ, 2004), tal como o gás natural (gás este, que nada impede, venha de fontes renováveis como a biomassa, ou ainda da decomposição de matéria orgânica em sistemas de tratamento de água). Vale destacar que estas células a combustível possuem baixos requisitos de operação e manutenção e apresentam excelente resposta transiente quando picos energéticos ocorrem. O custo de geração por kW, apesar de alto, já é competitivo com algumas outras tecnologias existentes (WENDT, 2000). Entretanto, apenas células de combustível de Ácido Fosfórico, já conseguem operar em instalações com aplicações de fornecimento de energia estacionária, com confiabilidade, por um período de 80000 h. As demais células a combustível (PEM, óxido sólido, carbonato fundido) ainda não atingiram este patamar. A PAFC também foi à única que operou em todas as condições ambientais de temperatura de interesse comercial (-40°C a +40°C).

É estimado para 2018-2028 o amadurecimento do mercado global de células a combustível, com faturamento anual entre \$ 43 – 139 bilhões (CCAT, 2008). Nestes valores irá predominar o uso no setor de transportes, seguido pelas aplicações estacionárias (CCAT, 2008).

Como sistemas de backup energético para clientes que não podem sofrer com problemas de interrupção no fornecimento de energia elétrica tais como: torres de celulares, data centers, hospital, sistemas governamentais, serviços de emergência. Devido à flexibilidade de tamanhos (sistema modular) podem ser adaptadas rapidamente as mais diversas situações, além de requerer menos manutenção que os geradores e baterias convencionais. Também podem ser reabastecidos mais rápidos que as baterias convencionais. Além disso, a qualidade da energia oferecida pelas células a combustível não se altera com o tempo. Já as baterias convencionais conforme vão descarregando sofrem flutuações de tensão. Além disso são mais pesadas e ocupam mais espaço que as células a combustível (VILLULLAS, 2002).

Veículos elétricos movidos a célula a combustível podem conseguir autonomia superiores a 241,4 km. As células do tipo PEM são as mais indicadas devido ao tamanho, peso, desempenho, início de operação rápido, resposta rápida a variações de demanda. Sua eficiência neste cenário oscila entre 53-59% (USDE, 2012). É um valor duas vezes maior que o motor a explosão de gasolina. A operação é silenciosa e não emite CO₂. Se a PEM for

alimentada diretamente por hidrogênio, não há no mercado e/ou em desenvolvimento, nenhuma outra tecnologia que emita menos gases de efeito estufa por quilometro (NGUYEN, 2010). Mesmo no caso de uma célula a combustível alimentada com gás natural que sofre a reforma gerando o hidrogênio, a redução nos níveis de emissão de gases do efeito estufa chega a 40% em relação às emissões geradas pelo motor a gasolina (NGUYEN, 2010).

Para o **Brasil**, que possui diversas fontes domésticas, de combustíveis renováveis, acoplar a economia do hidrogênio, a estrutura energética e a cadeia de matérias-primas existentes, podem gerar muitas sinergias que, se bem aproveitadas, aumentará nossa competitividade e desenvolvimento econômico. Etanol obtido por meio da fermentação da garapa, bem como o etanol de segunda geração desenvolvido no processo de fermentação de material ligno-celulósico podem ser acoplado a células a combustível como precursores de hidrogênio, também podem ser associadas as fontes de energia solar e eólica e biomassa (12-14 kg de biomassa para cada 1 kg de H₂) (EIA, 2014), gás natural gerado em aterros e estações de tratamento de esgoto. Além disso, outras tecnologias de geração de hidrogênio vêm sendo pesquisadas, e poderão ser adaptadas ao Brasil (por exemplo, produção de hidrogênio por meio de algas, o que pode nos favorecer devido à alta intensidade solar que o Brasil recebe). Também podemos realizar eletrolise da água por meio de energia eólica e solar. A energia eólica no Brasil tem um potencial de geração de 143,5 GW (ANEEL, 2008). Já a energia solar apresenta potencial de geração no Brasil de 1200-2400 kWh/m²/ano (EPE, 2012).

Para o armazenamento, a ênfase da pesquisa está em materiais precursores e carga para compósitos baseados em fibra de carbono, que mantenham suas características técnicas, e que reduzam os custos de montagem, operação e manutenção dos sistemas de armazenamento de hidrogênio a altas pressões (SUTHERLAND, 2013).

Para células a combustível com aplicações em veículos automotivos os custos de armazenamento de hidrogênio, estão atualmente em US\$ 15/kWh de energia útil. Pretende-se atingir, nos EUA, viabilidade econômica em US\$ 12/kWh e melhor desempenho possível abaixo de US\$ 8/kWh em 2020 (MCWHORTER, 2013).

Além desta abordagem mecânica de armazenamento, tem se estudado outros tipos de armazenamento: sistemas criogênicos-sorbentes, armazenamento químico (ANTON, 2013). Pesquisas que estudem as propriedades dos materiais utilizados no armazenamento de hidrogênio, conjugados a procedimentos de caracterização e avaliação de materiais, de modo

a identificar os parâmetros de desempenho chave, para sistemas de armazenamento de hidrogênio, são estratégias que também vem sendo utilizadas (ANTON, 2013).

Elenca-se na tabela A4 (Apêndice) algumas formas de produção de hidrogênio.

Tem-se na tabela A5 (Apêndice) tem-se um resumo da cadeia de produção do hidrogênio.

Uma comparação das tecnologias de produção de hidrogênio disponíveis ajuda a entender os custos associados ao processo. Mostra-se na tabela A6 (Apêndice) um comparativo destas tecnologias de produção do H₂.

A produção do hidrogênio por meio de Biomassa (fonte renovável) é aquela que tem tido grande interesse pois dispensa o uso de matéria prima fóssil. Mostra-se na tabela A7 (Apêndice) os processos de conversão de biomassa em energia

O Departamento de Energia dos EUA tem a meta, para 2020, de custo de produção de hidrogênio de valores menores <US\$ 2/kg H₂ (MILLER 2014) ou menores < US\$ 4/kg H₂ para o hidrogênio produzido e distribuído. As estimativas de valores dependem dos preços médios das matérias primas utilizadas e do custo de capital utilizado em cada solução tecnológica, dentre outros fatores. Mostra-se na tabela 05 os custos da produção de hidrogênio distribuído ou centralizado.

Tabela 05: Custo da Produção de Hidrogênio (dados 2014)

Custo Produção Atual H₂	Menor Custo	Valor Médio	Maior Valor
	US\$/kg	US\$/kg	US\$/kg
Geração Distribuída*			
Eletrolise - Sistema PEM	3,4	5,1	6,6
Líquidos Bioderivados	3,2	6,6	7,9
Geração Centralizada**			
Eletrólise - Sistema PEM	3,4	5,1	6,5
Biomassa	2,1	2,5	4,2
* Produção H ₂ ≤ 1500 kg/dia			
* *Produção H ₂ ≥ 50000 kg/dia			

Fonte: adaptado de (MILLER, 2014).

Já na tabela 06 pode-se ver a evolução destes mesmos custos por um período maior de tempo (2005-2013). Dos dados da tabela 06 (todos isentos de taxas e baseados no US\$ de

2007) podemos ver que o objetivo de custo de US\$ 2/kg ainda está longe de ser atingido seja na geração distribuída ou na centralizada. No entanto a reforma do gás natural (geração distribuída) e a gaseificação da biomassa (geração centralizada) são as técnicas que possuem custo médio mais próximo do objetivo.

Tabela 06: Custo da Produção de Hidrogênio (2005-2013)

Evolução do Custo Produção H₂					
	2005/2006	2009/2010	2011	2013	
Geração Distribuída*	US\$/kg	US\$/kg	US\$/kg	US\$/kg	
Eletrólise - Sistema PEM	4,76	3,65	3,58	3,43	Menor Custo
	6,47	5,35	5,28	5,14	Valor Médio
	8,26	6,87	6,78	6,6	Maior Valor
Reforma de Gás Natural	1,74	1,5	n/d	n/d	Menor Custo
	2,27	2,03	n/d	n/d	Valor Médio
	2,91	2,61	n/d	n/d	Maior Valor
Reforma Líquidos Bioderivados***	4,28	3,24	n/d	n/d	Menor Custo
	7,68	6,64	n/d	n/d	Valor Médio
	9,16	7,93	n/d	n/d	Maior Valor
Geração Centralizada**	US\$/kg	US\$/kg	US\$/kg	US\$/kg	
Eletrólise - Sistema PEM	4,56	3,48	3,41	3,35	Menor Custo
	6,33	5,25	5,18	5,12	Valor Médio
	7,98	6,64	6,56	6,48	Maior Valor
Biomassa - Gaseificação	2,37	2,12	2,08	n/d	Menor Custo
	2,78	2,53	2,49	n/d	Valor Médio
	4,77	4,27	4,2	n/d	Maior Valor
* Produção H ₂ ≤ 1500 kg/dia					
**Produção H ₂ ≥ 50000 kg/dia					
*** ex.: etanol					
n/d - dado não disponível					

Fonte: adaptado de (MILLER, 2014).

O hidrogênio possui algumas tecnologias de armazenamento conhecidas que são elencadas na tabela 07.

Tabela 07. Tipos de armazenamento de hidrogênio

Categoria	Tipo
Armazenamento de gás	Hidrogênio Comprimido
Armazenamento de líquido	Hidrogênio Líquido
Armazenamento Químico (hidreto metálico)	XH_1 ou 2 (X - Ca, Na, Mg)
Armazenamento Físico (rede organo-metálica)	PCN - rede de coordenação poroso

Fonte: adaptado de (DUTTA, 2014)

Outra etapa da logística do hidrogênio envolve sua distribuição. A meta do Departamento de Energia dos EUA para 2020 é atingir valores de US\$ 2/gge (galão de gasolina equivalente = 3,7854 litro gasolina) (SUTHERLAND, 2013). Alguns fatores afetam o custo da distribuição: o regime de pressão de operação (350 ou 700 bar). 1 bar = 0,9869 atm. O custo dos materiais que irão compor a infraestrutura (tubos, compressores). Mostra-se na Tabela A8 (Apêndice) o custo de distribuição do hidrogênio. Na Tabela A8 pode-se ver que, apesar da tecnologia de 700 bar ser mais eficiente (permite transporte de Hidrogênio líquido) ela é em todos os modais analisados mais cara que a tecnologia de 350 bar. Isto se deve ao fato de que para suportar as operações nestas altas pressões os equipamentos devem ser manufaturados com materiais mais resistentes e caros. Em ambas as tecnologias (350 e 700 bar) o modal do caminhão tanque é aquele que pode atingir a meta de custo num prazo mais curto.

5.3. Panorama tecnológico e econômico das células a combustível em diferentes modais de utilização

5.3.1. Células a Combustível – uso automotivo

Os custos de células a combustível para automóveis caíram mais de 80% desde 2002 (início em US\$ 275/kW para US\$ 49/kW) (MCWHORTER, 2013). Houve um aumento da durabilidade dos sistemas de células a combustível para automóveis (2500 h para mais de 5000 h ou aproximadamente 241400 km). Redução na utilização de metais do grupo da platina para 0,2 g/kW (USDE, 2013). Desde 2005 a redução do uso da platina se deu numa escala de 5 vezes (CURTIN, 2014).

Aumento da autonomia veicular de 402,34 km para 692 km com um único tanque de hidrogênio (USDE, 2013).

Células a combustível, para *ônibus*, já estão com a tecnologia mais amadurecida, pois devido ao seu maior tamanho, o peso e volume dos equipamentos da célula a combustível podem ser maiores, o que reduz os custos. Em uma recente pesquisa de campo se conseguiu uma célula a combustível para ônibus que funcionasse por mais de 10000 h de operação em condições reais de serviço e sem necessidade de manutenção significativa. Existem sistemas comerciais hoje, para ônibus, que garantem 12000 h de serviço ou 5 anos de garantia, para seus sistemas (de ar, combustível, e de gerenciamento de água) (EUDY, 2012). Mas, apesar do aumento da durabilidade e dos custos terem sido reduzidos, estes ainda são altos (fabricação, capital inicial de implementação, operação e manutenção) (EUDY, 2012).

Sistemas de células a combustível do tipo PEM, de capacidade 80kW, para uso em veículos, numa estimativa de produção de 500 mil unidades/ano apresentam, em 2014 (dados dos EUA), custo de US\$ 55/kW (SPENDELOW, 2014). Mostra-se na tabela A9 (Apêndice) a evolução dos custos em função de diversos parâmetros que afetam o custo numa célula a combustível.

Da tabela A9 (Apêndice) pode-se depreender alguns fatos e considerações. Primeiro se trata de um custo baseado em projeções de produção de 500 mil unidades/ano. As estimativas são baseadas na melhor tecnologia disponível, no entanto os componentes e materiais utilizados nas projeções de custo podem variar. Foi utilizado o Nafion (da DuPont) como membrana trocadora de prótons de 25 microns. Os custos estimados na tabela A9 (Apêndice)

precisam ser ajustados a requisitos de durabilidade em condições reais de operação (SPENDELOW, 2014).

Além disso observando os valores do módulo de energia e a energia útil do sistema vê-se que os valores pouco mudaram no período analisado. De fato, entre 2010 e 2014 a eficiência dos módulos de energia ficou entre 54-57% (SPENDELOW, 2014).

