

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR *Ana Maria Resende*.....
Santos..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *22* / *02* / *2008*.....

.....
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Ana Maria Resende Santos

**Tendências tecnológicas das células a
combustível para uso do hidrogênio derivado
de petróleo e gás natural**

Campinas, 2008

Ana Maria Resende Santos

Tendências tecnológicas das células a combustível para uso do hidrogênio derivado de petróleo e gás natural

Tese apresentada ao Curso de Doutorado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Área de Concentração:

Orientador: Ennio Peres da Silva
Co-orientador: André Tosi Furtado

Campinas
2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sa59t Santos, Ana Maria Resende
Tendências tecnológicas das células a combustível
para uso do hidrogênio derivado de petróleo e gás natural
/ Ana Maria Resende Santos. --Campinas, SP: [s.n.],
2008.

Orientadores: Ennio Peres da Silva, André Tosi
Furtado.

Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Petróleo. 2. Hidrogênio. 3. Células a combustível.
4. Bibliometria. I. Silva, Ennio Peres da. II. Furtado,
André Tosi. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Título em Inglês: Technological trends of fuel cells for the use of petroleum and
natural gas derived hydrogen

Palavras-chave em Inglês: Petroleum, Hydrogen, Fuel cell, Bibliometrics

Área de concentração: -

Titulação: Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora: Rui Henrique Pereira Leite de Albuquerque, Newton Müller
Pereira, Newton Pimenta Neves Jr., Carla Kazue Nakao
Cavaliero

Data da defesa: 22/02/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

TESE DE DOUTORADO

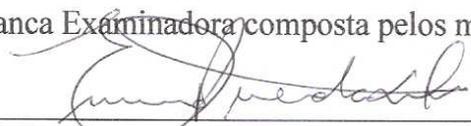
**Tendências tecnológicas das células a
combustível para uso do hidrogênio derivado
de petróleo e gás natural**

Autor: Ana Maria Resende Santos

Orientador: Ennio Peres da Silva

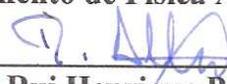
Co-orientador: André Tosi Furtado

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



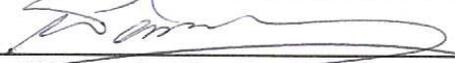
Prof. Dr. Ennio Peres da Silva, Presidente

Departamento de Física Aplicada/Instituto de Física *Gleb Wataghin*/UNICAMP



Prof. Dr. Rui Henrique Pereira Leite de Albuquerque

Departamento de Política Científica e Tecnológica/Instituto de Geociências/UNICAMP



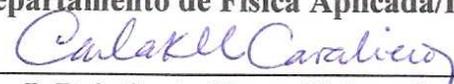
Prof. Dr. Newton Müller Pereira

Departamento de Política Científica e Tecnológica/Instituto de Geociências/UNICAMP



Prof. Dr. Newton Pimenta Neves Jr.

Departamento de Física Aplicada/Instituto de Física *Gleb Wataghin*/UNICAMP



Profª. Drª. Carla Kazue Nakao Cavaliero

Departamento de Energia/Faculdade de Engenharia Mecânica/UNICAMP

Campinas, 22 de fevereiro de 2008.

Dedicatória

Dedico este trabalho ao Autor da existência – Deus – que é o meu Pai, meu Criador, meu Consolador e é o motivo pelo qual vivo.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A minha família: José Paulo meu marido, obrigada pelo apoio, pela ajuda e compreensão. As minhas filhinhas Glorinha e Sarah por me “forçarem” a repensar a vida. A minha mãe Vilma por estar sempre por perto, meus irmãos mui queridos e amados Marcílio e Ráger, a “turminha do barulho” meus sobrinhos Mariana, Rafael, Mel e Ana Clara com os quais resgato a criança que fui (e sou).

Ao meu orientador, Prof. Ennio: seus ensinamentos e orientações ultrapassaram, e em muito, a elaboração desta tese. Eles contribuíram para que eu me transformasse numa pessoa e numa profissional melhor.

Ao meu co-orientador, Prof. André Furtado pela paciência, pelos sábios comentários e pela boa vontade com que sempre me recebeu.

Ao Rui Albuquerque e Solange Corder por terem me acolhido quando cheguei a Unicamp, em 1999, e por permitir que nossos laços de amizade se fortaleçam a cada dia.

Ao João Carlos, meu “co-co-orientador,” meu grande amigo e companheiro de jornada, sem sua ajuda os “muros” não teriam sido levantados em 52 dias.

Ao Daniel Gabriel, a quem não chamo mais de colega e sim de amigo. Sempre ponderado e sábio.

Ao Cristiano, meu amigo, pelos seus conselhos e incentivo e pelas incontáveis vezes em que me ajudou e por cobrar apenas “déz real mais o dinheiro do busão”.

Ao Newton Pimenta pela sobriedade e sensatez.

Aos colegas do Laboratório de Hidrogênio: Antonio, André, Carlinha, Cristiano, Cristiane, Daniel, Dmitri, Edson, Ennio, Fernando, Guto, João, Miriam, Newton, Paulo e Paula sem o apoio de vocês este trabalho jamais teria sido finalizado.

Aos meus “estagiários” da LH2 Jr: Diego Cambra e Debora Salomon.

Ao pessoal do IG: Sérgio Salles, Bia, Mauro, Rafael, Sérgio Paulino, Claudenício, Ruy Quadros, Luciana e Val.

A todos os professores, membros ou não da banca de defesa de tese, e colegas do Planejamento de Sistemas Energéticos, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

À Célia Kerr, Celma Furman e Roberto por não acreditarem no impossível.

À Valdira Correia e Carmem Nogueira pelo apoio e incentivo.

Ao Laboratório de Hidrogênio/LH2 da UNICAMP que viabilizou financeiramente este trabalho.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás (PRH-ANP/MCT) que viabilizou financeiramente este trabalho.

A empresa ORTENG, através do Sr. Robson Braga de Andrade, José Luiz de Melo Aguiar e Ricardo Lomez, por me contratar em dezembro de 2007, portanto antes da defesa desta tese, e acreditar que é possível se implementar um Programa de P&D dentro de uma empresa brasileira.

Agradeço também aos professores Maria Socorro Mol Palmieri e André Monteiro Klen, da UFOP, pelo suporte na parte estatística deste trabalho.

E, finalmente, aos meus médicos que me ajudaram a chegar até aqui: Dr^a. Helaine Milanez, Dr^a. Christiane, Dr. Ataliba, Dr. Otávio Coelho, Dr. Paulo Leal.

“Acabou-se, pois, o muro, em cinqüenta e dois dias. E sucedeu que, ouvindo-o todos os nossos inimigos, temeram todos os gentios que havia em roda de nós e abateram-se muito em seus próprios olhos; porque reconheceram que o nosso Deus fizera esta obra”.
(Neemias, Cap. 6:15-16)

Resumo

O uso do hidrogênio como energético foi cogitado na segunda metade dos anos 1970, durante a Crise do Petróleo, mas a redução dos preços do petróleo em meados dos anos 1980 fez com que esta alternativa e outras propostas de energias alternativas se tornassem economicamente inviáveis, reduzindo em muito o interesse na tecnologia e economia do hidrogênio. Um interesse maior pelo uso do hidrogênio como energético voltou a ocorrer em meados dos anos 90, com o aumento das preocupações ambientais, principalmente pelos Estados Unidos, para alternativas ao Protocolo de Quioto. O objetivo geral deste trabalho é identificar o tipo de célula a combustível e a fonte de energia para obtenção do hidrogênio mais pesquisada, no período compreendido entre os anos de 1970 e 2006, bem como verificar os recursos governamentais destinados para programas de P&D em hidrogênio e células a combustível. A metodologia utilizada foi a bibliometria em que a identificação do tipo de célula a combustível e da fonte de energia para obtenção do hidrogênio baseou-se na busca de um conjunto de periódicos científicos de grande circulação, reunindo registros sobre artigos científicos do mundo inteiro. Dessa forma, foi possível identificar a quantidade de artigos, o ano de publicação, o país onde foi realizada pesquisa, o tipo de célula a combustível e a fonte de energia para obtenção do hidrogênio mais pesquisada. Em relação aos recursos governamentais destinados a programas de P&D a pesquisa baseou-se na análise de um conjunto de documentos governamentais de diversos países. A análise descrita neste trabalho se pautou na consulta de 3.501 artigos e possibilitou constatar que o uso energético do hidrogênio nunca foi tão pesquisado e proposto como solução de vários problemas do atual quadro energético de muitos países. A importância dada a esta alternativa varia de país para país, predominando o interesse dos países mais desenvolvidos como Estados Unidos, Japão, Alemanha, Reino Unido, Canadá. Os resultados indicaram um interesse maior no uso automotivo das células a combustível. Sendo esta a aplicação principal para as células a combustível constata-se um maior interesse nas células tipo PEM, mais adequadas a esta aplicação, seguida da célula tipo SOFC. Verifica-se que a produção de hidrogênio a partir dos combustíveis fósseis tem sido feita de forma mais intensiva pelos Estados Unidos, Japão, Alemanha, Reino Unido, Canadá, Noruega. A consulta dos artigos científicos indicou que as fontes renováveis utilizadas para produção de hidrogênio são etanol, metano (biogás), biodiesel e vento. Os países identificados com maior interesse neste tipo de fonte de energia para produção de hidrogênio são Estados Unidos, Alemanha, Canadá, Reino Unido, Países Baixos e Japão.

Palavras Chave: Petróleo, Hidrogênio, Célula a Combustível, Bibliometria.

Abstract

The use of hydrogen energy was considered in the second half of the 1970s, during the Oil Crisis, but the reduction of oil prices in the mid-80s made this alternative and other proposals for alternative energy sources become economically unviable and greatly reduced the interest in the hydrogen technology and economy. A greater interest in the use of hydrogen as an energy carrier emerged again in the mid 1990s with increasing environmental concerns, particularly in the United States, as an alternative to the Kyoto Protocol. The main objective of this study is to identify the types of fuel cells and energy sources for obtaining hydrogen in the period between 1970 and 2006, and to verify government funding allocated to R&D programs in hydrogen and cells fuel. Bibliometrics was the methodology employed to identify the type of fuel cell and energy source for obtaining hydrogen and was based on the search for a set of scientific journals of wide circulation, gathering records on scientific articles worldwide. The bibliometrics analysis allowed the identification of the number of articles, the year of publication, the country where research was conducted, the most researched type of fuel cell and power source for obtaining hydrogen. This study was based on an analysis of a number of government documents from various countries (U.S., European Union, Japan and Brazil). The analysis of these documents led to the verification of the government funding allocated to R&D programs in hydrogen and fuel cells. The analysis described in this work was based on the consultation of 3501 articles and allowed to verify that in the period known as the “Oil Crisis” the number of publications for the keywords *hydrogen* and *fuel cell* was small, but that from 1992 on, it was observed a growing number of publications for these keywords. The results indicate that the interest is greater in PEM fuel cells, followed by SOFC; and the largest number of applications refers to automotive use. Concerning the hydrogen generation, results indicated an interest in fossil fuels when compared individually with renewable energy sources. The following renewable energy sources were found in the analyzed papers: ethanol, methane, wind, biodiesel. The countries that are more interested in this type of energy source for hydrogen production are the United States, Germany, Canada, the United Kingdom, the Netherlands and Japan.

Key Words: Petroleum, Hydrogen, Fuel Cell, Bibliometrics.

Lista de Ilustrações

Capítulo 1

Figura 1.1: Evolução dos preços internacionais do barril de petróleo.....04

Capítulo 2

Figura 2.1: Projeção da produção de hidrogênio até 2025.....15

Figura 2.2: Reações eletroquímicas que ocorrem em cada tipo de célula a combustível.....17

Figura 2.3: Distribuição de protótipos por montadora.....22

Figura 2.4: Protótipo FCX da Honda.....23

Figura 2.5: Protótipo ônibus Citaro da Mercedes-Benz.....23

Figura 2.6: Unidade estacionária SOFC de 220 kW da Siemens.....24

Figura 2.7: Unidade estacionária MCFC de 300 kW da Fuel Cell Energy.....25

Capítulo 3

Figura 3.1: Passos para estruturação da economia do hidrogênio no Brasil.....43

Capítulo 4

Figura 4.1: Fluxograma da metodologia utilizada.....45

Capítulo 5

Figura 5.1: Número de publicações científicas por ano e palavra-chave (1970 a 2006).....51

Figura 5.2: Distribuição do número de publicações científicas por palavra-chave e por década.....54

Figura 5.3: Distribuição do número total de publicações científicas por palavra-chave.....54

Figura 5.4: Evolução do número de publicações em todo o mundo.....55

Figura 5.5: Crescimento relativo do número de artigos mundiais e dos selecionados de acordo com as palavras-chave, utilizando como base o ano de 1985.....56

Figura 5.6: Número de publicações científicas por década.....	56
Figura 5.7: Classificação das publicações científicas entre os países mais União Européia.....	57
Figura 5.8: Percentual das palavras-chave nas pesquisas dos países que mais produzem publicações científicas nas revistas pesquisadas neste trabalho.....	58
Figura 5.9: Distribuição do número de publicações científicas por palavras-chave e por década nos Estados Unidos.....	59
Figura 5.10: Distribuição do número de publicações científicas por palavras-chave e por década na Alemanha.....	60
Figura 5.11: Distribuição do número de publicações científicas por palavras-chave e por década no Japão.....	60
Figura 5.12: Consumo energético per capita, 2005.....	65

Capítulo 6

Figura 6.1: Gráfico de dispersão dos números de publicações entre <i>fuel cell e hydrogen</i>	71
Figura 6.2: Gráfico de dispersão dos números de publicações entre <i>fuel cell e greenhouse gas</i>	71
Figura 6.3: Gráfico de dispersão dos números de publicações entre <i>fuel cell e carbon capture and sequestration</i>	72
Figura 6.4: Gráfico de dispersão dos números dos artigos entre <i>hydrogen e greenhouse gas</i>	72
Figura 6.5: Gráfico de dispersão dos números de publicações entre <i>hydrogen e carbon capture and sequestration</i>	73
Figura 6.6: Gráfico de dispersão dos números de publicações entre <i>Greenhouse gas e carbon capture and sequestration</i> com a equação da reta e valor de R^2	75
Figura 6.7: Evolução do preço do petróleo e o número de artigos publicados com a palavra-chave <i>hydrogen</i>	75
Figura 6.8 Evolução nos preços do petróleo e o número de artigos publicados com a palavra-chave <i>fuel cell</i>	75
Figura 6.9 Cruzamento da palavra-chave <i>fuel cell</i> com os tipos de células a combustível.....	78