Ainda sobre a tabela A9 (Apêndice), um último dado significativo é que, todos os ganhos de eficiência devido a avanços tecnológicos (e que se refletiriam na redução de custo) acabaram sendo perdidos devido ao forte aumento do preço da platina no mercado internacional (36% entre 2013 e 2014). De fato, desde 2009, se observa na tabela A9 (Apêndice) que os ganhos de eficiência foram pequenos, isto se deve ao fato de que desde essa época, a membrana náfion (DuPont) usada nas células é a mesma e, portanto, seu conteúdo de platina ou metais do grupo da platina são parecidos, conforme se observa na tabela A9 (Apêndice). E o náfion e o catalisador de platina ou PGM são os custos mais significativos num módulo de energia de uma célula do tipo PEM. Já existem sistemas mais modernos de catalisadores que envolvem menor uso de platina, no entanto, não existem dados suficientes, de desempenho e confiabilidade, que permitam coloca-los em modelos de simulação de custo (SPENDELOW, 2014).

Na tabela A10 (Apêndice) vê-se a evolução dos custos de uma célula do tipo PEM de 80 kW para sistemas automotivos baseadas em projeções de manufatura de 500 mil unidades/ano. SPENDELOW (2014) menciona que as projeções de custo apresentadas na tabela A10 (Apêndice) são baseadas no modelo estatístico de Monte Carlo com 90% de certeza de que o intervalo de custos se situe entre US\$ 51/kW e US\$ 64/kW. Ainda de acordo com este modelo os maiores custos associados ao módulo de energia são: catalisador (46% do custo total do módulo), placas bipolares (24%), membrana (11%). Os dois primeiros itens usam commodities cujos preços são regulados internacionalmente: catalisador (metal platina), placa bipolar (aço inoxidável), e a membrana depende do Náfion (patente e royalties da DuPont). Ou seja 81% do custo do módulo está associado com materiais de alto custo e regulados pelo mercado internacional ou por patente. Assim o volume de produção *não* afeta estes custos.

Da tabela A10 (Apêndice) vê-se que desde 2010, a redução de custo das células PEM tem sido pouco significativo. Isso se explica pelo fato de que as novas tecnologias em

membrana, componentes e catalisadores, ainda não transpuseram o laboratório e puderam ganhar aplicações comerciais.

Segundo SPENDELOW (2014), o custo de US\$ 55/kW é baseado em componentes de próxima geração que ainda estão sendo desenvolvidos e testados em laboratório. O custo real (dados de 2014) para comercialização em 2016, de células a combustível veiculares, é da ordem de US\$ 280/kW, para uma produção de 20000 unidades/ano. Para 2020 se estima valores entre US\$ 90/kW (com importantes descobertas) ou US\$ 160/kW (com pequenos incrementos de tecnologia como se tem observado). A diferença entre os valores se dá pelo fato de que o valor de US\$ 55/kW é baseada em componentes de mais alto desempenho para os quais já existam dados e avaliações compiladas que permitam sua inclusão num modelo de custo. Já o valor de US\$ 280/kW, leva em conta as melhores tecnologias existentes que já estejam com aplicações comerciais.

Em aplicações nos transportes as células a combustível mais utilizadas são as do tipo PEM. Ainda hoje elas *não são* competitivas com os motores a combustão interna conforme pode ser visto na tabela A11 (Apêndice). As células do tipo PEM são mais caras e possuem menor autonomia que os motores a combustão interna (SHARAF, 2014).

O preço de um carro com motor baseado em células a combustível (FCEV) também é muito maior quando comparado a um carro com motor de combustão interna (ICEV) conforme pode ser observado na tabela A12 (Apêndice). De onde pode-se extrair informações importantes. Primeiro que, mesmo com os subsídios, os veículos movidos a células a combustível são mais caros que os de motor a combustão interna. Segundo, os veículos movidos a células a combustível ainda são mais pesados que os de combustão interna, gerando um custo adicional. No entanto como não emitem poluentes os FCEV não necessitam de sistemas de limpeza de gás, necessários nos carros a combustão interna. A eficiência do motor dos veículos FCEV no entanto são de 30-90% maiores que os dos ICEV (MEKHILEF, 2012). Apesar dos custos maiores os FCEV possuem manutenção mais econômica, são silenciosos, possuem baixa vibração, consomem menos óleo lubrificante (MEKHILEF, 2012).

O Departamento de Energia dos EUA estima o custo alvo do hidrogênio como combustível em veículos automotores em US\$ 7/gge (galão de gasolina equivalente = 3,7854 litros gasolina), valor este que não inclui impostos e que é o valor de entrega na bomba (consumidor final). Este valor torna os veículos movidos a células a combustível competitivos com os veículos movidos a motores de combustão interna (JOSECK, 2014).

Estimativas de custos para diversos tipos de veículos são mostradas na tabela A13 (Apêndice). Interessante notar que os motores movidos a célula a combustível ainda estarão mais caros (80 kW) que os motores a combustão interna. No entanto os veículos híbridos, em 2030, tendem a ter valores um pouco mais próximos dos motores a combustão interna.

Na tabela A14 (Apêndice), por sua vez tem-se os custos de operação estimados para hidrogênio, gasolina e veículos elétricos. Nota-se que apesar de mais eficiente o hidrogênio ainda é mais caro que a gasolina (na média da estimativa para 2030), mas seu uso já é mais vantajoso que o dos motores a combustão. O mesmo se observa nos veículos elétricos (FAYAZ, 2012).

Ao observar questões ambientais como gases do efeito estufa e outras emissões poluidoras, vê-se que a tecnologia do hidrogênio apresenta vantagem ambiental conforme pode ser visto na tabela A15 (Apêndice).

5.3.2. Célula a Combustível – Geração Distribuída

Para aplicações estacionárias, uma possibilidade é aumentar a temperatura de operação das PEMs a fim de melhorar o desempenho do sistema. Também neste caso se poderá aproveitar o calor gerado (CHP – Combined Heat and Power) o que aumenta a eficiência energética global das células a combustível (ALLANE, 2004). Assim aumentar a durabilidade destes sistemas, que operam a altas temperaturas, é fundamental. Sistemas CHP são aqueles que geram calor e energia elétrica a partir da mesma fonte de combustível.

Melhorar os sistemas CHP (Combined Heat and Power) existentes a fim de que possam conseguir recuperar mais calor, aumentando ainda mais a eficiência energética global da célula a combustível (ALLANE, 2004). Existe ainda um sistema conhecido como CCHP (Combined Cooling Heat and Power) ou sistema de terceira geração. Este último consiste em utilizar parte do calor recuperado pelo CHP em processos de resfriamento, oferecendo altas taxas de eficiência na conversão de energia (ELMER, 2015). O sistema CCHP consegue converter até 80% da energia como energia útil. Devido a modularidade e aos vários tipos de células a combustível existente, as aplicações estacionárias têm ganhado destaque, principalmente quando comparada a tecnologia de geradores a combustão. Dados de 2012 mostram aumento de 53% (em relação a 2011) no uso de células a combustível para uso estacionário (ELMER, 2015). Existem ainda diversas vantagens associadas a geração distribuída (gerada pelas aplicações estacionárias). Compara-se na tabela 08 a tecnologia

distribuída e centralizada de distribuição de energia elétrica. Importante notar que os valores apresentados na tabela são valores médios. Pois as perdas na produção de energia podem variar de 30-50% e as perdas de transmissão por sua vez de 6-24% (ELMER, 2015).

Tabela 08. Comparação de eficiência entre geração distribuída e centralizada

100% da Energia da Fonte de Combustível			
Tecnologia de Geração	Geração (perdas)	Transmissão (perdas)	Energia Entregue
Geração Centralizada	58%	6%	36%
Geração Distribuída	15%	0%	85%

Fonte: adaptado de (ELMER, 2015)

Mostra-se na tabela A16 (Apêndice) um comparativo entre as duas tecnologias existentes de dispositivos CHP: motores a combustão interna e células a combustível. Dois detalhes chamam a atenção: a relação Calor/energia elétrica e a maturidade tecnológica. A relação é importante pois quando mais próxima de *um* permite que o calor gerado seja proporcional a energia elétrica gerada. Assim o combustível serve para aquecer/resfriar e também para fornecer eletricidade. A baixa maturidade tecnológica por sua vez, mostra que as células a combustível devem, ainda por um bom tempo, se desenvolver, antes que possam se disseminar com mais intensidade.

Entende-se que a disseminação das células a combustível se dará por meio de duas gerações tecnológicas. A primeira se valerá de matérias primas já consolidadas (por exemplo gás natural) como fontes de hidrogênio. Isto se deve ao aproveitamento da infraestrutura de produção e distribuição já existentes para estes combustíveis e também se deve ao fato de que a produção de hidrogênio ainda ser cara. Esta primeira geração, deve, portanto, incorporar tecnologias como a reforma a vapor. Já a segunda geração tecnológica, se utilizará de hidrogênio (sem processamento interno). Assim o desafio está em produzir e armazenar de forma barata e segura o hidrogênio. E distribuí-lo para os locais de consumo (ELMER, 2015).

Mas as aplicações estacionárias possuem requisito médio de operação de 40000 h (o que significa aproximadamente 10 anos de operação de maneira regular ou intermitente). As

SOFC, devido ao seu regime de altas temperaturas, não suportam um regime de constantes paradas, tendo sido registrado na literatura testes de até 10000 h de operação (ELMER, 2015). Já para as células do tipo PEM já existem dados de campo, com operação de 50000 h e até 4000 paradas (ciclos). Já os motores a combustão operam facilmente 20000-50000 h e com possibilidade grande de paradas (ciclo) (ELMER, 2015). Isso mostra que as células PEM já estão alcançando os motores de combustão interna no requisito confiabilidade e durabilidade. Já as SOFC estão um pouco atrás. Outro aspecto considerável é o custo da energia gerada. O Departamento de Energia dos EUA indica um objetivo de custo de US\$ 1200/kW para 2015 e US\$ 1000/kW para 2020 (ELMER, 2015; STAFFELL, 2013), isto baseado em sistemas CHP de 2kW alimentados por gás natural (e, portanto, com reformador acoplado). Mas comercialmente os valores são muito maiores. Mostra-se na tabela A17 (Apêndice) a diferença entre os valores pretendidos e os comercializados. Alguns autores sugerem que os valores mais realistas para os dados de 2020 estariam ao redor de US\$ 3000-5000/kW (ELMER, 2015; STAFFELL, 2013). Em 2015 os custos de sistemas estacionários baseados em motores a combustão estão entre US\$ 340-1600/kW. O preço alvo estimado pelo governo japonês para o período 2020-2030 é de US\$ 3500/kW, no entanto estes valores consideram vendas de 80 milhões de unidades (cerca de 10% de penetração no mercado de fontes estacionárias da Europa, Japão, EUA e Coréia do Sul) (STAFFELL, 2013). Com isto pode-se observar que mesmo o valor mais conservador apresentado pelo governo japonês (US\$ 3500/kW entre 2020-2030), será difícil de ser alcançado, assim o valor alvo dos EUA (US\$ 1000/kW para 2020) é praticamente inatingível, dado o cenário e o ritmo de evolução tecnológica atual, mas nada impede é claro que grandes saltos tecnológicos ocorram e permitam reduzir significativamente os preços (STAFFELL, 2013).

Dados de 2013 mostram que células a combustível estacionárias venderam 24000 unidades no ano de 2012 totalizando 125 MW de capacidade energética (LEWIS, 2014). Após o acidente de Fukushima em 2011, o governo do Japão intensificou esforços para estimular a geração de energia distribuída, utilizando-se de um programa conhecido como EneFarm o Japão pretende instalar até 2020 1,4 milhão de unidades de células a combustível para uso doméstico (micro-CHP) no país (LEWIS, 2014). O Japão é um dos países com maior tradição em pesquisas de fontes alternativas de energia, tendo seu início em 1974 com o projeto Sunshine (DUTTA, 2014).

O programa EneFarm (marca de um projeto japonês de células micro-CHP do tipo PEM) possuem sistemas que oferecem saída de energia elétrica de 0,7~1 kW + 0,9~1,4kW de energia térmica e possuem um pacote com processador de combustível (gás natural, gás liquefeito petróleo ou querosene) e um trocador de calor para a água quente. Sua durabilidade é de 50000 h (10 anos). No período de 2009-2012 foram vendidas mais de 25000 unidades para uso doméstico com subsídios do governo de US\$ 9500-12500 por unidade. O governo japonês gastou mais de US\$ 300 milhões de subsídios e dados de 2013 indicam mais um gasto de US\$ 85 milhões (STAFFEL, 2013).

Dados de 2014 mostram que a faixa de preços de geração de energia das unidades estacionárias das células a combustível está entre US\$ 3000-21000/kW. Com incentivos e subsídios os valores caem para valores entre US\$ 1000-19000/kW. Importante destacar que a geração de maior custo está justamente nas unidades menores (LEWIS, 2014). Na tabela A18 (Apêndice) mostra-se a evolução tecnológica e de custos obtida por duas empresas japonesas e onde pode ser observado que a redução de custos obtida não foi conseguida por aumento de produção e sim por melhorias tecnológicas.