Figura 6.10: Relação dos países que mais pesquisam a aplicação automotiva das células a combustível.....	78
Figura 6.11: Relação dos países que mais pesquisam a aplicação estacionária das células a combustível.....	79
Figura 6.11: Cruzamento da palavra-chave <i>fuel cell</i> com os tipos de aplicações das células a combustível.....	80
Figura 6.13: Relação dos países que mais pesquisam células a combustível tipo PEM.....	81
Figura 6.14: Relação dos países que mais pesquisam células a combustível tipo SOFC.....	81
Figura 6.15: Fontes de produção de hidrogênio.....	84
Figura 6.16: Relação entre os países e as fontes para produção de hidrogênio.....	85

Lista de Tabelas

Capítulo 1

Tabela.1.1: Eventos internacionais sobre energia e meio ambiente.....	07
---	----

Capítulo 2

Tabela 2.1: Demanda mundial de hidrogênio.....	14
Tabela 2.2: Produção mundial de hidrogênio para grandes consumidores segundo as fontes utilizadas.....	14
Tabela 2.3: Características das principais células a combustível.....	20
Tabela 2.4: Aplicação das células a combustível em cada mercado.....	25

Capítulo 3

Tabela 3.1 Orçamento federal americano para o desenvolvimento da economia do hidrogênio, por ano fiscal.....	32
Tabela 3.2 Orçamento federal japonês para o desenvolvimento da economia do hidrogênio.....	40

Capítulo 4

Tabela 4.1 Amostra da base de dados H ₂ -CaC-Cient-Tec, a partir da palavra-chave <i>hydrogen</i>	48
--	----

Capítulo 5

Tabela 5.1: Número total de publicações por ano, por cada palavra-chave.....	52
Tabela 5.2: Classificação dos países que mais pesquisam dentro das palavras-chave analisadas neste trabalho considerando também os países da União Européia aqui agrupados.....	59
Tabela 5.3: Relação dos dez países com maior PIB	62

Tabela 5.4: Relação dos principais países exportadores de tecnologia.....	64
Tabela 5.5: Índice de consumo de energia per capita para alguns países em 2005.....	67
Tabela 5.6: Classificação para seleção dos países de acordo com os critérios estabelecidos.....	68

Capítulo 6

Tabela 6.1: Valores calculados de R^2 e Grau de Correlação (ρ) entre as palavras-chave Correlação entre as palavras-chaves, calculadas.....	74
--	----

Lista de Abreviaturas e Siglas

Fórmulas Químicas

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

CH₄ – Metano

H₂ – Hidrogênio

N₂ – Nitrogênio

Abreviações

CCTP - *Climate Change Technological Program*

CNUMAD – Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

COMGÁS – Companhia de Gás de São Paulo

COP – *Conference of Parties* (Convenção das Partes)

CSLF - *Carbon Sequestration Leadership Forum*

DOE – *Department of Energy*

EIA – *Energy Information Administration*

FMI – Fundo Monetário Internacional

GHG – *Greenhouse Gas* (Gases de Efeito Estufa – GEE)

IAHE – *International Association for Hydrogen Energy*

IEA - *International Energy Agency*

IPCC – *International Panel on Climate Change*

IPHE – *International Partnership for the Hydrogen Economy*

LH2/UNICAMP – Laboratório de Hidrogênio da Universidade Estadual de Campinas

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

METI - *Ministry of Economy, Trade and Industry*

mbd – milhões de barris/dia

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NETL - *National Energy Technology Laboratory*
OECD - *Organization for Economic Co-operation and Development*
OPEC – *Organizations of the Petroleum Exporting Countries* (OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo)
PIB – Produto Interno Bruto
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PROCaC - Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível
ProH2 - Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
UN – *United Nations* (ONU – Nações Unidas)
UNDP – *United Development Programme* (PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento)
UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change* (CQNUMC – Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas)
UNEP – *United Nations Environment Programme* (PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
USINFO – *U. S. Department of State's Bureau of International Information Programs*
WHEC – *World Hydrogen Energy Conference*

Células a Combustível

AFC - *Alkaline Fuel Cell* (Célula combustível alcalina)
MCFC - *Molten Carbonate Fuel Cell* (Célula a combustível de carbonato fundido)
PAFC - *Phosphoric Acid Fuel Cell* (Célula a combustível de ácido fosfórico)
PEMFC - *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (Célula a combustível de membrana de troca de prótons) ou SPFC - *Solid Polymer Fuel Cell* (Célula a combustível de polímero sólido)
SOFC - *Solid Oxide Fuel Cell* (Célula a combustível de óxido sólido)
DMFC - *Direct Methanol Fuel Cell* (Célula a combustível de metanol direto)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Objetivos.....	11
1.2 Estruturação do trabalho.....	11
2 TECNOLOGIAS DO HIDROGÊNIO E DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	13
2.1 Hidrogênio.....	13
2.2 Células a combustível.....	16
2.2.1 Tipos de células a combustível.....	17
2.2.2 Aplicações para as células a combustível.....	21
3 MONITORAMENTO TECNOLÓGICO.....	27
3.1 A metodologia do monitoramento tecnológico: bibliometria.....	30
3.2 Programas Governamentais.....	32
3.2.1 Estados Unidos.....	32
3.2.2 União Européia.....	37
3.2.3 Japão.....	39
3.2.4 Brasil.....	40
4 METODOLOGIA.....	44
4.1 Procedimentos metodológicos da pesquisa.....	44

4.2 Base de dados do universo científico-tecnológico: H2-CaC-Cient-Tec.....	46
4.3 Base de dados do universo governamental: H2-CaC-Gov.....	48
4.4 Correlações entre as palavras-chave.....	49
5 RESULTADOS.....	51
5.1 Resultados da base de dados: H2-CaC-Cient-Tec.....	51
5.2 Resultados base de dados: H2-CaC-Gov.....	61
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
6.1 Correlação entre as palavras chave.....	69
6.2 Hidrogênio e células a combustível.....	76
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	86
REFERÊNCIAS.....	91
ANEXO A.....	100
ANEXO B.....	104

1 INTRODUÇÃO

O hidrogênio foi descoberto pelo físico e químico inglês Henry Cavendish (1731-1810) em 1766, chamado por ele de ar inflamável, tendo recebido o nome atual em 1788, derivado do grego (*hydro + genes*), através do químico francês Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794), que mostrou que a combustão do hidrogênio resulta na produção de água. Já em 1783 o cientista e inventor francês Jacques Alexandre César Charles (1746-1823) iniciava as aplicações não energéticas do hidrogênio, utilizando este gás em balões mais leves que o ar (Britannica, 2007).

As aplicações energéticas do hidrogênio se iniciaram em 1792, quase trinta anos depois de sua descoberta, com o primeiro uso comercial do gás de iluminação (gás de carvão ou *town gas*) realizada pelo engenheiro e inventor escocês William Murdoch (1754-1839), ao iluminar sua residência em Redruth, Cornwall, Inglaterra (Britannica, 2007). Este gás, produzido a partir da gaseificação do carvão (oxidação parcial e/ou reforma a vapor), é constituído por uma mistura de hidrogênio, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), gás carbônico (CO₂), nitrogênio e uma série de outros compostos, sendo o teor de cada um destes compostos determinado pelas condições de operação do processo (com ou sem água, pressão, temperatura, tipo de gaseificador, etc) (U.S. Centennial of Flight Commission, 2007).

A partir do início do Século XIX esta aplicação energética do hidrogênio se espalhou pela Europa e Estados Unidos, chegando ao Brasil em 1854, na cidade do Rio de Janeiro, com a implantação da Fábrica de Gaz pelo empresário Irineu Evangelista de Souza, o Barão de Mauá (Britannica, 2007). Em São Paulo a introdução deste energético ocorreu apenas em 1872, quando a companhia inglesa *San Paulo Gas Company* (atual Companhia de Gás de São Paulo – COMGÁS) recebeu a autorização do Império através do decreto nº. 5071 para explorar a concessão dos serviços públicos de iluminação da cidade (Marques, 2006; Monteiro, 2002). No Brasil este gás recebeu a denominação de gás de rua.

A introdução das lâmpadas elétricas a partir da metade do Século XIX fez com que o gás de iluminação deixasse de ter esta aplicação. Este processo começou no Brasil em 1879, quando D. Pedro II introduziu a iluminação pública elétrica ao inaugurar um sistema de iluminação na Estação da Corte da Estrada de Ferro Central do Brasil, no Rio de Janeiro. Posteriormente, em 1883, a cidade de Campos – RJ, recebeu um sistema elétrico de iluminação pública, consolidando a substituição do gás de rua pela eletricidade (Lamarão, 1970). O uso deste gás passou a ser a geração de calor fornecida às residências, comércio e empresas como combustível. A forma de sua produção também se modificou ao longo do tempo, passando do uso do carvão para hulha, nafta e outros combustíveis, mas mantendo sempre um teor elevado de hidrogênio.

A partir do início dos anos 1980, a disponibilidade de gás natural da Bacia de Campos – RJ fez com que o gás de rua fosse progressivamente sendo substituído pelo gás natural, tanto no Rio de Janeiro (com início em 1983) como em São Paulo (1988), deixando o hidrogênio de ter esta aplicação energética no país.

O uso de hidrogênio puro em sistemas energéticos remonta aos experimentos do engenheiro alemão Rudolf Erren nos anos 20 do Século XX, convertendo motores de combustão interna de caminhões, ônibus e até submarinos para o uso deste gás, exclusivamente ou em misturas (Earthscape, 2007). Os ensaios com hidrogênio líquido em aviões resultaram no uso deste combustível em foguetes a partir dos anos 1960 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dos Estados Unidos (em 1966 foi lançado o primeiro foguete *Atlas-Centaur* utilizando hidrogênio líquido). Atualmente este combustível é utilizado nos principais lançadores de satélites e espaçonaves, como nos ônibus espaciais norte-americanos (*Space Shuttle*), nos lançadores europeus Ariane e nos russos Próton-M. (U.S. Centennial of Flight Commission, 2007).

Já o uso intensivo do hidrogênio como energético só foi cogitado, ainda assim por poucos especialistas, na segunda metade dos anos 1970, durante o período conhecido como da Crise do Petróleo, iniciado com o primeiro Choque do Petróleo (1973-1979). Nesse período ocorreu o aumento do preço do petróleo e também o controle de sua produção por parte da Organização dos

Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Como nesta época a dependência de muitos países por petróleo era grande, houve várias tentativas por parte destes de substituir o petróleo por outras fontes de energia, sendo o hidrogênio considerado um vetor energético em diversos casos, principalmente para a regularização do suprimento das fontes intermitentes, como as renováveis. Portanto, o hidrogênio passou a ser uma alternativa economicamente viável em algumas aplicações, devido ao elevado preço dos derivados do petróleo. Entretanto, é importante ressaltar que nesta época o uso do hidrogênio como energético foi apresentado apenas como um substituto aos derivados do petróleo e não como resultado de uma preocupação ambiental.

Para o caso brasileiro, a política energética adotada naquela época priorizou o aumento da produção interna de petróleo, o aumento da produção de eletricidade a partir das hidroelétricas e da energia nuclear e a implantação do Proálcool (Furtado, 1985). Neste período, se constituiu também algumas das principais organizações e grupos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), nacionais e internacionais, que vêm desde então realizando importantes avanços tecnológicos, estudos estratégicos e elaborando programas de utilização deste energético. De fato, a *International Association for Hydrogen Energy* (IAHE) foi criada em 1974, sendo responsável desde este ano pela realização bianual da importante *World Hydrogen Energy Conference* (WHEC). No Brasil, o Laboratório de Hidrogênio (LH2) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) foi criado em 1975 e o Grupo de Eletroquímica do Instituto de Física e Química da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos, em 1980.

O segundo Choque do Petróleo, ocorrido em 1979, ampliou a idéia do uso do hidrogênio como energético, mas a redução dos preços do petróleo no início dos anos 1980 fez com que esta e outras propostas de energias alternativas fossem preteridas. A Figura 1.1 retrata a evolução dos preços internacionais de petróleo relacionados com os respectivos eventos.

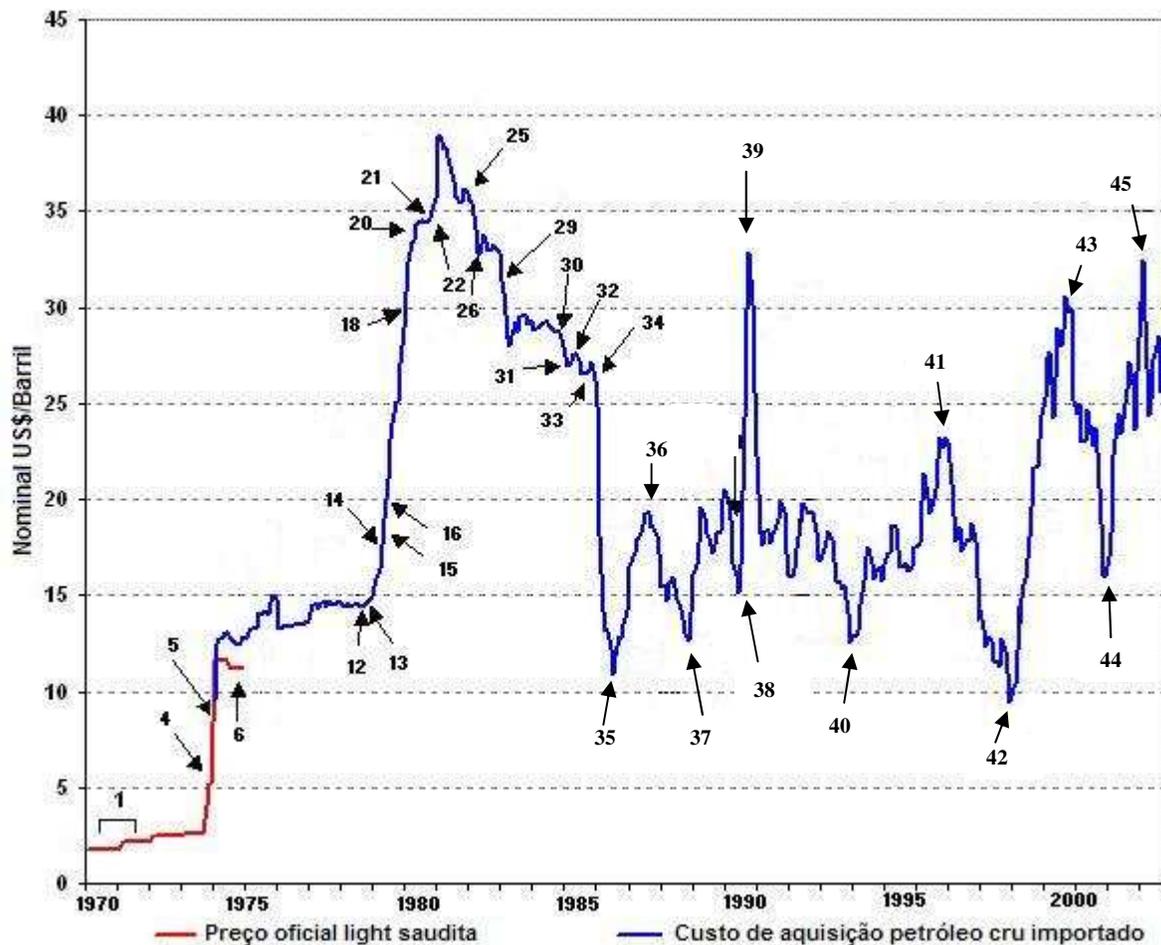


Figura 1.1: Evolução dos preços internacionais do barril de petróleo.

Fonte: EIA, 2007.

Notas:

1. A OPEP começou a afirmar o poder; aumentaram o custo das taxas e fixaram os preços.
4. Outubro de 1973 foi o início do embargo do petróleo.
5. A OPEP congelou os preços afixados.
6. Março de 1974 foi o fim do embargo do óleo.
12. A OPEP decidiu aumentar o preço em 14,5% para 1979.
13. Revolução Iraniana: o Xá foi deposto.
14. A OPEP aumentou os preços em 14,5% em 1º de Abril de 1979.
15. Período em que os Estados Unidos deixaram de controlar os preços.
16. A OPEP aumentou os preços em 15%.
18. Sauditas aumentaram o preço do petróleo de US\$ 19/bbl para US\$ 26/bbl.

20. Os cortes da produção de Kuwait, Irã e Líbia fizeram cair a produção de petróleo da OPEP para 27 milhões de barris/dia.
21. Sauditas aumentaram para US\$ 28/bbl.
22. Sauditas aumentaram para US\$ 34 /bbl.
25. Preços do mercado *spot* dominaram os preços oficiais da OPEP.
26. Os Estados Unidos boicotaram petróleo da Líbia; OPEP planejou a produção de 18 milhões de barris/dia.
29. OPEP cortou os preços em US\$ 5/bbl e concordaram em produzir 17,5 milhões de barris/dia – Janeiro de 1983.
30. Noruega, Reino Unido e Nigéria baixaram os preços.
31. A OPEP concordou com o corte do preço para US\$ 28/bbl.
32. Produção da OPEP caiu para 13,7 milhões de barris/dia.
33. Os árabes uniram-se ao preço *spot* e iniciaram o aumento da produção – Junho de 1985.
34. Produção OPEP alcançou 18 milhões de barris/dia.
35. Amplo uso dos valores *netback*.
36. Amplo uso de preços fixados (tabelados).
37. O petroleiro “Valdez”, da EXXON, derramou 41,69 milhões de litros de petróleo cru.
38. A OPEP elevou o teto de produção para 19,5 milhões de barris/dia – Junho de 1989.
39. Iniciou-se a operação “Tempestade no deserto”; 17,3 milhões de barris de petróleo (SPR) vendidos foram concedidos.
40. Kuwait aumentou a produção para 560.000 barris/dia no desafio de quota da OPEP.
41. Estados Unidos lançou ataque de mísseis no sul do Iraque após uma invasão de curdos em áreas de abrigo seguro no Iraque do Norte.
42. A oferta de petróleo mundial aumentou para 2,25 milhões de barris por dia em 1997. Foi o grande aumento anual da oferta desde 1988.
43. O presidente Clinton, dos Estados Unidos, autorizou a liberação de 30 milhões de barris de petróleo da reserva estratégica de petróleo, além de 30 dias para amparar o fornecimento de petróleo, particularmente para aquecimento no Nordeste dos Estados Unidos. De acordo com Vargas (2004), atribuiu-se o aumento do preço do petróleo no período compreendido entre 1998 e 2000 às motivações políticas relacionadas à prevalência de crises como a guerra no Iraque, as

tensões em relação ao Irã e as incertezas na Venezuela e Rússia. Entre 2000 e 2003, a demanda mundial passou de 76,3 mbd (milhões de barris/dia) para 80,9 mbd. No entanto, a oferta também aumentou, passou de 76,9 mbd para 81,8 mbd em decorrência do aumento da produção de petróleo nos países da Antiga União Soviética (Nonnenberg, 2004)

44. Ataque terrorista de 11 de Setembro de 2001 nos Estados Unidos, provocando a seguir o aumento no preço do petróleo.

45. Conturbação contínua na Venezuela e antecipação dos comercializadores de petróleo à iminente ação militar no Iraque causaram elevação dos preços em Janeiro e Fevereiro de 2003.

Conforme mencionado, a idéia do uso energético intensivo do hidrogênio desenvolvida nos anos 70 referiu-se a uma substituição dos derivados do petróleo, caros, por alternativas economicamente competitivas e implicou no uso de outras fontes de energia para a produção deste gás, como o carvão (processos de gaseificação com ou sem reforma) e a energia nuclear (processo de eletrólise), fontes estas com grande disponibilidade na maioria dos países desenvolvidos. Percebe-se então a ausência, ou a falta de ênfase, de preocupações ambientais relacionadas a esta idéia. Conseqüentemente, a redução dos preços do petróleo no início dos anos 80 tornou economicamente inviável esta alternativa e reduziu em muito o interesse na tecnologia e economia do hidrogênio.

De qualquer forma, ficou claro para a grande maioria das pessoas que a disponibilidade do petróleo não seria *ad eternum*. Este aspecto da finitude dos recursos naturais já havia sido colocado em 1972 com a divulgação do Relatório Limites do Crescimento (Meadows, 1972) pelo Clube de Roma que, apesar de seus muitos equívocos, se constituiu em um importante alerta sobre a necessidade de se conter o uso indiscriminado dos recursos naturais e se buscar alternativas sustentáveis para o suprimento destes recursos. No caso da produção de energia, estas questões conduziram à busca de melhores rendimentos para os sistemas que utilizam fontes fósseis e investimentos em P&D para as fontes renováveis.

A vertente ambiental associada ao uso energético do hidrogênio sempre fez parte dos argumentos a favor do uso deste gás, mas nos anos 70 este aspecto não se revestia de fundamental importância. De fato, um dos marcos da conscientização ambientalista, o Relatório Bruntland

“Nosso Futuro Comum”, no qual surge o conceito de desenvolvimento sustentável, definido como sendo o desenvolvimento que atende as necessidades da geração do presente sem prejudicar as gerações futuras, só foi publicado em 1987, cerca de 10 anos após a Crise do Petróleo. Conforme pode ser visto na Tabela 1.1, a qual apresenta vários eventos importantes sobre energia e meio ambiente no mundo.

Tabela 1.1: Eventos internacionais sobre energia e meio ambiente.

ANO	OCORRÊNCIA
1972	Relatório do Clube de Roma sobre os “Limites do Crescimento” Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, em Estocolmo Criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA
1973	1º Choque do Petróleo: 1973-1979
1979	2º Choque do Petróleo: 1979-1982 Primeira Conferência Mundial sobre o Clima
1987	Publicação do Relatório Brundtland “Nosso Futuro Comum”
1990	<i>International Panel on Climate Change</i> - IPCC Segunda Conferência Mundial sobre o Clima
1992	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) ou ECO-92 Convenção Quadro das Nações Unidas de Mudanças Climáticas (CQNUMC) ou <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (UNFCCC) Agenda 21 Convenção sobre a Diversidade Biológica e os Princípios Florestais
1997	Protocolo de Quioto é adotado
1998	Protocolo de Quioto é aberto para assinaturas
2000	Conferência Cúpula do Milênio
2001	Protocolo de Quioto não é ratificado pelos Estados Unidos
2002	Cúpula Mundial para o Desenvolvimento Sustentável - Johannesburg - África do Sul
2003	IPHE – <i>International Partnership for the Hydrogen Economy</i> - EUA
2004	Protocolo de Quioto é ratificado pela Rússia
2005	Protocolo de Quioto entra em vigor em 16/02/2005

Fonte: Elaboração própria a partir de informações no site do Ministério da Ciência e Tecnologia em Mudanças Climáticas, 2006.

Com a realização da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, em Estocolmo, em 1972 criou-se o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Em 1990, o IPCC (*International Panel on Climate Change*) publicou seu primeiro relatório, que serviu de base para as negociações na Convenção sobre Mudanças Climáticas, em 1992. Este relatório apresentou as avaliações do IPCC sobre o sistema climático e suas possíveis mudanças,

os impactos sociais, ambientais e econômicos decorrentes dessas mudanças e as possíveis respostas a esses impactos.

O debate a respeito da questão ambiental passou então a ser enfatizado no mundo todo, dentro de um contexto amplo de qualificação de desenvolvimento que superava a visão tradicional do passado a respeito da questão. Esta “nova qualificação de desenvolvimento” enseja uma aliança entre crescimento econômico e sustentabilidade ambiental (Silva & Barbosa, 2003; Negrão, 2003). Para exemplificar vale citar a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD)¹, na cidade do Rio de Janeiro em 1992, também conhecida como ECO-92. A ECO-92 intensificou o debate a respeito das questões ambientais e possibilitou que fossem assinados uma série de compromissos internacionais visando minimizar os impactos ambientais, como a Agenda 21 e a Convenção sobre a Diversidade Biológica e os Princípios Florestais (MCT, 2006).

Um dos principais resultados desta conferência foi a Convenção Quadro das Nações Unidas de Mudanças Climáticas (CQNUMC ou *United Nations Framework Convention on Climate Change* - UNFCCC), reflexo de uma das grandes preocupações ambientais atuais: às mudanças climáticas e sua relação com o aumento das concentrações dos denominados *Greenhouse Gases*². Como proposta de solução a este problema, em 1997 foi elaborado o Protocolo de Quioto, no Japão, que tem entre seus objetivos fixar metas para a redução do dióxido de carbono, CO₂, na atmosfera, principal gás causador do efeito estufa, de acordo com Hinostroza (2000).

O Protocolo de Quioto entrou em vigor, no ano de 2005, com a assinatura de aproximadamente 156 países. O Protocolo, ao fixar metas para a redução das emissões de GHG, para os países enquadrados no Anexo I da Convenção de Mudanças Climáticas³ e introduzir mecanismos de negociação de créditos de carbono, tornou-se um importante facilitador para a

¹ A CNUMAD é também conhecida como Rio-92 e Cúpula da Terra.

² Optou-se pela citação em inglês para facilitar a leitura e sua identificação nas diversas fontes de informação. *Greenhouse Gases* (GHG) ou Gases de Efeito Estufa (GEE).

³ Países enquadrados no Anexo I da Convenção de Mudanças Climáticas: Estados Unidos, Federação Russa, Japão, Alemanha, Grã-Bretanha, Irlanda do Norte, Canadá, Itália, Polônia, França, Austrália, Espanha, Países Baixos, República Checa, Romênia, Bélgica, Bulgária, Grécia, Hungria, Áustria, Dinamarca, Eslováquia, Finlândia, Suécia, Estônia, Noruega, Portugal, Suíça, Irlanda, Letônia, Nova Zelândia, Luxemburgo, Islândia, Liechtenstein, Mônaco.

adoção de fontes renováveis de energia e também, indiretamente, da tecnologia e economia do hidrogênio, que aparece nestes casos como um vetor energético.

Entretanto, não houve consenso sobre as diretivas deste Protocolo, de forma que alguns países não ratificaram este documento. Entre estes países destacam-se os Estados Unidos, um dos principais responsáveis pelas atuais emissões de GHG. A Resolução *Byrd-Hagel* do Senado Americano datada de 25/07/1997 deixou claro que a negativa dos Estados Unidos em ratificar o Protocolo de Quioto foi motivada por interesses econômicos, uma vez que a implementação do Protocolo resultaria em sérios danos para a economia americana (The National Center for Public Policy Research, 2006).

Esta decisão conduziu o governo americano a buscar alternativas às premissas do Protocolo de Quioto para a redução das emissões de GHG, sem que, entretanto estas alternativas significassem uma mudança importante no perfil de produção e uso dos recursos energéticos adotado pelos Estados Unidos. O caminho escolhido recaiu sobre o desenvolvimento de tecnologias “mais limpas⁴”, principalmente aquelas que evitam a emissão de GHG à atmosfera. De acordo com Camargo (2004) a estratégia americana passa pela descarbonização⁵ dos combustíveis fósseis, ou seja, pela extração do hidrogênio dos hidrocarbonetos fósseis e seu uso energético, principalmente em *fuel cell* (células a combustível), onde este uso alcança as maiores eficiências. Estes conversores de energia se constituem no objeto primeiro deste estudo, sendo por hora necessário apresentar apenas sua trajetória tecnológica até os dias de hoje.

O princípio de funcionamento das células a combustível foi descoberto pelo químico suíço/alemão Christian Friedrich Schönbein (1799-1868) em 1838, mas foi o químico e juiz britânico Sir William Robert Grove (1811-1896) que mostrou a aplicação prática deste princípio

⁴ A definição de uma tecnologia “mais limpa” é determinada historicamente, uma vez que se refere a um conjunto de informações e conhecimentos (estabilizados ou não) num dado momento no tempo sobre o problema ambiental em questão e sobre as possibilidades técnicas disponíveis para sua solução (ou aquelas em desenvolvimento ou ainda aquelas alternativas tecnológicas cujo desenvolvimento é julgado possível e desejável por uma comunidade técnico-científica relevante e representativa). Essa definição depende, portanto, de uma consolidação dessas informações e conhecimentos, detidos por uma miríade de especialistas, os quais não terão, necessariamente, opiniões convergentes (Corazza, 2001).

ao construir uma bateria voltaica a gás em 1839, utilizando hidrogênio e oxigênio (Fuel Cell Today, 2007-a). O termo *fuel cell* (célula a combustível) foi criado em 1889 pelo químico inglês (nascido alemão) Ludwig Mond (1839-1909) e seu assistente Charles Langer, que construíram o primeiro dispositivo prático, utilizando gás de carvão e ar (Fuel Cell Today, 2007-b).