Dados de 2011 indicam que foram instalados cerca de 20000 sistemas CHP de capacidade inferiores a 10 kW. Dessas unidades 85% utilizam tecnologia PEM e as demais praticamente utilizam o sistema SOFC (STAFFEL, 2013). Os países que lideram as pesquisas e a comercialização de micro-CHP para fins domésticos são o Japão, Coreia do Sul e Alemanha. Já os EUA lideram a pesquisa de dispositivos de maior escala e os voltados para uso automotivo (STAFFEL, 2013).

Na geração distribuída as células a combustível se destacam quando acopladas a tecnologia CHP (CHP – Combined Heat and Power). Na tabela A19 (Apêndice) há uma comparação entre as diversas tecnologias de geração estacionária de energia.

Da tabela A19 (Apêndice) percebe-se que as tecnologias de células a combustível já podem ser competitivas frente a outras opções de fornecimento de energia estacionária.

5.3.3. Células a Combustível – Aplicações Portáteis

As células a combustível também possuem aplicações portáteis onde se destacam competitivamente face a outras tecnologias existentes (SHARAF, 2014) conforme observado na tabela 09.

Tabela 09: Comparação entre Tecnologias de energia portáteis

Tecnologia de energia portátil	Densidade de energia (Wh/kg)	Custo de capital (US\$/kWh)
Célula a combustível a metanol direto	100-200	200
Bateria chumbo-ácido	150-300	70
Bateria de níquel-cádmio	150-200	300
Bateria de níquel-hidreto metálico	200-300	300-500
Bateria de ion-lítio	200-400	200-700
Ultracapacitor	500-10000	20000

Fonte: adaptado de (SHARAF, 2014)

5.3.4. Células a Combustível a Etanol Direto (DEFC)

Para o Brasil, que dispõe de amplo fornecimento de etanol ainda é reduzida a literatura existente sobre células DEFC (células a combustível a etanol direto), pois as pesquisas se basearam nas membranas ácidas que possuem baixa cinética de oxidação (como o Náfion). Entretanto pesquisas com membranas alcalinas trocadoras de ânions que possibilitaram aumentar a cinética de oxidação do etanol tendem a mudar esta realidade. Uma vantagem deste sistema é que ele poderá operar sem uso de platina e com isso reduzir significativamente os custos (HO, 2014). Os catalisadores utilizados são a base de Pd e Ni em estruturas de carbono (HO, 2014).

Para as células a combustível alimentadas diretamente com etanol dois tipos de células a combustível tem sido mais estudadas: a PEMFC – se utiliza de uma membrana trocadora de prótons (Nafion) e com ou sem uso de catalisador de platina. As PEMFCs alimentadas com etanol têm apresentado baixos rendimentos atingindo até 110 mW/cm^2 e utilizando até 4mg de Pt. Já as AEMFCs (células a combustível com membranas trocadoras de ânions), se utilizam de uma membrana que possui custo mais barato em relação ao Náfion (PEMFCs) e apresentam melhor desempenho, apresentando densidade de energia da ordem de 185 mW/cm^2 . O catalisador neste caso é uma liga Au-Pd suportada em nanotubos de carbono. Por outro lado, a utilização de novos catalisadores metálicos (Ag, Ni, Pd) possibilita a redução de

custos (BROUZGOU, 2013). Numa célula de combustível AA (alcalina e ácida) alimentada por etanol foi registrado densidade de energia de 360 mW/cm^2 (BROUZGOU, 2013).

As células AFCs (células a combustível alcalinas) tem despertado o interesse e pesquisa nos últimos anos devido a redução mais favorável do oxigênio e a boa oxidação do combustível para uma variedade de metais catalisadores não nobres (Fe, Co, Ni). Mas as células AFCs apresentam problemas de carbonatação do eletrólito alcalino pelo CO_2 , gerado na oxidação do combustível. Uma solução para esse problema é a utilização de membranas alcalinas trocadoras de ânions. Estas membranas conduzem OH^- . Assim células AFCs com membranas trocadoras de ânions tem mostrado diversas vantagens: não precipita carbonatos e não encharca o eletrólito pois há melhor gerenciamento da água, bem como a corrosão é reduzida (BROUZGOU, 2013). As células alimentadas por etanol também se beneficiam das membranas trocadoras de ânions: a reação de redução do oxigênio é mais rápida e com isso reduz a queda de potencial do eletrodo, permite o uso de metais catalisadores não preciosos. Além disso a oxidação direta do etanol elimina o aparato caro de reforma a vapor para a produção de hidrogênio. O etanol pode ser obtido de fontes renováveis (fermentação da biomassa) é capaz de gerar $6,3 \text{ kWh/L}$ (BROUZGOU, 2013). Atualmente um grande desafio para as células DEFCs é operar a um regime superior a 100°C e com isso facilitar a quebra da ligação C-C do etanol. Na oxidação completa do etanol gera-se potencialmente 12 elétrons por molécula o que ainda não foi alcançado nas células a combustível que se utilizam de membranas trocadoras de ânions. A oxidação atinge etapas intermediárias gerando produtos como acetaldeído ou ácido acético. Um recente catalizador ternário baseado em Pt-Rh- SnO_2 suportada em carbono consegue oxidar completamente o etanol em meio ácido. Já em meio básico tem se conseguido eficientes oxidações (8-10 elétrons) por molécula de etanol com um catalisador de Ru-Ni ou Co ou Fe (BROUZGOU, 2013). As células AEM-DEMFCs tem perda de desempenho muito associada a degradação do anodo. A perda de desempenho pela membrana e pelo catodo são menores (BROUZGOU, 2013).

Os custos da energia das células a combustível para automóveis reduziram 82% entre 2002 (US\$ 275/kW) e 2011 (US\$ 49/kW). Os custos de todos os componentes das células a combustível (exceto o módulo de energia) está em 55% do total, sendo os 45% restantes devidos ao módulo. Destes 45%, 15% são devidos ao catalisador de Platina. No caso das PEMFCs deve ser incluído o alto custo da membrana Nafion. Além disso as PEMFCs não oxidam totalmente o etanol liberando 2-4 elétrons (dos 12 potenciais) por molécula reduzindo

a eficiência Faradaica. Apresenta perdas devida a baixa velocidade de oxidação no anodo bem como pela migração do etanol para o catodo através da membrana (BROUZGOU, 2013).

As células AEM-DEFCs ainda não promovem a oxidação completa do etanol (liberando seus 12 elétrons por molécula do álcool). A atividade e durabilidade do catalisador também precisa ser aumentada, bem como melhorar a atividade catalítica de metais que não seja a Pt. As membranas AEMs precisam melhorar sua condutividade iônica e estabilidade (química, térmica e mecânica). O transporte de água e seu gerenciamento deve ser eficaz tanto nas PEM quanto nas AEM-DEFCs, pois o excesso de água atravessando a membrana gera o encharque do catodo ou quando passa pouca água (causa perda na atividade). A fuga de etanol pela membrana reduz o desempenho. O interesse da pesquisa das células AEM-DEFCs deve continuar, mesmo porque, ainda não existem membranas confiáveis e competitivas economicamente em relação ao Nafion (PEM) (BROUZGOU, 2013).

A redução do uso de platina tem por meta valores menores de $150 \mu\text{g Pt/cm}^2$ de membrana. Isso equivale a usar no máximo 15 g Pt para um veículo que consuma 75 kW.

Os desafios das células DEFCs está em encontrar catalisador que quebre a ligação C-C de modo a obter o maior rendimento de elétrons possível por molécula bem como remover os produtos intermediários de oxidação gerados. Também usar menores quantidades de catalisadores metálicos nobres. Quando se usa as membranas AEM temos a eliminação da carbonatação das células alcalinas (pelo CO_2). Além disso em meio alcalino se reduz processos corrosivos e se barateia o uso dos materiais usados na construção das células. Estas membranas ainda favorecem a rapidez na reação de redução do oxigênio, reduz quedas no potencial, bem como aumenta a eficiência eletroquímica. O gerenciamento de água também é facilitado pois o que é gerado no anodo é consumido no catodo. Finalmente a migração de etanol pela membrana é menor nas células AEM-DEFCs o que melhora o desempenho do sistema (BROUZGOU, 2013).

5.4. Desafios Tecnológicos e Econômicos em Células a Combustível

Ao se disseminar a tecnologia das células a combustível, fomentar-se-á inovações, que irão dar nova direção ao crescimento econômico do país o que permitirá a geração de mais empregos, com a promoção de uma economia mais limpa, eficiente, confiável, e menos dependente de fontes fósseis poluidoras e riscos geopolíticos. Contribui-se assim com a segurança energética do país e ao esforço global de redução das emissões de CO₂ (AIE, 2010).

Células a Combustível são muito eficientes em usar variadas fontes de energia, ao proporcionar baixas emissões de poluentes quando comparada a outras tecnologias convencionais (LINARDI, 2010).

Para que as células a combustível tornem-se competitivas as pesquisas em tecnologia devem focar na redução do seu custo de manufatura, no custo de produção do hidrogênio, bem como no custo de geração de energia útil (LINARDI, 2010). Além disso, a durabilidade e desempenho devem ser melhoradas. Redução de tamanho e peso também devem ser alcançados para ampliar e difundir a utilização comercial, residencial e industrial desses dispositivos.

Características de desempenho como o aumento da densidade de corrente, a ampliação das faixas de operação em condições ótimas do dispositivo (temperaturas, umidade, presença de contaminantes tais como CO) devem ser melhoradas, bem como a eficiência dos dispositivos estacionários (WENDT, 2002; VILLULLAS, 2000).

Os sistemas de armazenamento devem se tornar mais compactos, leves, de baixo custo e seguros para o uso do hidrogênio. Em veículos, deve-se trabalhar para o aumento da autonomia, que hoje se encontra ao redor de 482,8 km, sem perda de desempenho ou de espaço útil (NA, 2008).

Pesquisa e desenvolvimento de tecnologias produtivas, de materiais e de processos são necessários para que se obtenha ganhos de produtividade e redução dos custos. Ao pesquisar e melhorar os materiais eleva-se a confiabilidade e a durabilidade das células a combustível e com isso eleva-se a vida útil dos materiais e catalisadores, bem como diminuir os problemas com gerenciamento (de água, combustível, oxidante, fluxo de massa, fluxo de calor), que dependem de modo significativo da tecnologia de construção (WANG, 2015). Mostra-se na tabela A20 (Apêndice) a associação entre os principais problemas técnicos enfrentados nos módulos de energia e que são fatores importantes em manter baixa a

durabilidade e confiabilidade dos sistemas de células a combustível. Pode-se ver na tabela A20 (Apêndice) que os principais problemas dos módulos de energia estão relacionados a materiais, química, água e pontos quentes (hotspot), que em síntese é o gerenciamento de fluxos nos módulos de energia.

As células a combustível precisam rapidamente deixar a fase de trabalho em laboratórios e evoluírem para a fase de operação em condições reais. Melhorar a tecnologia de construção e de gerenciamento de fluxos (água, combustível, oxidante/ar, calor) é uma forma de levar a tecnologia a operar em condições reais pois aumenta a durabilidade, a confiabilidade, reduz os custos, e que são problemas que atrasam a disseminação da tecnologia de células a combustível (WANG, 2015) como mostrado na tabela A20 (Apêndice). Fluxos mal distribuídos em módulos de energia são os principais responsáveis pela degradação e o baixo desempenho alcançado pela tecnologia de células a combustível. No entanto sistemas de gerenciamento de fluxo agregam mais custos ao sistema e, por isso, não foram muito pesquisados no universo científico das células a combustível (WANG, 2015).

Os focos das pesquisas avançadas devem ser em materiais e técnicas de manufatura de modo a reduzir custos, aumentar a longevidade e incrementar a confiabilidade dos sistemas baseados em células a combustível (ALDABÓ, 2004). Parte dessa iniciativa envolve o entendimento dos mecanismos de falha e desenvolvimento de estratégias de correção dos seus efeitos. Para se atingir estes objetivos devem ser desenvolvidos testes de degradação e stress acelerado de materiais a fim de que seja possível fazer projeções seguras de durabilidade dos materiais utilizados (WANG, 2015).

Também são necessárias pesquisas para melhorar o desempenho de componentes como: compressores, processadores de combustível, sistemas eficientes de gerenciamento de aquecimento e vapor, sensores mais acurados (MCWHORTER, 2013).

Membranas são componentes críticos das células a combustível e por isso devem operar em grande faixa de temperatura e umidade. As membranas atuais operam em faixas reduzidas de umidade o que faz com que sejam necessários sistemas de fornecimento de umidade adicional. Isto aumenta a complexidade do dispositivo e também seus custos de fabricação, operação e manutenção.

O bom gerenciamento e o transporte de massa dentro da célula a combustível é fundamental. Principalmente da água obtida na oxidação do hidrogênio, pois ao acumular

encharca a membrana trocadora de prótons e diminui a troca gasosa, bem como o transporte iônico.

Além disso, em condições ambientais de temperatura negativa pode haver problemas de congelamento (ALDABÓ, 2004).

Também são necessários aprofundar a pesquisa de novos materiais com maior resistência a corrosão, a tecnologia de construção e projeto para os eletrólitos e seus suportes, catalisadores e seus suportes e, meios mais efetivos para a difusão gasosa, anodos para células a combustível que operem com combustíveis que não o hidrogênio.

Muito importante identificar e desenvolver eletrólitos poliméricos que aumentem a condutividade, em especial em condições de alta umidade e temperatura, serem de baixo custo e, devem possuir maior durabilidade química, mecânica e térmica (WENDT, 2000).

Catalisadores que possam operar com pequena quantidade de metais preciosos (tais como a platina), ou mesmo a utilização de outros metais não preciosos como catalisadores. Aumentar a atividade e durabilidade/estabilidade dos catalisadores empregados; aumentar a tolerância a impurezas geradas no processo ou oriundas do combustível utilizado. Células a Combustível do tipo PEM e PAFCs utilizam grandes quantidades de platinas e outros metais preciosos. Para aplicações estacionárias que envolvem grandes módulos isto é particularmente importante, pois os catalisadores metálicos podem representar de 4-6% dos custos de instalação destes dispositivos (REMICK, 2010). Portanto o desenvolvimento de estratégias de redução e/ou substituição destes metais é fundamental na redução de custos.

Criar catalisadores que *não utilizem* a platina nem metais de seu grupo periódico (PGM-free: livre de platina e seu grupo metálico).

Melhorar a eficiência cinética dos catodos utilizados na oxidação do hidrogênio (que causam quedas de potencial) (LINARDI, 2010). Estas quedas no potencial podem representar, nas melhores condições tecnológicas atuais, perdas de até 33% sobre o valor teórico possível disponível no combustível; diminuir a dissolução e degradação dos catalisadores em condições de baixa e alta temperatura respectivamente também são objetivos que podem melhorar o desempenho e reduzir os custos.

Desenvolver mecanismos de processamento de baixo custo das matérias prima que servirão de fonte de hidrogênio (FAPESP, 2014). Processos de limpeza dos gases utilizados ou gerados devem ser mais eficientes e baratos a fim de permitir flexibilidade de combustíveis e o uso de fontes renováveis tais como, por exemplo, o biogás.

As células a combustível para serem competitivas nos sistemas de transporte devem ter eficiência parecida ou superior aos motores a combustão interna. Assim, hoje, um motor a combustão possui durabilidade e confiabilidade de operação de 5000 h ou 241400 km com perda de até 10% de desempenho no fim do ciclo de vida útil e opera em condições de temperatura ambiente de - 40°C a + 40°C. Hoje as células a combustível operam com confiabilidade por 2500 h (WIPKE, 2011).

As baterias convencionais que são dispositivos de fornecimento portátil de energia, como é sabido, apresentam sérios riscos ambientais e a saúde, devido a presença de metais pesados (VILLULLAS, 2002). Assim as células a combustível com aplicações portáteis (e que podem competir economicamente com as baterias) devem ter aumentada sua durabilidade e reduzir fortemente seus custos; e também devem ser usados combustíveis mais amigáveis, baratos e difundidos e de baixo risco tais como o etanol.

Para as células PEM o esforço está em minimizar o uso de metais preciosos (Pt), aumentar a durabilidade dos componentes, gerenciar o transporte de massa dentro da célula, aumentar a faixa de temperatura de operação das membranas e sua durabilidade (AYERS, 2013).

Já as células alcalinas, possuem a vantagem de não precisar de metais preciosos como catalisadores. No entanto os desafios a serem enfrentados envolvem aumentar a tolerância ao dióxido de carbono (que envenena o catalisador) (LINARDI, 2010), aumentar a condutividade e durabilidade da membrana utilizada, aumentar a faixa da temperatura de operação, aumentar a densidade de carga gerada e a eficiência do anodo (eletrocatalise).

As células a combustível de Ácido Fosfórico, Óxido Sólido e Carbonato Fundido, são dispositivos que operam a médias (Acido Fosfórico) ou altas temperaturas (Óxido Sólido e Carbonato Fundido), por esse motivo são indicadas para aplicações de longos períodos sem interrupção, e poucos ciclos de parada-reinício (ALDABÓ, 2004). E por operarem temperaturas elevadas podem ser combinadas com bom rendimento em sistemas de reaproveitamento de calor (CHP – Combined Heat and Power) (ALLANE, 2004). No caso das células de ácido fosfórico, um desafio consiste em pesquisas que ajudem a diminuir a adsorção de ânions no catodo, reduzir o custo e aumentar a durabilidade dos catalisadores e dos materiais de suporte. Para as células a carbonato fundido é preciso reduzir as perdas do eletrólito, prevenir mudanças na estrutura do suporte do eletrólito (falhas), desenvolver materiais para o catodo mais resistentes. Já as células de óxido sólido as pesquisas devem

focar materiais mais resistentes para o empilhamento do eletrólito devido aos repetidos ciclos termais a que o dispositivo é submetido (NETL, 2004). Questões relativas à compatibilidade e reatividade entre o catalisador/empilhamento e os componentes das células em altas temperaturas de trabalho também devem ser estudadas.

Estabelecer uma linha de base, métricas e parâmetros de desempenho, eficiência e confiabilidade das tecnologias associadas ao hidrogênio de maneira a prover os desenvolvedores e a indústria em geral de realimentação para o desenvolvimento e atuação no mercado reduzindo custos de oportunidade e aproveitando sinergias. Uma maneira de fazer isto é a criação de programas de certificação. Algo parecido que ocorre no Brasil é o Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) através do selo Procel para equipamentos energeticamente eficientes (ELETROBRÁS, 2014).

Atualmente, o capital e demais custos de instalação das células a combustível (devido ao fato de ser um mercado ainda muito jovem e restrito) chega a ser de duas a três vezes maiores que o custo de implantação de outras tecnologias já existentes (DARROW, 2014; GREENE, 2011).

Um grande aporte de investimento (de risco) precisa ser feito para o desenvolvimento e expansão da capacidade de geração do hidrogênio e para o desenvolvimento das tecnologias necessárias as células a combustível.

Mais investimentos de alto risco serão necessários no desenvolvimento do resto da infraestrutura de entrega e distribuição do hidrogênio (CARTER, 2013). Os investimentos são considerados de risco, pois neste momento não há demanda de hidrogênio que o justifique.

Códigos e padrões técnicos e legais devem ser criados e harmonizados as leis nacionais e internacionais dos países interessados em utilizar esta nova tecnologia de forma segura e poder contratar seguros que possam cobrir os riscos do empreendimento (CARTER, 2013).

Existe um medo e falta de compreensão por parte da população com relação à tecnologia do hidrogênio (ALDABÓ, 2004). Deve-se começar com medidas educativas em público chave, que servirão de multiplicadores de uma nova visão: academia (universidade, professores, estudantes), legisladores, empresários, potenciais usuários, comunidades locais (demonstrações e familiarização), profissionais de emergência (defesa civil, bombeiros, policia), escolas (familiarizar professores, e as crianças e adolescentes sobre a tecnologia e seus benefícios) (ALDABÓ, 2004).

Redução de custos e conquista de mercados que podem adotar a tecnologia das células a combustível. Isto se reveste de suma importância uma vez que conquistar mercados gera economia de escala que por sua vez ajuda a reduzir os custos, que acaba gerando novas oportunidades de mercado, num ciclo virtuoso (ALDABÓ, 2004).

Implementar a mudança da fonte propulsora dos veículos: de motores a combustão para Células a combustível do tipo PEM (CARTER, 2013).

Acompanhar e medir o estado corrente da tecnologia de células a combustível tendo como parâmetros custo e desempenho: dos componentes e da geração de energia. A fim de subsidiar novos investimentos e direcionar as pesquisas com o fim de superar os gargalos tecnológicos, econômicos e assim implementar e difundir a tecnologia (SHARAF, 2014).

Aumentar a receptividade do hidrogênio e das tecnologias de células a combustível como parte integrante do esforço mundial de criação de um portfólio de energia limpa, eficiente e renovável. Este esforço deve ter âmbito nas três esferas de governo e também através de cooperação internacional entre países (trocando tecnologias, executando pesquisas conjuntas, implementando regras e padrões internacionais de maneira a criar uma governança que legitime e dissemine a tecnologia em escala mundial). Fomentar investimentos públicos e privados ou PPPs (parcerias público-privadas) (CGEE, 2010).

Diminuir os chamados custos intangíveis que são aqueles associados a seguros, permissões de uso, padronização de legislação e de tecnologias e que dependem fundamentalmente de ações de governo. Estes custos também são conhecidos como desafios não tecnológicos (CARTER, 2013).

Se valer da Educação e treinamentos com mecanismos genuínos e eficientes de transformação do mercado, permitindo em médio prazo a aceitação e adoção da economia do hidrogênio em geral e das células a combustível em particular. Instrumentos possíveis de uso educacional e informativo envolvem fundamentalmente a *internet*. A fim de atingir um público mais amplo, iniciativas como teleconferências, jornais e periódicos eletrônicos, ferramentas de uso virtual, Webpages, base de dados virtuais, documentos eletrônicos. Materiais educativos off-lines (livros, revistas, DVDs) também podem ter papel relevante. Eventos técnicos, premiações, estudo de casos, relatórios técnicos e de mercado também são instrumentos que devem ser utilizados. Assim prover informação técnica acurada, objetiva, fornecida por fontes confiáveis pode diminuir a desinformação reduzindo falsas percepções e

umentando o nível de conforto e segurança no uso destas novas tecnologias de energia (CARTER, 2013; CURTIN, 2013).

Aumentar o acesso e a visibilidade das informações técnicas disponíveis sobre o hidrogênio e suas tecnologias para uma audiência maior e não familiarizada, mantendo a acurácia científica, de maneira clara e sucinta. Para isso uma alternativa é aproveitar o interesse crescente da população por fontes renováveis de energia e a atuação de ONGs ambientalistas (CARTER, 2013; CURTIN, 2013).

Coleta de dados de desempenho e desenvolvimento tecnológico com atualização constante irão permitir que tanto o governo quanto a iniciativa privada formulem projetos e investimentos que ampliarão a disseminação da tecnologia resultando em eficiência energética, redução de impacto ambiental, aumento de confiabilidade e produtividade (CHUM, 2002). Dentro dos estudos possíveis se destacam iniciativas como: relatórios de mercado, estudo de casos, estudo de impactos econômicos e financeiros, compendio de normas e da tecnologia existente. Estes elementos também ajudarão a mitigar o risco comercial dos agentes envolvidos no desenvolvimento e difusão da tecnologia (CARTER, 2013; CURTIN, 2013).

Os governos deverão coordenar os esforços das partes interessadas a fim de assegurar eficiência e eficácia dos projetos e pesquisas tecnológicas, uso adequado dos investimentos. Isto também pode ser feito em parcerias com outros atores, desde que o resultado seja atingido. Conjugação esforços, de educação, da indústria do hidrogênio e de células a combustível, parcerias internacionais, ONGs de atuação em energia e meio ambiente. Desde 1996, somente a Europa, EUA (DOE – Departamento de Energia) e o Japão (projeto EneFarm) investiram um montante de mais de US\$ 22 bilhões (WANG, 2015) em pesquisas relacionadas as células a combustível. Apesar deste montante robusto de investimentos, os avanços têm sido incrementais, de modo que ainda a tecnologia sofre com alto custo, baixa durabilidade e confiabilidade. Outra iniciativa, de cooperação internacional, no desenvolvimento e pesquisa de tecnologias para células a combustível é a IPHE (International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy) – “Parceria Internacional para o hidrogênio e as células a combustível na Economia. Fundada em 2003 a IPHE, que tem no *Brasil* um dos países membros, tem por função servir de fórum para discussão e implementação de políticas, uniformização de códigos e padrões técnicos, e outras ações que

permitam uma transição custo efetiva para uma economia baseada no hidrogênio (IPHE, 2014).

Treinar e desenvolver profissionais aptos a atender ao mercado crescente do hidrogênio. Certificações profissionais, cursos, workshops, seminários, treinamentos presenciais e on-line, videoconferências, são todas ferramentas aptas a exercerem esse papel.

Ao se mostrar as pesquisas, desenvolvimento das tecnologias associadas à Economia do Hidrogênio em geral, e as Células a Combustível, em particular, nós conseguimos mostrar quais são os desafios tecnológicos, econômicos e institucionais que impedem a comercialização desta tecnologia em larga escala. A economia do hidrogênio possui alguns desafios tecnológicos, para os quais, soluções tecnológicas, estão previstas para além de 2030 (WANG, 2015).

Três fatores essenciais devem ser levados em consideração pelos países quando formularem estratégias de produção, distribuição e uso de energia: segurança energética, qualidade ambiental e desenvolvimento econômico (produtividade) (AIE, 2010).

Segurança Energética. O Brasil não é autossuficiente em derivados do petróleo (ex: gasolina), pois não tem refinarias suficientes (ANEEL, 2008). Assim parte de nossa gasolina é importada. O desenvolvimento, portanto, de tecnologia de células a combustível, no Brasil, pode favorecer um mercado de carros elétricos alimentados por células a combustível o que nos permitiria, em médio prazo, encerrar esta dependência de importação de derivados do petróleo (CGEE, 2010; MACEDO, 2003). Também aumentaria a qualidade ambiental uma vez que reduziríamos a emissão de gases de efeito estufa e de material particulado tais como SO_x e NO_x . Finalmente aumentaríamos a competitividade de nossa economia ao agregar novas tecnologias (ALDABÓ, 2004).