Passaram-se 70 anos até que em 1959 o engenheiro britânico Francis Thomas Bacon (1904-1992) construiu a primeira célula a combustível tipo alcalina (eletrólito de hidróxido de potássio – KOH), com as características das células atuais. Utilizando hidrogênio e oxigênio, esta célula tinha uma capacidade de produzir 5 kW de energia elétrica (Fuel Cell Today, 2007-c). Apesar dos avanços técnicos e algumas aplicações, como o trator de 20 HP do engenheiro da *Allis-Chalmers Manufacturing Company* Harry Karl Ihrig, em 1959 (Fuel Cell Today, 2007-d), nos anos 60 as células a combustível tiveram sua importância apenas nas aplicações aeroespaciais, uma vez que a NASA utilizou estes dispositivos para a geração de eletricidade e água nos projetos Gemini (células tipo PEM desenvolvidas pela empresa *General Electric*) e *Appolo* (células tipo alcalina fabricadas pela empresa *Pratt & Whitney*) (Fuel Cell Today, 2007-e).

Nos anos 1970, com o advento da Crise do Petróleo as células a combustível foram consideradas para aplicações terrestres, juntamente com o hidrogênio, mas também perderam importância quando os preços do petróleo declinaram no início dos anos 1980. Porém, um interesse maior pelas células a combustível somente ocorreu em meados dos anos 1990, com o aumento das preocupações ambientais tomando proporções nunca vistas a partir da busca, principalmente pelos Estados Unidos, para alternativas ao Protocolo de Quioto.

Assim, a hipótese deste trabalho é que a tecnologia do hidrogênio e das células a combustível ganhou importância em meados dos anos 90 como uma proposta, dos países desenvolvidos, de dar continuidade ao uso de combustíveis fósseis.

⁵ A descarbonização ocorre com a gradual substituição de fontes de energia ricas em carbono por fontes de energia

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é identificar o tipo de célula a combustível e a fonte de energia para obtenção do hidrogênio mais pesquisada, no período compreendido entre os anos de 1970 e 2006, bem como verificar os recursos governamentais destinados para programa de P&D em hidrogênio e células a combustível. A metodologia utilizada foi a bibliometria em que a identificação do tipo de célula a combustível e da fonte de energia para obtenção do hidrogênio baseou-se na busca de um conjunto de periódicos científicos de grande circulação, reunindo registros sobre artigos científicos do mundo inteiro.

Os itens seguintes constituem objetivos específicos deste trabalho:

1. Verificar se as células a combustível serão utilizadas e se é possível prever quando;
2. Investigar qual o combustível preponderante para a produção de hidrogênio;
3. Identificar quais os países que pretendem utilizar o petróleo;
4. Dentre os países, identificar quem pode ou pretende utilizar energias renováveis.

1.2 Estruturação do trabalho

Para se alcançar os objetivos propostos, a tese foi organizada em sete capítulos, descritos a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: representada por este capítulo.

Capítulo 2 e Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica que foi dividida em dois capítulos, dada a natureza diversa dos tópicos abordados. Tecnologias do Hidrogênio e das Células a Combustível (Capítulo 2): este capítulo aborda a revisão bibliográfica da tecnologia do hidrogênio e da célula a combustível, formas de produção de hidrogênio, suas aplicações energéticas, o funcionamento

das células a combustível e suas aplicações automotivas e estacionárias. Monitoramento Tecnológico (Capítulo 3): a revisão bibliográfica está focada na apresentação das principais ferramentas utilizadas para realização do monitoramento dos periódicos científicos e dos programas governamentais.

Capítulo 4 - Metodologia: está apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 5 – Resultados: são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia.

Capítulo 6 – Análise dos Resultados e Discussões: é apresentada a análise dos resultados desenvolvidos no Capítulo 5.

Capítulo 7 – Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos: são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho, bem como as recomendações para próximos trabalhos.

2 TECNOLOGIAS DO HIDROGÊNIO E DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Como mencionado no Capítulo 1, o uso energético do hidrogênio aparece hoje associado às aplicações das células a combustível. Portanto, este tópico apresenta características relativas ao uso energético do hidrogênio e ao funcionamento das células a combustível.

2.1 Hidrogênio

As fontes de energia ou energias primárias são as que se encontram disponíveis na natureza como, por exemplo, o petróleo, o gás natural, a energia hidráulica, a biomassa, entre outras. Elas são classificadas em:

- energias não-renováveis: petróleo, gás natural, carvão, urânio; ou
- energias renováveis: energia solar, eólica, biomassa, hidráulica, geotérmica.

As energias secundárias são aquelas que não se encontram diretamente disponíveis na natureza e necessitam da intervenção do homem para serem produzidas, como por exemplo, a eletricidade e o hidrogênio (Silva, 1991).

O hidrogênio, enquanto um energético secundário pode ser obtido de muitas fontes, renováveis ou não, estando, entretanto, fora do escopo deste trabalho analisar ou considerar todas as formas de produção deste combustível. Para maiores detalhes sobre os processos tecnologicamente disponíveis para a produção de hidrogênio encontra-se disponível extensa literatura técnica como, por exemplo, Silva (1985, 1991, 2003) e Larminie (2003).

O mercado mundial de hidrogênio estimado até 2003 está mostrado na Tabela 2.1, que indica um uso deste energético em células a combustível da ordem de 1% do total, ou seja, até

2003 esta aplicação do hidrogênio foi muito pequena em relação aos demais usos e, conseqüentemente, a quantidade de eletricidade produzida desta forma pode ser considerada desprezível (Silva *et al*, 2003).

Tabela 2.1: Demanda mundial de hidrogênio⁶.

SETOR	CONSUMO MUNDIAL DE HIDROGÊNIO (10 ⁹ M ³ ANO ⁻¹)						
	1995	1996	1997	1998	2003	TMCA* (%)	
						1995-1998	1998-2003
Grandes Consumidores	559,7	534,5	551,1	553,2	687,1	- 0,5	4,4
Mercado (exceto célula a combustível)	222,4	244,3	251,1	288,0	338,6	4,1	3,3
Célula a Combustível	5,9	7,4	8,1	10,3	12,8	20,0	4,3
Total	788,0	786,2	810,3	851,5	1038,5	3,9	4,4

*TMCA = Taxa média de crescimento anual.

Fonte: Silva *et al*, 2003.

Outro fator importante a ser considerado são as fontes atualmente utilizadas para a produção industrial do hidrogênio, o que está mostrado na Tabela 2.2. Como se pode ver, as fontes primárias não renováveis ou fósseis são responsáveis por mais de 95% desta produção, significando que as tecnologias associadas aos processos que empregam estas fontes encontram-se maduras e disponíveis caso a produção do hidrogênio venha a ser intensificada nos próximos anos de acordo com a Figura 2.1 (Silva *et al*, 2003).

Tabela 2.2: Produção mundial de hidrogênio para grandes consumidores segundo as fontes utilizadas.

FONTE	VOLUME (10 ⁹ M ³ ANO ⁻¹)	PARTICIPAÇÃO
Gás natural	240	48%
Petróleo	150	30%
Carvão	90	18%
Eletrólise (fontes diversas)	20	4%
Total	500	100%

Fonte: Silva *et al*, 2003.

⁶ Calculado a partir de BCC Inc, (2002). A *Business Communications Company Inc*, empresa americana de análise de mercado de tecnologias, apresentou para a década de 90 a Taxa Média de Crescimento Anual (TMCA) para a demanda mundial de hidrogênio no período 1995-98 e projetou o crescimento para o período 1998-2003.

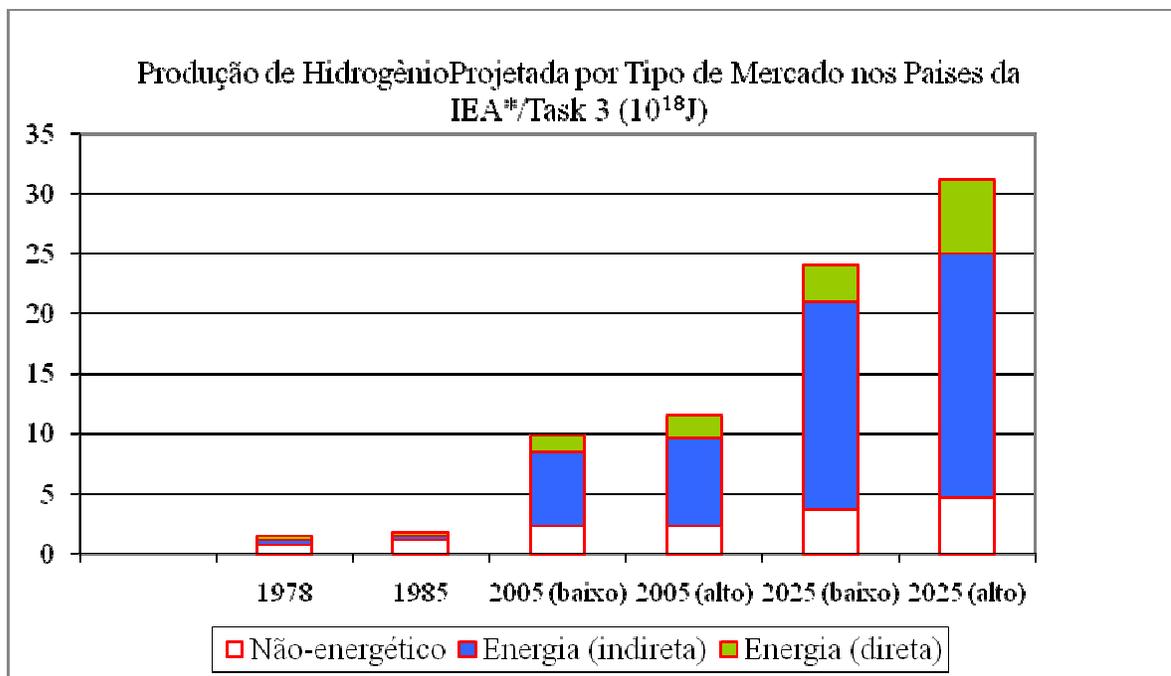


Figura 2.1: Projeção da produção de hidrogênio até 2025.
Fonte: IEA/HIA, 2004.

Notas:

1. Energia direta: aquecimento, transporte, distribuidoras e concessionárias de energia elétrica, dispositivos portáteis;
2. Energia indireta: produção de combustíveis, sintéticos, geração de eletricidade, dessulfurização, células a combustível a metanol e ciclos combinados; e
3. Não-energético, ou seja, o hidrogênio é usado como insumo químico: síntese de amônia, síntese de metanol, hidrogenação, metalurgia, manufatura eletrônica, vidraria, refrigeração de geradores elétricos.

* Países da IEA: Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Tcheca, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Luxemburgo, Países Baixos, Portugal, República Eslovaca, Espanha, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Grécia, Hungria, Suécia, Irlanda, Suíça, Turquia, Itália, Reino Unido, Japão, Estados Unidos.

No caso da eletrólise, apesar de ser um processo bastante conhecido e utilizado há décadas, quando a eletricidade é produzida por fontes alternativas, como solar fotovoltaica ou eólica, diretamente conectada aos eletrolisadores (geração distribuída ou em sistemas isolados), ainda há

dificuldades tecnológicas a serem superadas, existindo pesquisas em curso para a solução destas dificuldades (Camargo, 2004; Apolinário, 2004).

Portanto, pode-se concluir que com relação à produção de hidrogênio existem hoje tecnologias prontas para atender um eventual aumento da demanda por conta da ampliação do uso deste energético. O mesmo já não ocorre atualmente com as células a combustível, como mostrado a seguir.

2.2 Células a Combustível

Células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química de alguns combustíveis em energia elétrica e calor, o que resulta em uma geração de energia com maior eficiência e menor impacto ambiental quando comparadas com os sistemas convencionais de combustão interna, visto que as etapas intermediárias de produção de calor e de trabalho mecânico destes últimos são evitadas (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000). O combustível utilizado pela maioria das células é o hidrogênio, mas alguns tipos podem utilizar diretamente gás natural e outros hidrocarbonetos como metanol.

O princípio de funcionamento de uma célula a combustível também é conhecido por eletrólise reversa, uma vez que o processo é basicamente o contrário daquele verificado na eletrólise da água. Em uma célula tipo polímero sólido (PEMFC), por exemplo, o hidrogênio é introduzido no ânodo, onde o catalisador que recobre este eletrodo dissocia a molécula de hidrogênio, separando os átomos em prótons e elétrons, sendo estes últimos retidos no ânodo, tornando-o eletronegativo. O cátodo, com a presença do oxigênio, torna-se eletropositivo. Com isso estabelece-se uma diferença de potencial entre os eletrodos, o que permite a circulação de corrente (elétrons) entre eles, através de um circuito externo. O íon positivo (H^+), o próton, que atravessou o eletrólito em direção ao cátodo, combina-se com os íons hidroxila formados no cátodo resultando em água (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000). A Figura 2.2 mostra as trocas iônicas que ocorrem em cada tipo de célula (Camargo, 2004).