Existem desafios que são chaves para a disseminação e comercialização das células a combustível. Precisa-se identificar onde estão as maiores possibilidades de uso dessa tecnologia. Aplicações de células a combustível como energia estacionária (geração distribuída) devido a sua alta eficiência e potencial de redução de emissões de poluentes é a aplicação mais visível (ALDABÓ, 2004). Outra grande possibilidade de aplicação é a substituição dos motores de combustão interna dos automóveis por células a combustível (principalmente as do tipo PEM) (AYERS, 2013), o que aumenta a sua eficiência e ajuda a reduzir emissões, além de diminuir o uso de combustíveis fósseis. Os esforços científicos então se dirigem no desenvolvimento de materiais, componentes e sistemas que permitam que

estes dispositivos atinjam patamares econômicos de custo, segurança e durabilidade/autonomia.

As células a combustível serão alimentadas com hidrogênio. Esta alimentação se dará com produção de hidrogênio “a bordo”, ou seja, gerado no próprio dispositivo, e possivelmente alimentado, com fontes de biomassa, ou ainda alimentado com hidrogênio gerado externamente a célula de combustível. Como está claro, nesta segunda possibilidade, uma estrutura paralela de produção, armazenamento e distribuição em larga escala, de hidrogênio deve ser criada (CCAT, 2008). Portanto os esforços de desenvolvimento e disseminação das células a combustível *corre em paralelo* ao desenvolvimento de uma infraestrutura/economia para o hidrogênio. Existe ainda, porém pouco difundida, a possibilidade de aplicação da tecnologia de células a combustível para energizar pequenos equipamentos (bombas de uso doméstico, por exemplo) ou mesmo eletrônicos domésticos com sistemas de energia de alimentação portátil baseados em tecnologia de células a combustível (alimentadas, por exemplo, por etanol), ou ainda geração distribuída (NEGRO, 2004).

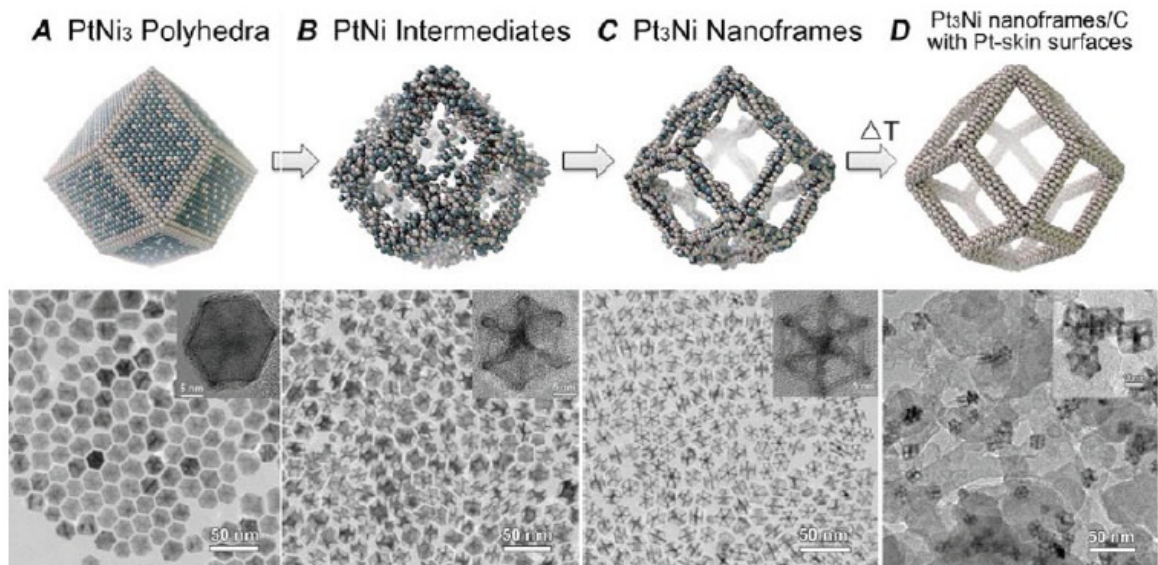
Assim fica claro que a melhor abordagem hoje para o desenvolvimento e disseminação das células a combustível envolve o desenvolvimento de materiais mais eficientes e duráveis com baixo custo de produção (ALDABÓ 2004; LINARDI, 2010) e que permitam que um empilhamento do eletrólito (módulo de energia) seja produzido economicamente e atue mais eficientemente.

Células a combustível para aplicações em transporte possuem custo de geração de energia de US\$ 55/kW (dados de 2013) (USDE, 2013). Este custo representa uma redução de 50% em relação aos dados de 2006. Boa parte desta redução se deve ao menor uso dos metais catalisadores (Platina e seu grupo) de oxidação e a maior rendimento na densidade de energia graças a módulos de energia mais eficientes. É esperado um objetivo de custo de US\$ 40/kW para 2020 (USDE, 2013) o que permitiria que a tecnologia das Células a Combustível fique competitiva com outras formas (motores a combustão por exemplo) já bem estabelecidas.

Os principais esforços estão dirigidos aos catalisadores metálicos, de maneira a reduzir a quantidade utilizada e aumentar sua durabilidade (vida útil). Entre 2011 e 2012 houve redução de 20% no uso destes catalisadores metálicos permitindo uma geração de 6 kW/g de metal. O objetivo a ser alcançado é 8 kW/g (em 2020) (USDE, 2013) permitindo assim tornar a tecnologia mais barata e, portanto, competitiva em relação as outras existentes. Em 2014,

uma equipe de pesquisadores da Universidade de Berkeley (Califórnia, EUA), Laboratório Nacional de Argonne (Illinois, EUA), Laboratório Nacional de Oak Ridge (Tennessee, EUA) junto com alguns outros cientistas de universidades chinesas e outros países sintetizaram uma liga de Platina-Níquel em uma nano estrutura que aumenta a atividade catalítica em mais de 30 vezes em relação aos catalisadores de Platina numa estrutura de carbono (CHEN, 2014).

Figura 06: Novo catalisador sintetizado em 2014, baseado em nanoestrutura de uma liga Pt-Ni com desempenho catalítico superior a 30 vezes aos catalisadores atuais.



Fonte: CHEN, 2014

Descrever os estágios alcançados nos desafios tecnológicos (para células a combustível e produção de hidrogênio, além de sua distribuição e armazenamento), institucionais (códigos, padrões), econômicos (custos, viabilidade), sociais (disseminação, aceitação da tecnologia). Todo esse arcabouço permite desenhar o panorama da tecnologia atualmente. E o mais importante: ajudar a disseminá-la.

Mostrar os benefícios ambientais associados à tecnologia de células a combustível. Por exemplo, as emissões de gases de efeito estufa, gerados por quilometro, em veículos movidos a células a combustível, está em 35 g de CO₂eq. Veículos automotivos movidos a combustão de gasolina liberam 430 g de CO₂eq por quilometro (NGUYEN, 2013).

Um aspecto fundamental, mostrado pela experiência dos EUA, com células a combustível mostra que o governo é o grande indutor do sucesso de mercado para tecnologias emergentes tais como as células a combustível (USDE, 2009). Assim, devido a restrições orçamentárias no Brasil, uma maneira de conseguir fundos, é acoplar as células a combustível com outras tecnologias já bem estabelecidas e que possuem canais já estabelecidos de financiamento público e ampla rede de distribuição, capturando sinergias. Exemplo clássico disto são as células a combustível por etanol direto (Direct-ethanol fuel cells ou DEFCs).

Outra iniciativa existente nos EUA e que se poderia replicar no Brasil é o estabelecimento de parceria público-privada focada no avanço da infraestrutura do sistema do hidrogênio, iniciativa conhecida como H2USA, permitindo o acesso mais barato e facilitado ao combustível. Fazem parte desta parceria empresas automobilísticas, agências governamentais, fornecedores de hidrogênio, indústrias consumidoras de hidrogênio, fornecedores de equipamentos para setor energético, empresas químicas, entidades de padronização, universidades, laboratórios (H2USA, 2014). O objetivo é coordenar pesquisas e esforços para desenvolver soluções de baixo custo, implementando e disseminando a infraestrutura do hidrogênio. A iniciativa é conhecida como *H₂USA Partnership* (H2USA, 2014).

A principal contribuição deste trabalho e que representa um aspecto fundamental é separar as células a combustível enquanto tecnologia, da economia do hidrogênio. As dificuldades da implantação da segunda, não afetam, necessariamente a primeira. Basta ver que existem tecnologias de células a combustível que independem de hidrogênio. As SOFC por exemplo, podem ser alimentadas diretamente com gás natural (sem reforma), e as células do tipo DEFC (alimentadas por etanol) (WANG, 2015). Outro aspecto importante: custo, confiabilidade e durabilidade das células a combustível são questões de cunho operacional da tecnologia das células a combustível que não envolvem diretamente a economia do hidrogênio. Além disso, como boa parte do hidrogênio produzido vem de fontes fósseis, ele não poder ser considerado renovável (WANG, 2015).

Outro estudo que chama a atenção é uma recente pesquisa que compilou mais de 7000 artigos sobre células a combustível e que descobriu que os artigos sobre células PEM, DMFC e SOFC dominam com mais de 75% dos artigos publicados (HO, 2014). Particularmente o interesse e os recursos estariam sendo direcionados as duas tecnologias dito mais promissoras, dentre a enorme gama de tipos de células a combustível, que seriam as células do tipo PEM e

DMFC (HO, 2014). Dados de 2011 confirmam que estas duas tecnologias respondiam por mais de 99% das vendas de sistemas de células a combustível, sendo 97% atribuídos a sistemas PEM e 2,9% a sistemas DMFC (HO, 2014).

Para os sistemas do tipo PEM os principais problemas e soluções, aparecem compilados na tabela A21 (Apêndice). Este levantamento foi feito com base em 2778 artigos (HO, 2014).

Ainda com base no amplo estudo realizado por HO (2014) que conseguiu determinar o percurso das tecnologias associadas a células a combustível conforme mostrado na tabela 10. Os dados desta tabela somente confirmam o que SHARAF (2014) e SUTHERLAND (2013) já mostraram: que atualmente a tecnologia encontra-se em crescimento, pequenos incrementos, mas ainda assim em crescimento. E também o que esses autores sugeriram: que tecnologias chaves que permitam um salto de eficiência e redução de custos, ainda não foram desenvolvidas. Mas num horizonte de curto prazo eles veem a tecnologia do hidrogênio se disseminando (SHARAF, 2014; SUTHERLAND, 2013).

Tabela 10. Percurso tecnológico das células a combustível

Nova Tecnologia	Crescimento da Tecnologia	Tecnologias Chaves	Base Tecnológica
Emerge	Crescimento	Maturidade	Saturação
1969-2009	2009-2018	2018-2027	Pós 2027

Fonte: adaptado de (HO, 2014)

Por outro lado, existem outros autores que sugerem que o hidrogênio proveniente de fontes renováveis não será competitivo em termos de custos antes de 2050 (AJANOVIC, 2013). Quer parecer que este tipo de análise não leva em conta a possibilidade de avanços tecnológicos que revolucionem a produtividade e reduzam drasticamente os custos. Em diversas oportunidades na história científica viu-se ocorrências assim. Portanto descartar a ocorrência de importantes descobertas com a tecnologia de células a combustível não parece ser adequado (SHARAF, 2014; SUTHERLAND, 2013).

A construção, manutenção e disseminação da economia do hidrogênio pode ser responsável por um grande número de empregos diretos e indiretos (USDE, 2008) além de aumentar a competitividade econômica dos países que a adotarem (USDE, 2008).

6 CONCLUSÕES

Nesta revisão procurou-se expor e discutir os desafios tecnológicos e econômicos ao desenvolvimento, disseminação e comercialização de sistemas baseados na tecnologia de células a combustível. Se discutiu os desafios para obtenção, estocagem e distribuição de hidrogênio. Avaliou-se que os desafios para a produção de hidrogênio, de modo centralizado, tende a se concentrar na integração com diversas formas de geração renováveis, entre elas a solar, eólica e gaseificação de biomassa.

Entretanto, apesar da geração de hidrogênio, estar se tornando mais rapidamente viável, ela tem encontrado problemas, sendo o primeiro a criação e manutenção de uma estrutura de produção, armazenamento e distribuição em larga escala; o segundo se refere à efetiva utilização do poder calorífico da fonte de combustível, bem como elevados custos com transporte, perdas em transmissão e distribuição são fatores limitantes de grande importância, também por esse motivo, o sistema de geração descentralizado, bem como o embarcado vem-se tornando viáveis a cada dia. O processador de combustível constitui-se em um gargalo tecnológico de enorme importância e, tem retardado de modo significativo o uso direto do etanol, bem como de outros combustíveis para a produção de hidrogênio.

Entretanto, para a consecução desse objetivo são necessárias pesquisas adicionais para a melhoria das membranas trocadoras de ânions, seleção de metais catalisadores não preciosos, transporte e gerenciamento de água pela membrana, bem como eliminar os motivos para a degradação do anodo nesse sistema.

Ao expor e discutir os desafios para a redução do custo de geração de energia pelas células a combustível, observou-se que elas estão se tornando, gradualmente competitivas, e a sua participação no mercado de produção de energia elétrica e de calor tem-se expandido.

Melhorias na durabilidade, desempenho, redução nos custos de produção, bem como avanços tecnológicos na produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio, também permitirão o acesso a um mercado maior. Assim contribuir com os esforços que permitirão a disseminação e comercialização da tecnologia das Células a Combustível por setores da economia, naquilo que se convencionou chamar de Economia do Hidrogênio, envolve diversas questões econômicas e de regulamentação, que ainda não estão perfeitamente consolidados.