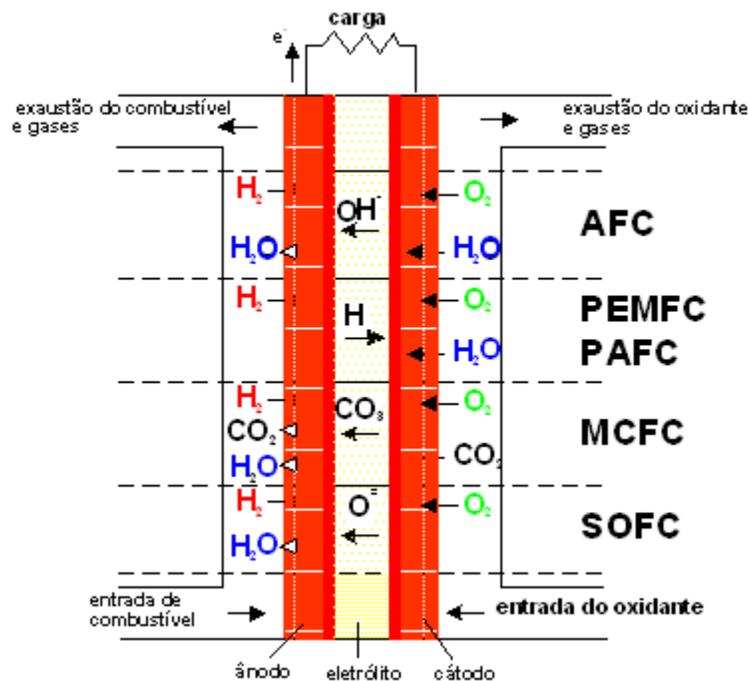


Figura 2.2: Reações eletroquímicas que ocorrem em cada tipo de célula a combustível.
 Fonte: Camargo, 2004.

2.2.1 Tipos de células a combustível

O interesse despertado na tecnologia das células a combustível nos últimos anos está baseado em dois fatores principais: eficiência de conversão e baixas emissões. Por não ser uma máquina térmica e, portanto, não limitada pelo Ciclo de Carnot, as células a combustível apresentam eficiências de conversão superiores aos motores de combustão interna. Aliado a isso, a reação entre hidrogênio e oxigênio produz apenas água como subproduto (Camargo, 2004).

De modo geral as vantagens que as células a combustível e as suas plantas oferecem são (Appleby, 1993):

- conversão direta da energia (energia química – energia elétrica);
- nenhuma parte móvel na célula a combustível (stack), menor manutenção;
- flexibilidade para obtenção do hidrogênio; e
- instalações modulares.

Vários são os tipos de células a combustível que estão sendo desenvolvidos. Cada tipo possui características mais adequadas a certas aplicações. A classificação das células a combustível dá-se normalmente pelo tipo de eletrólito e temperatura nas quais operam. Assim, as principais tecnologias atualmente em desenvolvimento e em utilização são (Appleby, 1993):

- AFC – Célula a combustível alcalina (*Alkaline Fuel Cell*);
- MCFC – Célula a combustível de carbonato fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell*);
- PAFC – Célula a combustível de ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell*);
- PEMFC – Célula a combustível de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Também chamada de SPFC – Célula a combustível de polímero sólido (*Solid Polymer Fuel Cell*);
- SOFC – Célula a combustível de óxido sólido (*Solid Oxid Fuel Cell*); e
- DMFC – Célula a combustível de metanol direto (*Direct Metanol Fuel Cell*).

As principais características das células a combustível citadas acima são descritas a seguir de acordo com o Fuel Cell Handbook (2004) e DOE (2000).

Na Célula a Combustível Alcalina (AFC), o eletrólito é constituído de hidróxido de potássio (KOH) concentrado (85% g/g), em células projetadas para operação em alta temperatura (~260 °C); ou menos concentrado (35% - 50 % g/g), para temperaturas mais baixas (< 120 °C). Essas células a combustível operam em várias temperaturas e são consideradas as mais eficientes, com eficiência de produção de eletricidade podendo chegar a 60%, e foram as primeiras a serem desenvolvidas para as naves espaciais tripuladas, onde há hidrogênio puro disponível. Neste tipo de célula uma ampla faixa de catalisadores pode ser usada, tais como: Ni, Ag, óxidos metálicos, spinels e metais nobres. A desvantagem da AFC é que não pode operar na presença de dióxido de carbono (CO₂), nem no combustível nem no oxidante. Até pequenas quantidades de CO₂ no ar podem ser prejudiciais. Portanto, este tipo de célula é geralmente utilizada para aplicações onde hidrogênio e oxigênio puros são disponíveis. (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000).

Na Célula a Combustível de Carbonato Fundido (MCFC), sua temperatura de operação encontra-se na faixa de 600-650 °C sendo, portanto mais baixa que a SOFC. É consideravelmente mais eficiente que a PAFC. Sua vantagem consiste em fazer a reforma do combustível dentro da célula, dispensando o reformador externo. O calor dissipado pode ser utilizado para cogeração. Não usa catalisadores de metais preciosos. A desvantagem da MCFC reside na corrosividade do eletrólito de carbonato fundido (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000).

A Célula a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC) opera a temperatura de 200 °C e pressão de 8 atm, utilizando hidrogênio proveniente de reforma de um combustível e ar como reagentes. Sua mais baixa temperatura de operação (de 160 – 220 °C) foi considerada mais apropriada para pequenas e médias unidades geradoras de eletricidade. Sua vantagem consiste em o eletrólito ser tolerante ao CO₂. A tecnologia da PAFC encontra-se madura e em estágio comercial. Assim como a MCFC o calor dissipado pode ser utilizado para cogeração. A desvantagem dessa célula refere-se ao eletrólito líquido que deve ser mantido sempre aquecido e isso implica em gasto de energia quando a célula não está em operação (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000).

Em relação a Célula de Eletrólito Polimérico (PEMFC), seu eletrólito consiste de uma membrana sólida entre dois eletrodos porosos de carbono e utiliza platina como catalisador. Em geral, operam em vários níveis de pressão e abaixo de 100°C. A temperatura de operação é limitada porque os polímeros condutores de prótons atualmente disponíveis dependem de água para ter condutividade aceitável. A vantagem da PEM é sua partida rápida (< 1 minuto) e sua baixa temperatura de operação (< 100 °C). A tecnologia da PEMFC encontra-se madura e em estágio comercial para algumas aplicações. Sua desvantagem consiste na baixa tolerância à presença de CO (< 30 μmol.mol⁻¹ para o estágio atual de desenvolvimento). Utiliza catalisador de metal precioso, a platina (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000).

Na Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC), sua temperatura de operação encontra-se entre 800 e 1.000 °C e sua vantagem é ser tolerante às impurezas como CO e CO₂. Essa célula é altamente eficiente quando operando em cogeração e pode reformar internamente os

combustíveis hidrocarbonetos, podendo usar muitos combustíveis como gás natural, gasolina, álcool e gás de carvão. Sua desvantagem é o longo tempo de partida (> 1 h em grandes plantas), além de ser de difícil construção (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000).

A Célula a Combustível Metanol Direto (DMFC), a temperatura de operação está entre 50 e 100 °C e seu eletrólito é um polímero fino similar ao da PEMFC. Neste tipo de célula o metanol não é reformado em gás hidrogênio, mas usado diretamente, operando a baixa temperatura. A desvantagem da DMFC é a utilização de um combustível tóxico, o metanol e sua baixa eficiência de conversão (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000). A Tabela 2.3 sumariza as principais características das células a combustível.

Tabela 2.3: Características das principais células a combustível.

TIPO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL	EFICIÊNCIA ELÉTRICA	TEMP (°C)	ELETRODOS	ELETRÓLITOS	COMBUSTÍVEL	AGENTE DE OXIDAÇÃO
AFC	35% - 55%	60 a 80	Ânodo: eletrodos de Ni sinterizado ou eletrodo chapeado de Pd ou Pd-Ag. Cátodo: eletrodos de NiO (enriquecido com Li).	45% KOH a 28,5 atm. ou 80% a 85% KOH para pressões entre 2 e 3 atm.	H ₂ puro	O ₂ puro
MCFC	>50%	600 a 700	Ânodo: liga de níquel e metais tais como cromo. Cátodo: eletrodos de NiO enriquecido com Li.	Mistura de carbonatos alcalinos fundidos (basicamente Na, K e Li).	H ₂ , CO (monóxido de carbono), hidrocarboneto	O ₂ (impuro) ar
PAFC	40%	160 a 220	Eletrodos de metal e carbono poroso com limite trifásico; eletrodos de metal catalítico e óxidos.	H ₃ PO ₄ 95%-97% em peso	H ₂ puro. Eletrodos cobertos: gás reformado ou gás de carvão	O ₂ puro ar
PEMFC	35% - 45%	60 a 100	Eletrodos de metal em suporte de carbono com cobertura catalítica.	Membrana polimérica	H ₂ puro	O ₂ puro ar
SOFC	>50%	800 a 1200	Cátodo: Manganato de lantânio dopado com estrôncio; Ânodo: cermet de Ni-ZrO ₂ em suporte de YSZ	Liga estabilizada de ítrio-zircônio (ZrO ₂ e 8-10% de Y ₂ O ₃ ; YSZ).	H ₂ , CO, hidrocarboneto	ar
DMFC	>40%	50 A 100			Álcool metanol	

Fonte: Hoogers, 2003 e DOE, 2000 apud Camargo (2004).

2.2.2 Aplicações para as células a combustível

A célula a combustível é um gerador de energia elétrica como as baterias. Ambas transformam a energia química em energia elétrica. A diferença básica é que as baterias necessitam ser recarregadas e a célula a combustível fornece energia elétrica enquanto houver hidrogênio sendo fornecido (Camargo, 2004).

As características das células a combustível colocaram essa tecnologia como alternativa de geração de energia elétrica, principalmente em aplicações estacionárias de geração distribuída e veiculares. Eficiências de conversão das plantas atuais de células a combustível estão na faixa de 30% a 55 %, baseadas no valor do poder calorífico inferior do combustível (Camargo, 2004). Além disso, as células a combustível operam em uma temperatura constante e o calor da reação eletroquímica de algumas células está disponível para aplicações de cogeração.

Outra característica importante das células a combustível é que seu desempenho e custo são menos dependentes da escala do que os de outras tecnologias de geração de energia. As plantas pequenas de células a combustível operam quase tão eficientemente quanto as grandes, com emissões igualmente baixas e custos comparáveis por unidade de potência. Isto implica em aplicações para as células a combustível onde as tecnologias convencionais de geração de energia são pouco eficientes. Os sistemas de células a combustível podem ser geradores relativamente silenciosos.

Os principais impedimentos à comercialização das células a combustível são ainda a durabilidade e confiabilidade insuficientes, custo de capital elevado e falta da familiaridade dos mercados com estes equipamentos. Para as células a combustível que requerem combustíveis especiais, tais como o hidrogênio puro, a falta de uma infra-estrutura do combustível também limita a comercialização.

Desde os anos 80 do século passado, houve um forte impulso no desenvolvimento da tecnologia de células a combustível para aplicação veicular. Os Estados Unidos tem intensificado

nos últimos anos o investimento na tecnologia de células a combustível, especialmente naquelas que poderão ser utilizadas em veículos. A sua crescente dependência do petróleo importado está direcionando a atual administração americana a adotar o hidrogênio como alternativa à gasolina. Dessa forma, já que o hidrogênio será produzido dentro do país, a dependência externa poderá ser reduzida, além de contribuir para diminuir as emissões de gases de efeito estufa (veículos de emissão zero), dependendo das fontes primárias a serem utilizadas.

Os veículos com células a combustível são basicamente veículos de tração elétrica, pois a célula a combustível é o gerador que fornece energia elétrica para o motor elétrico que movimenta o veículo. Uma célula a combustível também pode ser utilizada em um veículo como uma unidade de força auxiliar, para gerar energia elétrica aos vários sistemas elétricos/eletrônicos dos veículos atuais. Os grandes fabricantes mundiais de veículos já desenvolveram quase uma centena de protótipos avançados de veículos leves desde 1994. O gráfico da Figura 2.3 mostra a distribuição dos protótipos por montadora. Cerca de 30 ônibus com células a combustível transitam em caráter experimental no mundo. Todos os veículos citados utilizam células a combustível tipo PEMFC (Fuel Cells, 2007-a).

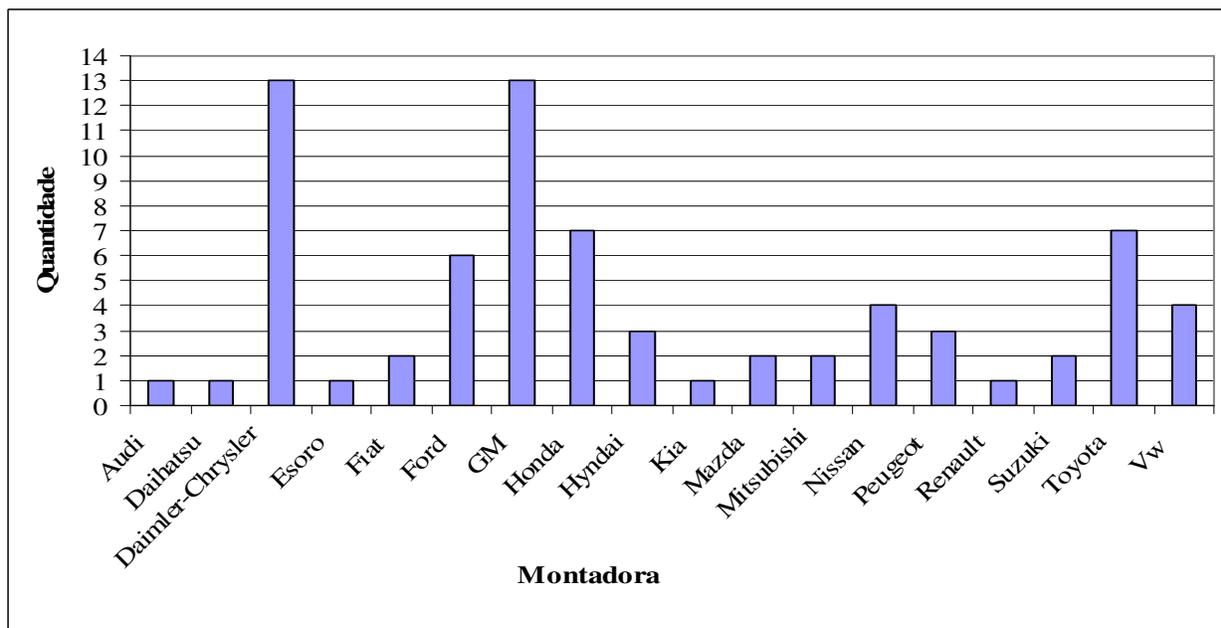


Figura 2.3: Distribuição de protótipos por montadora.
Fonte: Fuel Cell, 2007-b.

Como exemplos do estágio atual desta tecnologia, as Figuras 2.4 e 2.5 mostram um veículo de passeio da Honda e um ônibus fabricado pela Mercedes-Benz.



Figura 2.4: Protótipo FCX da Honda.
Fonte: Honda, 2007.



Figura 2.5: Protótipo Ônibus Citaro da Mercedes-Benz
Fonte: Evobus, 2007.

Em relação às aplicações estacionárias, as principais aplicações de pequeno porte, até 10 kW são para a geração de energia elétrica para uso residencial, sistemas ininterruptíveis e remotos. A PEMFC é a mais adequada para este uso, principalmente para uso residencial e o calor rejeitado dos sistemas residenciais pode ser aplicado para o aquecimento de água e ambientes (Silva *et al*, 2003). As SOFC também podem ser utilizadas para aplicações visando geração elétrica estacionária de pequeno porte, com potência de cerca de 5 kW (Fuel Cell Handbook, 2004; DOE, 2000).

Algumas tecnologias de células a combustível, como a MCFC e SOFC (protótipos), vêm sendo desenvolvidas para plantas de geração de energia elétrica e cogeração com potências entre 200 kW e 4 MW. Como exemplo do estágio atual desta aplicação, nas Figuras 2.6 e 2.7 são mostradas duas unidades estacionárias de célula a combustível com essas tecnologias.



Figura 2.6: Unidade estacionária SOFC de 220 kW da Siemens.
Fonte: Siemens, 2007.



Figura 2.7: Unidade estacionária MCFC de 300 kW da Fuel Cell Energy.

Fonte: Fuel Cell Energy, 2007.

Células a combustível de metanol direto (DMFC) estão sendo desenvolvidas para aplicação portátil, em computadores (notebooks e laptops) e telefones celulares. A vantagem desse tipo de tecnologia em relação às baterias é o tempo maior de utilização do equipamento e a reposição rápida do cartucho onde está contido o metanol (Fuel Cell Energy, 2007).

A Tabela 2.4 mostra os principais nichos de mercado no qual cada tipo de tecnologia de célula a combustível mais se aplica, levando em conta suas principais características, como por exemplo, tempo de partida, temperatura de operação, relação peso/potência, tolerância a combustíveis reformados, complexidade da instalação, tipo de eletrólito (líquido ou sólido) e capacidade de cogeração.

Tabela 2.4: Aplicação das células a combustível em cada mercado.

APLICAÇÃO		TIPO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL				
		PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Estacionária	Industrial	***	***	***	***	*
	Comercial	***	***	**	**	*
	Residencial	***	***	*	*	*
Veicular		***			*	**
Portátil		**				***

Fonte: Elaboração própria.

Notas:

*** = alta aplicação

** = média aplicação

* = baixa aplicação

= sem aplicação

Percebe-se que os desenvolvimentos tecnológicos na área de hidrogênio recaem de forma relevante sobre as células a combustível PEMFC, PAFC e SOFC. A ampliação dos usos energéticos do hidrogênio depende desses desenvolvimentos, de forma que essas três tecnologias devem ser pesquisadas e analisadas, uma vez que também a maioria das células a combustível não funcionam sem hidrogênio.

3 MONITORAMENTO TECNOLÓGICO

O desenvolvimento científico e tecnológico mundial tem crescido de forma significativa nas últimas décadas e uma clara manifestação desse crescimento refere-se ao surgimento de um grande número de meios de divulgação deste conhecimento. Por outro lado, a realização de atividades de P&D requer um trabalho sistemático de monitoramento das áreas de conhecimento principais e correlatas as suas atividades. Este trabalho de monitoramento, que consiste em busca, análise e síntese de informações, utiliza cada vez mais metodologias e ferramentas baseadas em bibliometria, estatística e sistemas de informação, sem o que se tornaria praticamente impossível acompanhar a informação disponível, crescente em diversidade e quantidade (Velho, 2001).

O uso destas metodologias e ferramentas, classificado genericamente como tratamento da informação ou bibliometria, consiste na aplicação de filtros para classificar e separar a informação coletada. Essa abordagem tem sido utilizada para disponibilizar, por meio de indicadores de tendências, informações importantes, seja para o pesquisador ou para o tomador de decisão.

O tratamento da informação é o pilar do processo de monitoramento tecnológico, ou de modo mais geral, de inteligência competitiva. O monitoramento tecnológico consiste em pesquisar o assunto escolhido, que pode ser uma tecnologia, um produto, uma instituição, dentre outras (McGonagle, 1998). O conceito de monitoramento, bem como o modo de fazê-lo, foi sendo alterado ao longo tempo. Outra conceituação acerca de monitoramento aponta para o acompanhamento do desenvolvimento de uma tecnologia, ou de uma área de conhecimento, de forma contínua ao longo do tempo (Gullo, 2002).

Por sua vez, a inteligência consiste na aquisição, análise e síntese da informação, ou seja, inteligência é a informação analisada. A inteligência competitiva é, portanto, a informação analisada para a competitividade (McGonagle, 1998).

A bibliometria aparece no contexto da inteligência competitiva como a ferramenta que elabora indicadores de tendências, gráficos, figuras que irão sintetizar as informações para a tomada de decisão.

Para Porter (1995), as mudanças tecnológicas são influenciadas pelas mudanças relativas ao contexto tecnológico e sócio-econômico. Logo, identificar tais sinais de alterações ou mudanças e analisá-los segundo interesses pode contribuir satisfatoriamente para o planejamento e o monitoramento tecnológico.

Nos últimos anos, a maneira de se realizar os trabalhos de monitoramento ganhou um estímulo maior devido ao aumento da capacidade de processamento dos computadores, o maior estabelecimento e disponibilidade de bases de dados, a expansão da *internet* e o surgimento de agentes de busca. De toda forma, não basta a estrutura física sem um conhecimento mínimo para a tradução dos resultados obtidos. Portanto, é de fundamental importância a análise dos dados por especialistas.

A atividade de monitoramento tecnológico consiste em acompanhar os ciclos tecnológicos e identificar padrões que sirvam para a obtenção de previsões do comportamento futuro dos ciclos de vida das tecnologias (Bright, 1998). Portanto, a premissa mais relevante das metodologias de monitoramento tecnológico, a partir desse ponto de vista, é que o ciclo de vida das tecnologias obedece a certos padrões.

É sabido que cada tecnologia apresenta particularidades com relação ao seu ciclo de vida, crescimento e maturidade. No entanto, o interesse pelos estudos dos padrões permanece, devido à possibilidade de oferecerem informações sobre o comportamento futuro das tecnologias, bem como a possibilidade de identificar sinais de tecnologias emergentes. A identificação dos padrões

e o monitoramento dos ciclos de cada tecnologia, segundo Bright (1998), são realizados a partir de quatro etapas:

- i. Identificação de sinais que possam antecipar mudanças tecnológicas. Se não há mudança tecnológica não há identificação de padrão nem de ciclos tecnológicos, mas o monitoramento pode haver, até para identificar que não há ciclo, que não há mudança no período;
- ii. Escolha de parâmetros de observação como, por exemplo, programas governamentais, eventos, decisões que devem se acompanhar a fim de se averiguar a evolução (ou não) da tecnologia (definição do objeto a ser monitorado);
- iii. Projeção de arranjos se as tendências sugeridas permaneceram (interpretação); e
- iv. Compilação dos dados obtidos para a tomada de decisão (a ação de monitorar).

Segundo Bright (1998), os sinais⁷ relevantes de mudança tecnológica podem ser classificados em 5 âmbitos: tecnológico, econômico, social, político e ambiental.

i. Âmbito Tecnológico

- a. Identificação de mudanças de interesse e o comprometimento de recursos financeiros em outras áreas de P&D; que se reflete em mudanças em pessoal, mudanças em instalações técnicas, anúncios de financiamento, temas de palestras, artigos e congressos;
- b. Identificação de novas tecnologias: demonstrações, patentes, *spin offs*.

ii. Âmbito Econômico

- a. Análise de demandas, mercados, custos;
- b. Identificação de financiamentos.

iii. Âmbito Social

- a. Medidas de condições sociais: doenças, pobreza, taxas de migração;

⁷ Pode ser entendido também como o início do ciclo de vida de uma nova tecnologia.

- b. Indicadores de atitudes e valores: preferências, ideologias, interesses, opiniões;
 - c. Respostas a eventos de grande repercussão: declarações, mudanças políticas, acidentes, conflitos.

- iv. Âmbito Político
 - a. Alterações nas estruturas de poder das agências e órgãos governamentais;
 - b. Alterações nas estratégias governamentais ou corporativas.

- v. Âmbito Ambiental
 - a. Alterações nos padrões físicos e químicos do ar, água e superfície terrestre;
 - b. Disposição de resíduos;
 - c. Degradação ambiental.

3.1 A metodologia do monitoramento tecnológico: bibliometria

Bibliometria é o estudo dos aspectos quantitativos da produção (científica ou não), disseminação e uso das informações registradas. A bibliometria desenvolve modelos matemáticos para medir essa produção, usando seus resultados para elaborar previsões e apoiar tomadas de decisão. Nos últimos anos tem sido crescente o interesse de especialistas e autoridades governamentais por indicadores quantitativos que, além de auxiliar o entendimento da dinâmica de ciência e tecnologia, funcionam também como instrumentos para o planejamento de políticas e tomada de decisões.

Segundo Velho (2001), a avaliação do trabalho científico através de indicadores quantitativos é um tema que vem ganhando cada vez mais espaço em estudos acadêmicos. Essa avaliação, ou melhor, os diversos tipos de avaliações dos trabalhos científicos são um dos critérios utilizados por governos e órgãos multinacionais, como a UNESCO, para decidir como direcionar seus recursos destinados a P&D. Para os gestores de recursos faz cada vez mais sentido

utilizar avaliações da produção científica, pois a disponibilidade de recursos para a ciência é limitada e compete com os demais setores de investimento público.

A bibliometria consiste na contagem de publicações, patentes ou citações para medir e interpretar avanços tecnológicos, bem como avaliar impactos de publicações (Porter, 1995). Essa abordagem pressupõe que, dependendo das fontes utilizadas, a contagem de artigos e patentes fornece indícios úteis acerca das atividades de P&D e da inovação. Há vários tipos de aplicações da bibliometria, desde uma aplicação estratégica, como classificar a ciência produzida por um país, até tática, como *“proporcionar inteligência competitiva sobre quem está fazendo o quê em uma tecnologia particular”* (Watts, 1997).

De acordo com Persson (1988), a bibliometria atende a duas proposições: a avaliação e ao monitoramento. A avaliação responde questões sobre o passado e possibilita verificar o desempenho de um país, de uma instituição, de um pesquisador. O monitoramento é orientado para o futuro e busca responder questões do tipo: Quais são as principais tendências? O que está acontecendo com determinada especialidade?

Watts (1997) aponta algumas restrições com relação ao uso da bibliometria para monitorar atividades de ciência, tecnologia e inovação:

- A contagem das publicações e patentes não distingue a qualidade;
- Uma parcela da P&D é protegida através de segredo industrial, portanto parte do desenvolvimento tecnológico não está refletida em publicações e patentes. Sempre haverá um atraso entre a documentação e a pesquisa que está sendo realizada.

Apesar das restrições, não se deve eliminar a bibliometria do monitoramento. Nesse sentido, Watts (1997) e Porter (1995) indicam algumas opções:

- Buscar tendências gerais ao invés de específicas;
- Validar os resultados através da opinião de especialistas.

3.2 Programas governamentais

3.2.1 Estados Unidos

O mais importante investimento em pesquisas relacionadas ao desenvolvimento do uso energético do hidrogênio, no valor de 1,2 bilhões de dólares, foi anunciado pelo presidente norte-americano George W. Bush no seu discurso “*The State of the Union*”, em janeiro de 2003. Como transcrito abaixo, neste discurso ele afirmou que “... nossos cientistas superarão obstáculos para levar estes veículos dos laboratórios para as revendas para que o primeiro veículo dirigido por uma criança nascida hoje possa ser movido a hidrogênio e livre de poluição” (White House, 2003):

“Tonight I'm proposing \$1.2 billion in research funding so that America can lead the world in developing clean, hydrogen-powered automobiles. A single chemical reaction between hydrogen and oxygen generates energy, which can be used to power a car -- producing only water, not exhaust fumes. With a new national commitment, our scientists and engineers will overcome obstacles to taking these cars from laboratory to showroom, so that the first car driven by a child born today could be powered by hydrogen, and pollution-free. Join me in this important innovation to make our air significantly cleaner, and our country much less dependent on foreign sources of energy” (Bush, 2003).

Deve ser observado no trecho do discurso que o termo *fuel cell* não foi mencionado de forma explícita, mas está subentendida na expressão “*Uma simples reação química entre hidrogênio e oxigênio... produzindo apenas água...*”. Outro aspecto importante a ser percebido é que o trecho está repleto de referências aos objetivos ambientais da destinação destes recursos.

Ainda em 2003, os Estados Unidos propuseram e se esforçaram bastante para o estabelecimento da *International Partnership for the Hydrogen Economy* – IPHE. Esta parceria foi estabelecida como uma instituição internacional para acelerar a transição para a economia do

hidrogênio⁸. O IPHE fornece um mecanismo para os parceiros organizarem, coordenarem e implementarem a pesquisa internacional relacionada ao hidrogênio e células a combustível de maneira efetiva e focada, além do desenvolvimento, em atividades de demonstração e utilização comercial relacionadas. O IPHE também fornece um fórum de discussões para o avanço das políticas, códigos e normas técnicas comuns que podem acelerar a transição para a economia do hidrogênio (IPHE, 2007).

Um aspecto interessante desta parceria é o destaque dado à segurança do suprimento energético, à segurança ambiental e econômica:

“By creating the IPHE, the Partners have committed to accelerate the development of hydrogen and fuel cell technologies to improve their energy security, environmental security and economic security” (IPHE, 2007).

Dentro desta estratégia norte-americana, no mesmo ano de 2003 os Estados Unidos organizaram um encontro com 16 países⁹ e a União Européia com a intenção de impulsionar a alternativa do seqüestro de carbono. Foi criado o *Carbon Sequestration Leadership Forum* – CSLF, ou Fórum de Lideranças para o Seqüestro de Carbono, que tem como objetivo principal facilitar o desenvolvimento e melhoramento de tecnologias com custo competitivo para separação e captura do dióxido de carbono para seu transporte e armazenamento seguro no longo prazo (CSLF, 2007).