Além disso a falta de divulgação dos benefícios da tecnologia das Células a Combustível, que ainda é do desconhecimento do grande público, o que gera dificuldade na sua aceitação. Também é de suma importância que o custo de instalação e infraestrutura de

transporte e distribuição se reduza substancialmente, mesmo tratando-se de uma tecnologia relativamente nova, e encontrar-se em estágios iniciais de comercialização. Todos os fatores descritos, apesar de não constituir em obstáculos intransponíveis, tem atrasado a disseminação dessa tecnologia.

Entretanto, a crescente demanda por energia, somada a preocupações ambientais e de sustentabilidade, acabaram por se tornar em estímulos poderosos a adesão e difusão da tecnologia de células a combustível no Brasil e no Mundo, de forma geral.

Vale ainda destacar que o Brasil pode se beneficiar e muito desta tecnologia, devido a vantagens competitivas que aqui se encontram presentes tais como: tecnologia e infraestrutura do etanol, etanol de segunda geração (etanol gerado a partir da fermentação da celulose) em estágio avançado, fartas fontes de biomassa, boa luminosidade (acoplar com energia solar), possibilidade de produção de hidrogênio por microalgas. Todas estas fontes podem ser associadas à tecnologia de células a combustível como precursores do hidrogênio que irá alimentar estes dispositivos, ou ainda fornecer combustíveis que serão oxidados diretamente na célula, sem geração preliminar de hidrogênio (células a etanol por exemplo).

Expandir o uso do hidrogênio e das células a combustível como parte integrante de um portfólio de tecnologias limpas, eficientes e renováveis de energia irá requerer a combinação de novas tecnologias, amadurecimento das já existentes, aumento de aceitação do mercado e fortes investimentos em infraestrutura. Assim faz se necessário, pesquisas e difusão de informações sobre tecnologias renováveis e ambientalmente amigáveis de geração de energia. Geração de energia que figura hoje como uma das atividades humanas mais poluidoras.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). **Perspectivas em Tecnologias Energéticas. Cenários e Estratégias até 2050**. Paris, França **2010**. 24 p.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). World Energy Outlook – Executive Summary. Paris, France. **2014**. Disponível em:

< http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO_2014_ES_English_WEB.pdf >.

Acesso em: 15/11/2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3º Edição. Brasília. 2008. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap5.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

AINSCOUGH, C.; PETERSON, D.; MILLER, E. Hydrogen Production Cost From PEM Electrolysis. Department of Energy – Hydrogen and Fuel Cells Program Record. 2014. Disponível em:

<http://hydrogen.energy.gov/pdfs/14004_h2_production_cost_pem_electrolysis.pdf>. Acesso

em: 15/11/2014.

AJANOVIC, A. Renewable fuels – A comparative assessment from economic, energetic and ecological point-of-view up to 2050 in EU-countries. **Renewable Energy** 60 (2013) 733-738.

ALDABÓ, R. Célula Combustível a Hidrogênio – Fonte de Energia da Nova Era. São Paulo: Artiber, 2004. 182p.

ALLANE, K.; SAARI, A. Sustainable small scale CHP Technologies for buildings: the basis for multi-perspective decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 8 (2004) 401-431.

ALMARAZ, S. D. L.; PANTEL, C. A.; et al. Assessment of mono and multi-objective optimization to design a hydrogen supply chain. **International Journal of Hydrogen Energy** 38 (2013) 14121-14145.

ANAIS DA 64ª REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 2012, São Luiz, Maranhão. Avanços e Problemas em Células a Combustível de Etanol Direto. Dr. Ernesto Rafael Gonzalez.

ANTON, Donald. L.; MOTYKA, Theodore.; et al. Hydrogen Storage Engineering Center of Excellence. Washington D.C, 2013. (Chapter IV.B.1 of Fiscal Year 2013 Progress Report for the Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program).

Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress13/iv_b_1_anton_2013.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

AYERS, Katherine.; CAPUANO, Chris. Low-Cost Large-Scale PEM Electrolysis for Renewable Energy Storage. Washington D.C, 2013. (Chapter II.A.4 of Fiscal Year 2013 Progress Report for the Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program). Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress13/ii_a_4_ayers_2013.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

BANCO MUNDIAL. Global Tracking Framework – Sustainable Energy for All. Washington, DC. 2013. Disponível em: < <http://www.unep.org/pdf/778890GTF0full0report.pdf> >. Acesso em: 26/10/2014.

BOCCI, E.; CARLO, A. D.; MCPHAIL, S.J. et al. Biomass to fuel cells state of the art: A review of the most innovative technology solutions. **International Journal of Hydrogen Energy** 39 (2014) 21876-21895.

BONIFÁCIO, R.N.; LINARDI, M.; CUENCA, R. Desenvolvimento de Processo de Produção de Conjuntos Eletrodo-Membrana-Eletrodo para Células a Combustível Baseadas no Uso de Membrana Polimérica Condutora de Prótons (PEMFC) por Impressão a Tela. **Química Nova** 34 (2011), No. 1, 96-100.

BRITISH PETROLEUM. BP Statistical Review of World Energy June 2014. 63rd edition. London, UK. 2014. Review. Disponível em:

<<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>>. Acesso em: 26/10/2014.

BROUZGOU, A.; PODIAS, A.; TSIAKARAS, P.; PEMFCs and AEMFCs directly fed with etanol: a current status comparative review. **Journal of Application Electrochem** (2013) 43: 119-136.

CÂNDIDO, A.S.; EGUILUZE, K.I.B.; BANDA, G.R.S. Desenvolvimento de Catalisadores para Oxidação de Glicerol. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas. Sergipe v.1. No 16. p. 45-60. Mar. 2013.

CAPES. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Brasília, 2015. *Página da Web*. Disponível em: <<http://qualis.capes.gov.br/webqualis/principal.seam>>. Acesso em: 10/05/2015.

CARTER, D.; WING, J. The Fuel Cell Industry Review 2013.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). Hidrogênio energético no Brasil – Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br/publicacoes/hidrogenio.php>>. Acesso em: 18/10/2014.

CHAUBEY, R.; SAHU, S.; et al. A review on development of industrial process and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 23 (2013) 443-462.

CHEN, C.; YANG, P.; STAMENKOVIC, V. R. et al. Highly Crystalline Multimetallic Nanoframes with Three-Dimensional Electrocatalytic Surfaces. *Science*, v. 343, n. 6177, p. 1339-1343, Março. 2014.

CHUM, H. Programa Brasileiro de Células a Combustível. **Centro de Gestão de Estudos Estratégicos – CGEE**, 2002

COOK, B. Introduction to Fuel Cells and Hydrogen Technology. **Engineering Science and Education Journal**. December 2002.

CURTIN, S.; GANGI, J. 2013 Fuel Cell Technologies Market Report. Fuel Cell Technologies Office. USA Department of Energy. November 2014.

DARROW, Ken.; TIDBALL, Rick.; WANG, James.; HAMPSON, Anne. Catalog of Combined Heat and Power Technologies. Environmental Protection Agency. Washington, DC. 2014. Disponível em:

<http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_full.pdf>. Acesso em: 11/10/2014.

DUTTA, S. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 20 (2014) 1148-1156.

ECHIGO, M. et al. Performance of a natural gas fuel processor for residential PEFC system using a novel CO preferential oxidation catalyst. **Journal of Power Sources**. 132 (2004) 29-35.

ELETROBRÁS. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL. Resultados PROCEL 2014 Ano Base 2013. Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/pdf-completo.pdf>>. Acesso em: 11/10/2014.

ELMER, T.; WORALL, M.; WU, S.; RIFFAT, S. B.; Fuel cell technology for domestic built environment applications: State of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 42 (2015) 913-931.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro, 2012. Nota Técnica. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf>.

Acesso em: 18/10/2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2014. Rio de Janeiro, 2014. Relatório.

Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>.

Acesso em: 25/10/2014.

EUDY, Leslie.; CHANDLER, Kevin. Connecticut Nutmeg Fuel Cell Bus Project: First Analysis Report. Federal Transit Administration Report number 20. Washington, DC. 2012.

Disponível em: <http://www.fta.dot.gov/documents/FTA_Report_No._0020.pdf>.

Acesso em: 11/10/2014.

FAYAZ, H.; SAIDUR, R.; et. al. An overview of hydrogen as a vehicle fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 16 (2012) 5511-5528.

FUKUROZAKI, S. H. Análise Ambiental da Célula a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons sob o Enfoque da Avaliação do Ciclo de Vida. 2006. 151 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo, 2006.

FUKUROZAKI, S. H. Avaliação do Ciclo de Vida de Potenciais Rotas de Produção de Hidrogênio: Estudo dos Sistemas de Gaseificação da Biomassa e de Energia Solar Fotovoltaica. 2011. 180 p. Tese (Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo, 2011.

FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA NO ESTADO DE SÃO PAULO – FAPESP. Um Futuro com energia sustentável: iluminando o caminho. São Paulo, 2010. Relatório.

Disponível em: <<http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>>. Acesso em: 18/10/2014.

GENTIL, V. Corrosão. 3ª Edição. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora AS. 1996.

GREENE, D. L.; DULLEP, K. G.; UPRETI, G. Status and Outlook for the U.S. Non-Automotive Fuel Cell Industry: Impacts of Government Policies and Assessment of Future Opportunities. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee. 2011. Report. Disponível em: <http://www-cta.ornl.gov/cta/Publications/Reports/ORNL_TM2011_101_FINAL.pdf>. Acesso em: 11/10/2014.

GVOZDEN S. TASIC, SCEPAN S. MILJANIC, MILICA P. MARETA KANINSKI, DJORDJE P. SAPONJIC, VLADIMIR M. NIKOLIC. Non-noble metal catalyst for a future Pt free PEMFC. *Electrochemistry Communications*, N. 11 (2009) 2097-2100.

H2USA. **2014**. Hydrogen Public-Private Partnership to Deploy Hydrogen Infrastructure. Energy Department of USA. *Página da Web*. Disponível em: <<http://h2usa.org/>>. Acesso em: 12/09/2014.

HO, J. C.; SAW, E. C.; LU, L. Y. Y.; LIU, J. S. Technological barriers and research trends in fuel cell Technologies: A citation network analysis. **Technological Forecasting & Social Change** 82 (2014) 66-79.

HU, Jian. Photoelectrochemical Hydrogen Production. Washington D.C, 2013. (Chapter II.C.2 of Fiscal Year 2013 Progress Report for the Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program). Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress13/ii_c_2_hu_2013.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

INSTITUTO NACIONAL DE PROPRIEDADE INTELECTUAL (INPI). Pedidos de Patentes de Tecnologias Relativas a Células a Combustível – nº 9. Pedidos publicados no 2º semestre de 2012. 2012. Disponível em: <http://www6.inpi.gov.br/sobre/arquivos/alerta_celula_combustiveis_n9_90_junho_2012.pdf>. Acesso: 23/05/2015;

INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY (IPHE). Página da Web. 2014. Disponível em: < <http://www.iphe.net>>. Acesso em: 18/10/2014.

JOSECK, F., SUTHERLAND, E.; Early Market Hydrogen Cost Target Calculation. Department of Energy. Fuel Cell Technologies Office Record. 2014. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/14013_hydrogen_early_market_cost_target.pdf>. Acesso: 01/12/2014;

KING, David.; WANG, Yong.; et al. Biomass-Derived Liquids Distributed Reforming. (Chapter II.E.2 of Fiscal Year 2013 Progress Report for the Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program). Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress13/ii_e_2_king_2013.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

KORYTA, J.; DVORAK, J.; KAVAN, L. Principles of Eletrochemistry. 2nd Edition.England, John Wiley & Sons Ltd. 1993.

LEWIS, J. Stationary fuel cells – Insights into commercialisation. **International Journal of Hydrogen Energy** 39 (2014) 21896 – 21901.

LINARDI, M. **Introdução à Ciência e Tecnologia de Células a Combustível**. São Paulo: Artliber, 2010. 152p.

MACHADO, G. O. Preparação e Caracterização de eletrólitos sólidos poliméricos a partir dos derivados de celulose – hidroxietilcelulose e hidroxipropilcelulose. 2004. 143 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo.

MACEDO, I. C. Estado da Arte e Tendências Tecnológicas para a Energia. **Centro de Gestão de Estudos Estratégicos – CGEE**, 2003

MATELLI, José Alexandre. Sistemas de Cogeração Baseados em Células-Combustível Aplicados em Hospitais. 2001. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MCDOWALL W., EAMES M. Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: A review of the hydrogen futures literature. **Energy Policy** 34 (2006) 1236-1250.

MCWHORTER, Scott.; ORDAZ, Grace. Onboard Type IV Compressed Hydrogen Storage Systems – Current Performance and Cost. Department of Energy Fuel Cell Technologies Office Record. 2013. Disponível em:

<http://hydrogen.energy.gov/pdfs/13010_onboard_storage_performance_cost.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

MEDEIROS, Amanda Lucena. Influência do Método de Síntese e Caracterização Microestrutural de Pós Compósitos de NiO-Ce_{1-x}Eu_xO_{2-δ} para Anodos Catalíticos de Células a Combustível. 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2013.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. Comparative study of different fuel cell Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 16 (2012) 981-989.