O *Carbon Sequestration* é uma política oficial dos Estados Unidos que trata de estocar o excesso de carbono, por prazo indeterminado, na biosfera, no subsolo e nos oceanos. Entre os projetos do *Department of Energy* (DOE, 2006-a) têm-se:

⁸ Os países membros do IPHE são: Austrália, Brasil, Canadá, China, Comissão Européia, França, Alemanha, Islândia, Índia, Itália, Japão, República da Coréia (Coréia do Sul), Nova Zelândia, Noruega, Federação Russa, Reino Unido e Estados Unidos (IPHE, 2007).

⁹ Os países que participaram do primeiro encontro foram: Austrália, Brasil, Canadá, China, Comissão Européia, Índia, Itália, Japão, México, Noruega, Reino Unido e Estados Unidos. Atualmente fazem parte também a Alemanha, África do Sul, França, Holanda, Dinamarca, República da Coréia (Coréia do Sul) e Arábia Saudita.

- Sequestrar o carbono em repositórios subterrâneos;
- Melhorar o ciclo terrestre natural através da remoção do CO₂ da atmosfera pela vegetação e estoque da biomassa criada no solo;
- O sequestro do carbono nos oceanos através do aumento da dissolução do CO₂ pela fertilização do fitoplâncton com nutrientes e pela injeção CO₂ nos oceanos (mais de 1000 m de profundidade).

O denominado sequestro de carbono é uma alternativa técnica ao Protocolo de Quioto, que impôs a redução das emissões de GHG. A opção por esta alternativa e a não ratificação do Protocolo indicam que a administração Bush pretendia manter o uso dos combustíveis fósseis, porém evitando a emissão de GHG.

Com a viabilização dessas tecnologias, países que possuem grande dependência da energia de fontes não-renováveis como os Estados Unidos, podem conseguir uma diminuição em larga escala dos GHG sem precisar fazer mudanças radicais em seu padrão de consumo energético. Para demonstrar esta possibilidade, em 2003 o ex-secretário de energia dos Estados Unidos, Spencer Abraham, anunciou um projeto de 10 anos estimado em 1 bilhão de dólares para a construção de um protótipo de planta de geração de energia elétrica e para produção de hidrogênio com sequestro de carbono, projeto este conhecido como *FutureGen*.

O *FutureGen* é constituído por parceiros públicos e privados, grandes produtores e consumidores de carvão de países como Estados Unidos, China, Austrália, África do Sul, Coreia do Norte e Índia. A produção de hidrogênio a partir do carvão é um dos principais objetivos da parceria. Esse projeto vai ao encontro da política dos Estados Unidos para criação da economia do hidrogênio e de veículos com combustível sem poluição. Segundo o secretário Samuel Bodman “*ajudará a assegurar a segurança energética da América pelo desenvolvimento de tecnologias que utilizem plenamente os recursos energéticos*” (DOE, 2006-b). O destaque deste projeto é a associação do hidrogênio com uma das fontes fósseis que possui maiores restrições ambientais.

Outra publicação do DOE que também faz referência à questão ambiental e à segurança nacional, implícitos na política americana para o hidrogênio, é o relatório de fevereiro de 2004 “As Universidades Nacionais - A Economia do Hidrogênio: Oportunidades, Custos, Barreiras e necessidade de P&D” (National Research Council, 2004).

Esse relatório afirma que uma transição para o hidrogênio como o principal combustível nos próximos 50 anos podia fundamentalmente transformar o sistema de energia dos Estados Unidos. Essa transformação criaria oportunidades de aumentar a segurança de energia com o uso de uma variedade de recursos energéticos domésticos para a produção do hidrogênio e reduziria os impactos ambientais, incluindo as emissões de CO₂ e os níveis de poluição atmosféricos.

A rota de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis ou a partir de fontes não renováveis permanece como a questão a ser respondida. Para muitos especialistas, a tendência na administração Bush sinalizava para a produção desse energético a partir do carvão e da energia nuclear ao alocar a maioria dos 1,2 bilhões de dólares em pesquisas para a produção de hidrogênio dessas fontes não-renováveis (Clark, 1979).

Esta visão da estratégia norte americana é, segundo estes especialistas, reforçada por outros fatos e ações do governo. Por exemplo, em setembro de 2005 o DOE nomeou Carl O. Bauer como novo diretor de um dos principais laboratórios de pesquisa em energia nos Estados Unidos, o *National Energy Technology Laboratory* - NETL. O Sr. Bauer atuou em áreas do próprio NETL como chefe de pesquisa em produção de energia a partir do carvão e dirigiu pesquisas na área de eliminação de lixo radioativo (DOE, 2006-b). Essa nomeação evidenciaria a intenção do governo americano em direcionar os recursos governamentais para essas áreas.

Já em setembro de 2006 o DOE anunciou o plano estratégico do *Climate Change Technological Program* – CCTP, ou Programa Tecnológico de Mudança Climática, que apresenta medidas para acelerar o desenvolvimento e reduzir o custo de tecnologias avançadas que evitam, reduzem ou capturam e armazenam os GHG. Nas palavras do secretário norte-americano de

energia Samuel Bodman o “*plano é sem precedente no escopo e na escala, pois se trata de um planejamento de perspectiva global nos próximos 100 anos*”. (DOE, 2007-a).

O plano destina 3 bilhões de dólares do orçamento federal para pesquisa com tecnologias associadas ao clima e está dividido em seis objetivos complementares, a saber:

1. reduzir as emissões a partir do uso da energia e infra-estrutura;
2. reduzir as emissões a partir do suprimento de energia;
3. capturar e seqüestrar o dióxido de carbono;
4. reduzir as emissões de outros GHG;
5. medir e monitorar as emissões; e
6. fortalecer as contribuições da ciência básica para mudança climática.

O plano destaca tecnologias, tais como hidrogênio, bio-refinaria, carvão, seqüestro de carbono, fusão e fissão nuclear e que de acordo com o secretário norte-americano: “*têm o potencial de transformar nossa economia de maneira fundamental e podem não só se destinar às mudanças climáticas como também à segurança energética, à poluição atmosférica e outras necessidades prementes*” (DOE, 2006-a). Mais uma vez o hidrogênio aparece associado com fontes não renováveis de energia e com o seqüestro de carbono.

A Tabela 3.1 mostra o orçamento dos Estados Unidos para o fomento em pesquisas relacionadas à economia do hidrogênio (DOE, 2007-a).

Deste orçamento pode-se perceber que a maior parte dos recursos foram direcionados para a produção e transporte do hidrogênio e para as células a combustível, inicialmente (2004) mais para estas e depois (2006) mais para aqueles, indicando as áreas onde têm sido requerida uma maior atuação do governo norte-americano.

Tabela 3.1: Orçamento federal americano para o desenvolvimento da economia do hidrogênio, por ano fiscal (em milhões de dólares).

TIPO	2004	2005	2006	2007*	TOTAL	TOTAL
Pesquisa Básica	0	29,183	32,500	50,000	111,683	12,7 %
Produção e Transporte	19,163	31,503	48,534	79,120	178,320	20,2 %
Armazenamento	13,628	22,418	26,040	34,620	96,706	11,0 %
Conversão (Células a Combustível)	53,954	55,759	33,301	39,566	182,580	20,7 %
Validação de Tecnologia	15,648	26,098	33,301	39,566	114,613	13,0 %
Fabricação (P&D)	0	0	0	1,978	1,978	0,2 %
Segurança, Códigos e Normas	6,310	6,350	6,006	15,268	33,934	3,8 %
Educação	2,417	0	481	1,978	4,876	0,6 %
Análise de Sistemas	1,429	3,157	4,787	9,892	19,265	2,2 %
Fundos do Congresso	43,967	47,236	47,470	0	138,673	15,7
Total	156,516	221,704	232,455	271,988	882,628	100,0

(*) Previsto

Fonte: DOE, 2007-a.

3.2.2 União Européia¹⁰

Na Europa, em 2003 foi lançada a *European Partnership for a Sustainable Hydrogen Economy* ou Parceria Européia para Tecnologia de Células a Combustível e do Hidrogênio (EU Commission Research, 2006), formada por um Conselho Consultivo. Esse conselho, por sua vez, criou a Agenda Estratégica para Pesquisa do Hidrogênio. A parceria inclui agentes públicos e privados e tem o objetivo de investir no desenvolvimento da economia do hidrogênio e disponibilizar recursos em projetos de pesquisa além de assegurar uma estrutura política, identificar uma estratégia realista para disponibilização de recursos, aumentar a cooperação

¹⁰ Países membros da União Européia: Alemanha, Áustria, Bélgica, Bulgária, Chipre, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Itália, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Países Baixos, Portugal, Polónia, Reino Unido, Romênia, Suécia, República Tcheca.

internacional nessa área e promover a educação, o treinamento, a informação e disseminação de resultados na área de P&D.

De acordo com o presidente da União Europeia à época, Romano Prodi: *“Por mais eficientes que sejam nossos motores a combustão e usinas termoelétricas, se continuarmos a consumir energia nas taxas atuais, as futuras gerações terão que pagar um preço. O hidrogênio pode ajudar a resolver esta situação [...]*. Nosso objetivo é obter uma mudança passo a passo através de uma economia do hidrogênio completamente integrada dentro das próximas décadas”. (EU, 2003).

O plano de implementação de hidrogênio e células a combustível na Europa foi divulgado em 2006 pela *European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform*. Segundo esse plano, a Comissão Europeia propõe os elementos-chaves para uma nova política energética, uma resposta europeia comum à necessidade de uma energia sustentável, segura e competitiva, afirmando que essas novas tecnologias são ingredientes-chave desta política. Ele inclui um plano estratégico para a tecnologia da energia e pede um aumento de 50% para os investimentos em pesquisas em energia visando acelerar a mudança para um sistema com elevada eficiência energética e baixo uso do carbono. As tecnologias relacionadas ao hidrogênio e aos sistemas de célula a combustível podem ter um papel significativo no novo sistema energético europeu. Podem permitir que a energia renovável seja aplicada ao transporte, na geração distribuída e ajudar a lidar com o caráter intermitente das fontes renováveis como a energia eólica e fotovoltaica.

O plano de implementação europeu tem foco em quatro ações principais de inovação e de desenvolvimento:

1. Veículos a hidrogênio e estações de abastecimento para a mobilidade sustentável;
2. Células a combustível para a geração de calor e de energia elétrica para a produção eficiente, distribuída e diversificada de energia;
3. Fornecimento sustentável de hidrogênio, como preparação para a transição para as fontes renováveis; e

4. Células a combustível para seus primeiros mercados consumidores, para promover o uso comercial de hidrogênio e de células a combustível.

3.2.3. Japão

O Japão também tem criado políticas e programas para a introdução da economia do hidrogênio. No relatório *New National Energy Strategy* de 2006, o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão destacou as tecnologias novas que estão prontas para serem lançadas, como as células a combustível, que apontam para o estabelecimento da sociedade do hidrogênio. No relatório as diretrizes do desenvolvimento tecnológico estão voltadas para o estabelecimento da infra-estrutura de produção e distribuição do hidrogênio nas próximas três décadas. O Japão é extremamente dependente de recursos energéticos externos, principalmente petróleo e carvão, e por isso a produção de hidrogênio no país é um dos itens destacados no relatório. A pesquisa está direcionada basicamente para o desenvolvimento de nova tecnologia nuclear com reatores de água leve e a pesquisa com fusão nuclear para produção de hidrogênio através de eletrólise e reatores de alta temperatura (METI, 2006).

Portanto, neste documento o hidrogênio aparece relacionado principalmente à energia nuclear, que representa cerca de 14 % da energia total produzida no país, lembrando ainda que quase 60% da energia elétrica total produzida no Japão provêm de carvão e nuclear, praticamente em partes iguais.

A Tabela 3.2 mostra os valores investidos nos últimos anos pelo Japão no desenvolvimento da economia do hidrogênio. Pode-se notar que o total investido no período 2004-2006 corresponde a US\$ 935,9 milhões, ou seja, cerca de 50% a mais que o governo americano no mesmo período, conforme foi mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.2: Orçamento federal japonês para o desenvolvimento da economia do hidrogênio.

ANO	MILHÕES DÓLARES
2001	96,2
2002	175,7
2003	264,6
2004	304,6
2005	321,8
2006	309,5
Total	1.472,5

Fonte: IPHE Steering Committee, 2006.

Um importante aspecto a ser salientado no caso do Japão é que os fabricantes de veículos deste país têm os Estados Unidos como seu maior mercado. Mais de um terço das vendas de veículos novos no mercado norte-americano é de empresas japonesas. Portanto, deve-se considerar que as tendências deste mercado influenciam diretamente a indústria automobilística do Japão, que buscará seguir as novas propostas para o setor, de forma a não perder espaço neste mercado.

3.2.4 Brasil

O Brasil também tem integrado o esforço mundial para o estabelecimento da economia do hidrogênio. No entanto, diferentemente dos Estados Unidos e Japão, a produção de hidrogênio está direcionada às fontes renováveis de energia. Desde 1999, o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) tem apoiado o desenvolvimento do processo da reforma de etanol para produção de hidrogênio, com vistas a atender a um mercado potencial no Brasil e América Latina. Este interesse estratégico do MCT estimulou programas de pesquisa e o apoio a diversos projetos, envolvendo células a combustível e produção de hidrogênio.

Em 2001, o Ministério de Ciência e Tecnologia contratou a consultora internacional Dra. Helena Li Chum do *National Renewable Energy Laboratory* - NREL dos Estados Unidos para realizar o diagnóstico das competências nacionais e ações em andamento relacionadas a P&D em células a combustível e tecnologias do hidrogênio no Brasil. De acordo com os resultados da consultoria, em 2002, foi elaborado pelo MCT o Programa Brasileiro de Células a Combustível – PROCaC.

O PROCaC contou com a participação de universidades, centros de pesquisa e empresas brasileiras com o objetivo de promover ações integradas e cooperadas, que viabilizem o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogênio e de sistemas de célula a combustível, habilitando o país a se tornar um produtor internacionalmente competitivo nesta área. Pretende-se ainda apoiar o estabelecimento da indústria nacional para produção e fornecimento de sistemas energéticos com célula a combustível.