MELIS, Tasios. Maximizing Light Utilization Efficiency and Hydrogen Production in Microalgal Cultures. Washington D.C, 2013. (Chapter II.D.1 of Fiscal Year 2013 Progress Report for the Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program). Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress13/ii_d_1_melis_2013.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

MILLER, Eric.; STUDER, Sarah. H2 Production Status & Threshold Costs Plot 2006-2011. Department of Energy Fuel Cell Technologies Office Record. 2012. Disponível em: <http://hydrogen.energy.gov/pdfs/12002_h2_prod_status_cost_plots.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

MILLER, E., AINSCOUGH C., TALAPATRA, A.; Hydrogen Production Status 2006-2013. Departmente of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program Record. 2014. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/14005_hydrogen_production_status_2006-2013.pdf>. Acesso em: 01/02/2015.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Programa Brasileiro Sistemas Célula a Combustível.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira. Brasília, 2014.

NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (NETL). Fuel Cell Handbook. 7ed. Morgantown, West Virginia. 2004. Report. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/coal/energy%20systems/fuel%20cells/FC_Handbook7.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

NEGRO, Miguel Luiz Miotto. Impactos da Introdução da Tecnologia de Células a Combustível na Matriz Energética Brasileira Visando a Geração de Energia Elétrica Distribuída. 2004. 167 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo, 2004.

NETO, E. P. L.; ALMEIDA, E. L. F.; BOMTEMPO, J. V. Reestruturando as Cadeias da Química e da Energia: A Via Metanol. **Revista Brasileira de Energia** 14 (2008), No 2, p 127-149.

NEVES, L. M. V. Produção de biohidrogênio por bactérias a partir de resíduos fermentescíveis. 2009. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal.

NGUYEN, Tien.; WARD, Jake. Well-to-Wheels Greenhouse Gas Emissions and Petroleum Use for Mid-Size Light-Duty Vehicles. Program Record (Offices of Vehicle Technologies & Fuel Cell Technologies). **2010**. Disponível em:

<http://hydrogen.energy.gov/pdfs/10001_well_to_wheels_gge_petroleum_use.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

NGUYEN, Tien.; WARD, Jake.; JOHNSON, Kristen. Well-to-Wheels Greenhouse Gas Emissions and Petroleum Use for Mid-Size Light-Duty Vehicles. Program Record (Offices of Bioenergy Technologies, Fuel Cell Technologies & Vehicle Technologies). **2013**. Disponível em: <http://hydrogen.energy.gov/pdfs/13005_well_to_wheels_ghg_oil_ldvs.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

NOGUEIRA, L. A. H.; COSTA, J. C. Opções Tecnológicas em Energia: Uma Visão Brasileira. Coleção de Estudos sobre Diretrizes para uma Economia Verde no Brasil. Fundação para o Desenvolvimento Sustentável.

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). Painel Internacional de Mudanças Climáticas. Climate Change 2014 - Synthesis Report. Genebra, Suíça. 2014. Relatório. Disponível em:

<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_LONGERREPORT.pdf>. Acesso em: 08/11/2014.

REMICK, R. J.; WHEELER, D.; SINGH, P. MCFC and PAFC R & D Workshop Summary Report. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Washington, DC. **2010**. Summary Report. Disponível em:

<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/mcfc_pafc_workshop_summary.pdf>. Acesso em: 11/10/2014.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY (REN21). Renewables 2014 Global Status Report. Paris, France. 2014. Report. Disponível em: <http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf>. Acesso em: 26/10/2014.

SAHU, A. K., PITCHUMANI, S., Nafion and modified-Nafion membranes for polymer electrolyte fuel cells: An overview. Bull. Mater Sci. Vol 32, No. 3, June **2009**, p. 285-294.

SENNA, R.M. et al. Experimental Data and Mathematical Model of a 500 We PEMFC Fuel Cell Stack Combined to a DC-DC Step-Up Converter With Enhanced Power Output. In: EMHyTec, 2012, Hammamet (Tunisia), september 11-14, 2012;

SENNA, Roque Machado. Desenvolvimento e Demonstração de Funcionamento de um Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica, com Tecnologia Nacional, composto por um Módulo de Células a Combustível tipo PEMFC e Acumulador Chumbo Ácido. 2012. 91 p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo, 2012.

SHARAF, O. Z.; ORHAN, M. F. An Overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 32 (2014) 810-853.

SHREVE, R. Norris; BRINK JR., Joseph A. Indústrias de processos químicos. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan, c1997. 717 p

SILVA, D. F. Preparação de Eletrocatalisadores PtRu/C e PtSn/C utilizando feixe de elétrons para aplicação como anodo na oxidação direta de metanol e etanol em células a combustível de baixa temperatura. 2009. 181 p. Tese (Doutorado em Ciências – Área de Tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

SKOOG, D.A; WEST, D.M; HOLLER, F.J. & TIMOTHY, A. N. Princípios de análise Instrumental, Tradução da 5ª edição norte americana. São Paulo, Ed.Bookman, 2002. Química Eletroanalítica, p.501-525.

SOMMER, Elise Meister. Desenvolvimento e Validação Experimental de um Modelo Matemático de Células de Combustível Alcalinas. 2009. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, área de concentração de Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos) – PG-Mec – Universidade Federal do Paraná.

SOMMER, Elise Meister. Modelagem, Simulação e Otimização de Células de Combustível de Membrana Alcalina. 2012. 111 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica, área de concentração de Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos) – PG-Mec – Universidade Federal do Paraná.

SPENDELOW JACOB.; MARCINCKOSKI, J.; Fuel Cell System Cost-2013. Department of Energy Fuel Cell Technologies Office Record. 2013. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/14012_fuel_cell_system_cost_2013.pdf>. Acesso em 01/02/2015;

SPENDELOW JACOB.; MARCINCKOSKI, J.; Fuel Cell System Cost-2014. Department of Energy Fuel Cell Technologies Office Record. 2014. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/14014_fuel_cell_system_cost_2014.pdf>. Acesso em 01/02/2015;

SPINACÉ, E.V.; NETO, A.O.; FRANCO, E.G.; LINARDI, M.; GONZALEZ, E.R. Métodos de Preparação de Nanopartículas Metálicas Suportadas em Carbono de Alta Área Superficial, como Eletrocatalisadores em Células a Combustível com Membrana Trocadora de Prótons. **Química Nova** 27 (2004), No. 4, 648-654.

STAFFELL, I.; GREEN, R. The cost of domestic fuel cell micro-CHP systems. **International Journal of Hydrogen Energy** 38 (2013) 1088-1102.

SUMODJO, P. T. Oxidação Eletrocatalítica do etanol sobre eletrodo de platina platinizada. 1985. 180 p. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo.

SUTHERLAND, E.; ELGOWAINY, A.; DILLICH, S.; H₂ Delivery Cost Projections – 2013. Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program Record. 2013. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/13013_h2_delivery_cost_central.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

THE CONNECTICUT CENTER FOR ADVANCED TECHNOLOGY, INC (CCAT). Final Report Fuel Cell Economic Development Plan Hydrogen Roadmap. East Hartford, Connecticut. **2008**. Report. Disponível em: <http://energy.ccat.us/uploads/documents/energy/Fuel_Cell_Plan_1-31-08_DECD.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

THE NATIONAL ACADEMIES (NA). Committee on Assessment of Resource Needs For Fuel Cell and Hydrogen Technologies. Transitions to Alternative Transportation Technologies – A Focus on Hydrogen. Washington, DC. 2008. Disponível em: <http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12222>. Acesso em: 18/10/2014.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (USDE). Effects of a Transition to a Hydrogen Economy on Employment in the United States Report to Congress. Washington, DC. **2008**. Report. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/epact1820_employment_study.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (USDE). Hydrogen Program Overview. Washington, DC. **2009**. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/doe_h2_program.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (USDE). Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan. (Chapter II Benefits). Washington, DC. **2012**. Disponível em: <<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/benefits.pdf>>. Acesso em: 18/10/2014.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (USDE). A Subcommittee of the Hydrogen & Fuel Cell Technical Advisory Committee. Report of the Hydrogen Production Expert Panel. Washington, DC, May **2013**. *Report*. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hpep_report_2013.pdf>. Acesso em: 18/10/2014.

UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). Annual Energy Outlook 2014 with projections to 2040. Washington, DC. 2014. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2014).pdf)>. Acesso em: 18/10/2014.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA. UCDAVIS Campus.Hyperlibrary Project – ChemWiki. 2014. Disponível em: <http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Electrochemistry/Voltaic_Cells>. Acesso em: 02/12/2014.

VARELA, H.; MALTA, M.; TORRESI, R. M.; *Química Nova* **2000**, *23*, 664.

VILLULLAS, H.M.; TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E.R. Células a Combustível: Energia Limpa a Partir de Fontes Renováveis. *Química Nova na Escola* **15**(2002).

WANG, J. Analytical Electrochemistry. 2nd Edition. New York. John Wiley @ Sons, Inc. 2001.

WANG, Junye. Barriers of Scaling-up fuel cells: Cost, durability and reliability. *Energy* **80** (2015) 509-521.

WARSHAY, M.; PROKOPIUS, P. R. The Fuel Cell in Space: Yesterday, Today and Tomorrow. NASA Technical Memorandum 102366. 1989. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19900002488.pdf>>. Acesso em: 10/12/2014.

WENDT, H.; LINARDI, M.; ARICÓ, E.M. Células a Combustível de Baixa Potência para Aplicações Estacionárias. *Química Nova* **25** (2002), No. 3, 470-476.

WENDT, H.; GOTZ, M.; LINARDI, M. Tecnologia de Células a Combustível. **Química Nova** 23 (4), 2000.

WIPKE, Keith.; SPRIK, Sam.; KURTZ, Jennifer. Controlled Hydrogen Fleet and Infrastructure Analysis. In: 2011 DOE Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC. 2011. Disponível em:

<http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review11/tv001_wipke_2011_o.pdf>. Acesso em: 11/10/2014.

APÊNDICE

Tabela A1: Duração das Reservas conhecidas de Carvão (2013)

Duração das Reservas de carvão baseado no consumo atual – dados 2013

América do Norte	250 anos
América Central e Sul	150 anos
Europa e Ásia	250
Oriente Médio e África	125 anos
Ásia e Pacífico	55 anos

Fonte: (BRITISH PETROLEUM, 2014) e (FAPESP, 2010)

Tabela A2: Fator de Impacto e Classificação Qualis

Classificação Qualis	Fator de Impacto (FI)	Observação
A1	$\geq 3,800$	mais elevado fator de impacto
A2	$2,500 \leq FI \leq 3,799$	
B1	$1,300 \leq FI \leq 2,499$	
B2	$0,001 \leq FI \leq 1,299$	
B3, B4, B5	sem fator de impacto	*
C	0	irrelevante

* são indexados em bases como Scielo, Medline, Lilacs

Fonte: (CAPES, 2015)

Tabela A3. Conteúdo Energético de diferentes combustíveis

Combustível	Conteúdo Energético (MJ/kg)
Hidrogênio	120
Gás natural liquefeito	54,4
Propano	49,6
Querosene de avião	46,8
Gasolina	46,4
Diesel	45,6
Etanol	29,6
Metanol	19,7
coque	27
Madeira (seca)	16,2
Bagço	9,6

Fonte: adaptado de (DUTTA, 2014)

Tabela A4. Tecnologias de produção de hidrogênio

Tecnologias de Produção de Hidrogênio		Fonte Primária de Energia		
Reforma a vapor (gás natural)		Química	Térmica	
Água	Separação fotovoltaica	Solar		
	Separação fotoquímica	Solar		
	Separação termoquímica	Nuclear	Solar	
	Eletrolise Alcalina	Nuclear	Solar	Hidráulica
Biomassa/Biológica	Reforma do biogás	Química	Térmica	
	Fermentação com luz e sem luz	Biológica		
	Biofotólise (microalgas e cianobactérias)	Biológica		
Glicerol	Reforma a vapor com catalisador de Ni	Química	Térmica	
Ureia	Oxidação Eletroquímica com catal. Ni	Elettricidade		
Decomposição do H₂S	Decomposição fotocatalítica	Solar		

Fonte: adaptado de (DUTTA, 2014)

Tabela A5. Cadeia Produtiva do Hidrogênio

Tecnologia de Produção	Modal de Transporte	Tipos de Armazenamento
Reforma a vapor do metano	Tubos Reboque, Caminhões Tanque, Tubulação	Líquida (comprimida), gasosa
Gaseificação do carvão		
Gaseificação da biomassa		
Eletrólise		

Fonte: adaptado de (ALMARAZ, 2013)

Tabela A6. Comparação de tecnologias de produção do hidrogênio

Tecnologia	Matéria Prima	Eficiência de Conversão
Reforma vapor metano	Hidrocarbonetos	70-85%
Reator membrana	Hidrocarbonetos	77-92%
Reator membrana híbrido adsorvente	Hidrocarbonetos	100%
Oxidação Parcial	Hidrocarbonetos	60-75%
Reforma auto térmica	Hidrocarbonetos	60-75%
Reforma de Plasma	Hidrocarbonetos	9-85%
Fotoeletroquímica	água + sol	12,40%
Processo híbrido do enxofre	água + calor	48,80%
Fotólise	água + sol	1-2%
Foto-fermentação	ácidos orgânicos + sol	6,6-86%
Fermentação sem luz	Biomassa	60-80%
Sistemas Híbridos	Biomassa + sol	6,04-46%

Fonte: adaptado de (CHAUBEY, 2013)

Tabela A7. Processos de conversão de Biomassa em energia

Tipo de Biomassa	Madeira e coprodutos lignocelulósicos	Esgoto	Rejeitos sólidos orgânicos	Sacarídeos, amiláceos e lignocelulósicos	Oleaginosas		
Processos Específicos	Térmico			Biológico		Mecânica	
	Combustão	Pirólise	Gaseificação	Digestão Aeróbica	Digestão Anaeróbica	Fermentação alcoólica	Extração do óleo
Produtos e Coprodutos gerados	Gás aquecido	Sólidos	Gás Combustível		Biogás	Etanol	Óleo
		Líquidos					
		Gás Combustível					
Purificação - melhorando o combustível	Processos Mecânicos, térmicos, químicos, elétricos						
Conversores de energia química em térmica/mecânica, elétrica	Trocadores de calor	Turbina a vapor, motor a combustão, turbina a gás, célula a combustível, ciclos combinados, geradores					
Energia - uso final	Térmica, Mecânica, Luminosa, Elétrica						

Fonte: adaptado de (BOCCI, 2014)

Tabela A8: Custo de distribuição de H₂ (2005-2020)

Custo* do Transporte de H₂ (US\$/kg H₂ transportado e dispensado)					
	2005	2011	2013	2020 - Projeção	2020 - Objetivo
Tecnologia de 350 bar					
Tubulação	3,71	4,59	4,44	3,67	2
Tubulação + caminhão tanque	4,62	3,22	3,16	2,49	
Caminhão Tanque	5,26	3,24	3	2,26	
Tecnologia de 700 bar					
Tubulação	n/d	5	4,84	3,96	2
Tubulação + caminhão tanque	n/d	3,59	3,21	2,53	
Caminhão Tanque	n/d	3,61	3,29	2,32	
Tubulação + tanque (líquido)	n/d	3,73	3,73	3,19	
Tanque (líquido)	n/d	3,23	3,23	2,74	
n/d - dados não disponíveis					
*valores para transporte até 100 km distância entre o local de produção e consumo					

Fonte: adaptado de (SUTHERLAND, 2013).

Tabela A9: Custos de uma Célula a Combustível PEM (uso automotivo)

Características	Unidade	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Módulo de Energia	kW	90	90	88	88	89	88	89	93
Energia do Sistema	kW	80	80	80	80	80	80	80	80
Densidade de Energia	mW/cm ²	583	715	833	833	1110	984	692	834
Temperatura da Célula	°C	70-90	80	80	90	95	87	97	100
Conteúdo de Platina ou de PGM*	g/kW	0,68	0,39	0,2	0,2	0,19	0,22	0,25	0,21
Custo da Platina	US\$/onça**	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1500	1500
Custo Módulo de Energia	US\$/kW	50	34	27	25	22	20	27	24
Custo do Sistema/Geração	US\$/kW	94	73	61	51	49	47	55	55
* PGM = grupo de metal da platina									
** onça = 31,10348 g									

Fonte: adaptado de SPENDELOW 2014

Tabela A10: Evolução de custo de uma célula PEM para uso automotivo

Ano	Custo do Sistema de Célula a Combustível
2006	US\$ 124/kW
2007	US\$ 106/kW
2008	US\$ 81/kW
2009	US\$ 69/kW
2010	US\$ 59/kW
2011	US\$ 57/kW
2012	US\$ 55/kW
2013	US\$ 55/kW
2014	US\$ 55/kW
2020 (objetivo)	US\$ 40/kW
Objetivo Final	US\$ 30/kW

Fonte: adaptado de SPENDELOW 2014

Tabela A11: Comparação de Tecnologias para uso em transporte

Tecnologia de propulsão	Nível de Energia	Eficiência	Energia Específica	Densidade de Energia	Autonomia Veículo	Custo de Capital
	kW	%	kWh/kg	kW/L	km	US\$/kW
Células a Combustível PEM (H ₂ on board) - processado internamente	10-300	40-45	400-1000	600-2000	350-500	100
Células a Combustível PEM (H ₂ off board)	10-300	50-55	400-1000	600-2000	200-300	100
Motor a gasolina	10-300	15-25	mais 1000	mais 1000	600	20-50
Motor a diesel	10-200	30-35	mais 1000	mais 1000	800	20-50

Fonte: adaptado de (SHARAF, 2014)

Tabela A12. Comparativo de preço de veículos: combustão interna vs células a combustível

Características	Combustão Interna	Célula a combustível híbrido
Combustível	Gasolina	Hidrogênio
Tipo de uso	Passageiro	Passageiro
Preço base	US\$ 21717,65	US\$ 21717,65
Subsídios	0	(-US\$ 6000,00)
Sistema de Celula a Combustivel		
Célula a Combustível		US\$ 5195,04
Tanque Combustível		US\$ 975,00
Motor Elétrico		US\$ 1558,51
Transmissão		US\$ 226,5
Bateria		US\$ 2597,52
Sistema de limpeza de gás		(-US\$ 645,00)
Redução de Peso (economia combustível)		US\$ 2400,00
Aerodinâmica		US\$ 225,00
Preço Total do Veículo	US\$ 21717,65	US\$ 28250,22

Fonte: adaptado de (MEKHILEF, 2012)

Tabela A13. Custos de capital para diversos tipos de sistemas veiculares

Mecanismo de Propulsão	2010	2030 (otimista)	2030 (pessimista)	2030 (médio)
Célula a Combustível de 20 kW	US\$ 10000,00	US\$ 700,00	US\$ 1500,00	US\$ 1100,00
Célula a Combustível de 80 kW	US\$ 43700,00	US\$ 4900,00	US\$ 10030,00	US\$ 7465,00
Conjunto de bateria de 6 kWh	US\$ 6000,00	US\$ 1200,00	US\$ 1800,00	US\$ 1500,00
Conjunto de bateria de 25 kWh	US\$ 25000,00	US\$ 5000,00	US\$ 7500,00	US\$ 6250,00
Motor Elétrico	US\$ 1700,00	US\$ 1200,00	US\$ 2030,00	US\$ 1615,00
Armazenamento de H ₂	US\$ 2000,00	US\$ 900,00	US\$ 2000,00	US\$ 1450,00
Motor a Combustão	US\$ 2200,00	US\$ 2400,00	US\$ 2530,00	US\$ 2465,00
Custo Total				
Motor a Combustão	US\$ 2200,00	US\$ 2400,00	US\$ 2530,00	US\$ 2465,00
Veículos movidos a Células a Combustível	US\$ 47400,00	US\$ 7000,00	US\$ 14060,00	US\$ 10530,00
Veículos a Bateria	US\$ 26700,00	US\$ 6200,00	US\$ 9530,00	US\$ 7865,00
Veículos Híbridos (célu combu + bateria)	US\$ 19700,00	US\$ 4000,00	US\$ 7330,00	US\$ 5665,00

Fonte: adaptado de (FAYAZ, 2012)

Tabela A14. Custos de operação de alguns combustíveis

Custo do Combustível	2010 (GJ)	2030 (GJ) otimista	2030 (GJ) pessimista	2030 (GJ) médio	Km/GJ	Unidades Típicas
Gasolina	US\$ 12,7	US\$ 19,0	US\$ 38,0	US\$ 28,5	407,16	40 mpg*
Hidrogênio	US\$ 42,0	US\$ 14,0	US\$ 56,0	US\$ 35,0	814,33	115,87 km/kg
Eletricidade	US\$ 36,0	US\$ 27,0	US\$ 45,0	US\$ 36,0	1630,26	5,79 km/kW.h ⁻¹
* 40 mpg = 40 milhas por galão = 64,37 km/3,78 litro = 17,02 km/litro						

Fonte: adaptado de (FAYAZ, 2012)

Tabela A15. Sumário dos custos e emissões

Combustível	Custo do Combustível (US\$/GJ)*	Emissão gases estufa (kg gás/100 km)	Emissões poluentes ar (kg/100 km)
Gasolina	28,5	21,4	0,06
Hidrogênio	35	15,2	0,0342
Elétrico ou bateria	36	12	0,0448
Híbrido	n/d	13,3	0,037
n/d - dado não disponível			
* Estimativa média para 2030			

Fonte: adaptado de (FAYAZ, 2012)

Tabela A16. Comparativo de tecnologias aplicadas em sistemas CHP

Caraterísticas	Motores de Combustão interna	Células a Combustível	
		PEM	SOFC
Capacidade Elétrica	1-5 kW	0,7-5 kW	0,7-5 kW
Eficiência Elétrica	20-30%	30-40%	40-60%
Eficiência Global	acima de 90%	acima 85%	acima 85%
Relação Calor/Energia Elétrica	3	2	0,5-1
Permite modular a saída	não	sim	não
Combustível utilizado	gás, biogás, combustíveis líquidos	hidrocarboneto, hidrogênio	
Nível de Ruído	Alto (95 dB ou mais)	Baixo (0 - 55 dB)	Baixo (0 - 55 dB)
Maturidade Tecnológica	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: adaptado de (ELMER, 2015)

Tabela A17. Comparação dos preços de geração de energia em sistemas estacionários do tipo PEM

Atores	Custos de geração de energia (US\$/kW)				
	2009	2011	2013	2015	2020 (objetivo)
Departamento de Energia dos EUA*	n/d	n/d	n/d	US\$ 1200/kW	US\$ 1000/kW
Mercado**	16000- 160000				
*Custos estimados baseados em informações e modelos	(Panasonic	US\$	US\$	US\$	
** Unidades vendidas comercialmente, ou seja valores reais de operação	tinha um sistema de	33650/kW (Panasonic)	21000/kW (Panasonic)	5608/kW (Panasonic)	n/d
n/d - dados não disponíveis	US\$ 42464/kW)				

Fonte: adaptado de (ELMER, 2015)

Tabela A18. Evolução das células a combustível no Japão

Melhoria*	Empresa - período 2011-2013	
	Panasonic	Toshiba
Preços**	-27,50%	-25%
Durabilidade	de 50000 para 60000 h	n/d
Redução de Componentes	-20%	-40%
Redução de Peso	-10%	n/d
Redução do Tamanho Global	Sim	Sim
Redução em metais nobre e platina	-50%	-20%
Eficiência total do sistema CHP	95%	94%

* Sistemas PEM para uso doméstico
** Preços em YEN
n/d - dados não disponíveis

Fonte: adaptado de (LEWIS, 2014)

Tabela A19: Tecnologias de Geração de Energia Estacionária

Energia estacionária/tecnologia CHP	Nível de Energia	Eficiência	Durabilidade	Custo de Capital	Fator de Capacidade
	MW	%	anos	US\$/kW	%
Célula a Combustível - Ácido Fosfórico	0,2-10	30-45	5-20	1500	mais de 95
Célula a Combustível carbonato fundido + turbina a gás	0,1-100	55-65	5-20	1000	mais de 95
Célula a Combustível de óxido sólido + turbina a gás	0,1-100	55-65	5-20	1000	mais de 95
Ciclo a vapor (carvão)	10-1000	33-40	mais 20	1300-2000	60-90
Ciclo combinado de gaseificação	10-1000	43-47	mais 20	1500-2000	75-90
Ciclo de turbina a gás (gás natural)	50-1000	45-60	mais 20	500-1000	mais de 95
Microturbina	0,01-0,5	15-30	5-10	800-1500	80-95
Nuclear	500-1400	32	mais 20	1500-2500	70-90
Hidrelétrica	0,1-2000	65-90	mais 40	1500-3500	40-50
Turbina eólica	0,1-10	20-50	20	1000-3000	20-40
Geotérmica	1-200	5-20	mais 20	700-1500	mais de 95
Solar Fotovoltaica	0,001-1	10-15	15-25	2000-4000	menor 25

Fonte: adaptado de (SHARAF, 2014)

Tabela A20. Principais problemas apresentados pelos módulos de energia

Problema de materiais	Problema de Design
(resistência as condições de operação)	Gerenciamento de fluxos (água, calor, combustível, oxidante)
Degradação material (oxidação, corrosão)	Degradação material (oxidação, corrosão)
Degradação do catalisador	Degradação do catalisador
Degrada a membrana	Desidratação Membrana
Impede trocas (corrosão eletrodos, catalisadores, membrana)	Inundação da Membrana
Problemas corrosão e integridade mecânica	Pontos acúmulo calor (hotspot)
Perdas, pressão	Vedação

Fonte: adaptado de (WANG, 2015)

Tabela A21. Compilação dos problemas técnicos e possíveis soluções para células PEM

Problema Técnico	Solução Proposta
Instabilidade Eletroquímica	Usar Membrana Nafion (DuPont) ou a membrana da Dow Chemical
Excesso água no cátodo	Aumentar o fluxo de oxigênio
	Aumentar a pressão a fim de evitar a difusão de água
Ativação a potencias baixos	Usar Eletrocatalisadores que gerem altas densidades de corrente
	Aumentar a pressão ou enriquecer conteúdo de oxigênio
	Operar a maiores T e P
Queda de potencial por efeito ohmico	Usar membrana mais delgada
	Usar membrana da Dow
	Operar a maiores T e P
Melhorar o transporte de massa	Usar membrana mais delgada
	Usar membrana da Dow
	Operar a maiores T e P
Envenenamento do catalisador por CO	Usar liga Pt com outros metais (Ru, Sn, Mo)
	Usar reformador com sistema para eliminação do CO

Fonte: adaptado de (HO, 2014)