Entre os vários desafios identificados, além do desenvolvimento da tecnologia das células, encontram-se a produção, o armazenamento e a distribuição do hidrogênio, a capacitação de recursos humanos, regulação quanto à segurança e padronização e necessidade de parcerias entre instituições do governo, setor industrial, setor de serviços, ONGs, etc.

Em 2005, o PROCaC passou a ser denominado Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio – ProH2. Essa alteração não ocasionou nenhuma mudança estrutural propriamente dita, mas serviu para refletir mais corretamente a amplitude do mesmo, uma vez que o nome antigo transmitia a idéia de que o programa era restrito a células a combustível. Além disto, a nova denominação enfatiza que a maior oportunidade para o país seja de fato a produção de hidrogênio, especialmente via fontes energéticas renováveis, do que propriamente ao desenvolvimento da tecnologia de célula a combustível.

O ProH2 está estruturado por meio da formação de redes de pesquisa e desenvolvimento, com a participação de universidades, centros de pesquisa e empresas interessadas. Formaram-se cinco redes de pesquisa e desenvolvimento: a rede de células a combustível de membrana

polimérica (PEM), a rede de células a combustível de óxido sólido (SOFC), a rede de combustíveis e hidrogênio, a rede de integração e sistemas e a rede de usuários. Assim, a ação coordenada dos vários órgãos do governo e dos esforços de P&D objetiva acelerar o desenvolvimento industrial dos sistemas mais apropriados para a matriz energética brasileira, preservando a propriedade intelectual e gerando novas patentes. Nesse sentido, o Programa garante o uso mais racional dos recursos investidos, evitando sua dispersão em projetos semelhantes, e antecipa o alcance dos objetivos.

Além desse programa do MCT, o Brasil foi o único país da América Latina e Caribe convidado a participar da IPHE, primeiro porque possuía o ProCac e segundo por apresentar um mercado potencial para as tecnologias desenvolvidas nos outros países membros da parceria. Adicionalmente, de acordo com o Balanço Energético (BEN, 2007), o Brasil possui uma matriz energética bastante renovável, com a energia hidráulica correspondendo a 14,9% e a biomassa a 31,0% da oferta interna de energia, sendo um potencial produtor do chamado “hidrogênio verde”, oriundo de fontes renováveis de energia. Para o país, essa é uma grande oportunidade de participação na transição energética, que propicia o estabelecimento de parcerias estratégicas e aproveitamento de eventuais nichos de mercado.

A participação brasileira no IPHE é coordenada pelo Ministério de Minas e Energia – MME e foi à propulsora da elaboração do Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio. Apesar do roteiro brasileiro não constituir um programa de P&D para o hidrogênio, tampouco um programa de natureza comercial, trata-se de um plano de ações para introduzir o hidrogênio na matriz energética brasileira, o que de certa forma também implica em estimular projetos de P&D e de natureza comercial.

O documento foi coordenado pelo MME e elaborado por diversos especialistas de instituições convidadas. O roteiro sugere uma visão do futuro com uma maior utilização do hidrogênio, aponta as barreiras existentes para implementação das tecnologias, os desafios a serem vencidos, o grau de maturidade das tecnologias associadas, bem como as ações a serem

implementadas para antecipar o futuro e introduzir o hidrogênio na matriz energética com vantagens competitivas para o Brasil (MME, 2007).

A meta para implantação das Ações para Efetivação da Economia do Hidrogênio no Brasil está prevista para período de 2007 a 2025. Entretanto, é bastante provável que este período seja estendido. O detalhamento das etapas de elaboração do roteiro está descrito na Figura 3.1 (MME, 2007).



Figura 3.1: Passos para estruturação da economia do hidrogênio no Brasil
Fonte: MME, 2007.

Apesar do MME não possuir um programa na área do hidrogênio, espera-se que em breve o roteiro seja parte de um programa. No entanto, muita coisa ainda deve ser feita para estruturação da economia do hidrogênio no Brasil. Até agora apenas o roteiro foi elaborado e pouquíssimo foi investido, podendo-se afirmar que o Brasil ainda está “engatinhando” em relação aos outros membros do IPHE. São necessárias medidas que de fato viabilizem essa transição energética para economia do hidrogênio, como regulamentações específicas, linhas de pesquisa específicas no MME, linhas de financiamento, entre outras.

4 METODOLOGIA

A proposta metodológica deste trabalho consiste na construção de dois bancos de dados, um científico e tecnológico (Universo Científico-Tecnológico) e outro governamental (Universo Governamental). Para a obtenção dos dados adotou-se o método bibliométrico descrito no capítulo anterior. Para o banco de dados Universo Científico-Tecnológico a busca se faz em um conjunto de artigos científicos com o objetivo de identificar o tipo de célula a combustível e a fonte de energia para obtenção do hidrogênio mais pesquisada, no período compreendido entre os anos de 1970 e 2006. No caso do banco de dados Universo Governamental, a busca se faz em um conjunto de documentos governamentais de diversos países (Estados Unidos, União Européia, Japão e Brasil), disponíveis em sites da Internet, com o objetivo de verificar os recursos governamentais destinados para programas de P&D em hidrogênio e células a combustível.

4.1 Procedimentos metodológicos da pesquisa

Para a realização da pesquisa pretendida, desenvolveu-se um procedimento metodológico geral, passível de ser aplicado em outros casos semelhantes. Para isso foi levada em conta a natureza da pesquisa, que busca fazer uma análise integrando informações científicas e governamentais para, ao final tecer considerações sobre os tipos de células a combustível mais pesquisadas e seus impactos no uso dos combustíveis. A Figura 4.1, apresenta o fluxograma utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

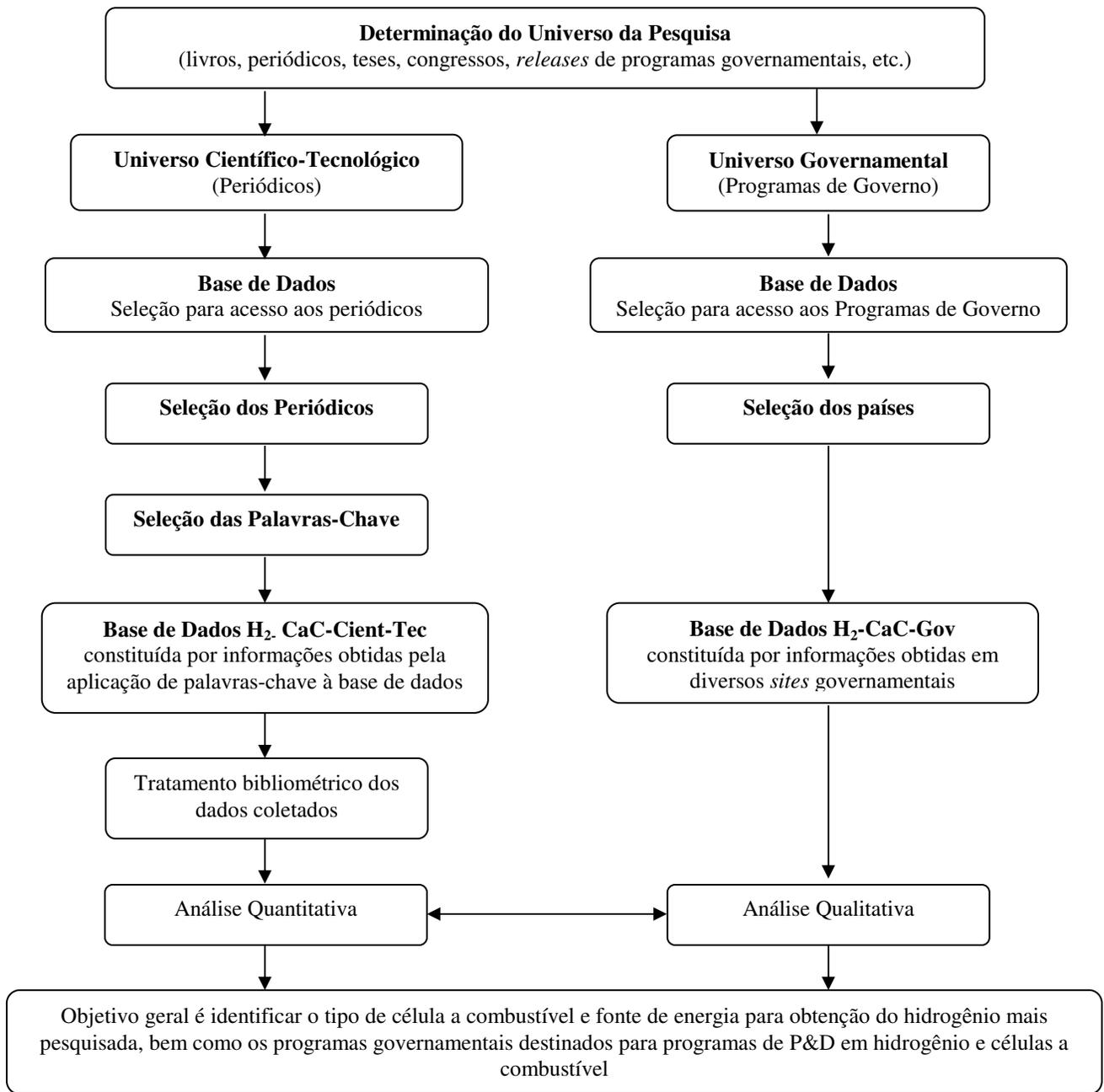


Figura 4.1: Fluxograma da metodologia utilizada.

Fonte: Elaboração própria.

Legenda:

H₂: hidrogênio;

CaC: Célula a combustível;

Cient: científico;

Tec: tecnológico

Gov: governamental.

4.2 Base de Dados do Universo Científico-Tecnológico: H₂-CaC-Cient-Tec

O recorte temporal definido é de trinta e seis anos, período compreendido entre os anos de 1970 a 2006. A escolha deste período deve-se aos importantes marcos históricos relacionados ao tema energia e questões ambientais, mencionados no Capítulo 1.

A escolha das palavras-chave fez-se a partir de consultas a profissionais que atuam nas áreas de conhecimento envolvidas, de forma que estas palavras fossem de fato as mais eficazes ao estudo pretendido. O grupo de palavras-chave selecionadas foi:

- *Hydrogen*
- *Fuel Cell*
- *Greenhouse Gas*
- *Carbon Capture e Carbon Sequestration*

As fontes de informação para a construção da base de dados H₂-CaC-Cient foram periódicos de grande circulação, incluídos nas bases de informação mais importantes, de fácil acesso (*Internet* de preferência), reunindo registros sobre artigos científicos do mundo inteiro. A análise quantitativa permite identificar a quantidade de artigos, o ano de publicação, o país onde foi realizada pesquisa, o tipo de células a combustível e a fonte de energia para obtenção do hidrogênio mais pesquisada.

Para se obter informações sobre artigos científicos a escolha da fonte de dados recaiu sobre a base de dados da *Science Direct*, pois reúne registros sobre periódicos científicos e tecnológicos do mundo inteiro. A *Science Direct* é uma base de dados que contém mais de 25% de informações bibliográficas e texto completo de publicações nas áreas de ciência, tecnologia e medicina do mundo; e seus periódicos são publicados pela Editora *Elsevier*.

Foi efetuada uma busca na *Science Direct* dos periódicos que abordassem concomitantemente os assuntos Ciência Física, Engenharia e Energia. Foram encontrados 67

periódicos. A partir do universo destes periódicos, um grupo constituído por pesquisadores do Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP, composto por profissionais que atuam há anos no desenvolvimento científico e tecnológico das aplicações energéticas do hidrogênio, selecionou os periódicos de maior relevância para a comunidade científica em questão e as palavras-chave de interesse. Os periódicos selecionados foram:

- *Applied Energy*
- *Energy*
- *Energy Conversion and Management*
- *Energy Policy*
- *Journal of Power Sources*
- *Renewable Energy*

Com a definição da base de dados, das palavras-chave e dos periódicos, iniciou-se a busca dos artigos. A base de dados H₂-CaC-Cient-Tec é composta pelos campos bibliográficos, ou seja, os títulos dos artigos, as palavras-chave, o resumo dos artigos e os autores. A H₂-CaC-Cient-Tec foi composta por 3.501 artigos. A Tabela 4.1 apresenta uma amostra da base H₂CaC-Cient-Tec.

No decorrer da pesquisa deparou-se com um problema de acesso aos registros da base, particularmente com a revista *Journal of Power Sources*, através do site <http://www.sbu.unicamp.br/>. O problema decorreu do fato que o acesso é limitado a uma quantidade de download de registros por busca. No caso dessa revista, foi permitido o acesso a apenas 1.000 registros por busca. A solução adotada foi a de fazer a pesquisa por volume, o que possibilitou o acesso a todos os registros.

Tabela 4.1: Amostra da base de dados H₂CaC-Cient-Tec, a partir da palavra-chave *hydrogen*.

PERIÓDICO	<i>APPLIED ENERGY, VOLUME 74, ISSUES 1-2, JANUARY-FEBRUARY 2003, PAGES 135-140</i>
Título	Energy density of a methanol/hydrogen-peroxide fuel cell
Autor	Daniel N. Prater and John J. Rusek
Palavras-chave	Fuel cell; Hydrogen peroxide; Energy density; Portable power; Direct methanol; Bioelectrocatalysis
País	Swift Enterprises Ltd., 1291 Cumberland Avenue, Suite B102, West Lafayette, Indiana 47906,
Resumo	At present, the use of hydrogen and oxygen gases is necessary to achieve a reasonable power density in fuel-cell systems. However, the overall energy density of a hydrogen /oxygen fuel cell system is low in comparison with many present, or alternate, power systems, and the associated costs are high. Total energy density can be improved with the integration of a fuel reformation process, but at the cost of power density. In this paper, an alternative hydrogen peroxide/direct methanol fuel-cell system that holds potential for an increase in energy density is examined. The limiting factor in the oxidation of methanol, either through an integrated reformation process to produce hydrogen gas, or directly through increased catalyst loading, is power density. The limiting factor in hydrogen peroxide reduction is also power density, due to the complexity of the reduction process.

Fonte: Applied Energy, 2003.

4.3 Base de Dados do Universo Governamental: H₂-CaC-Gov

A construção da base de dados Universo Governamental iniciou-se com a escolha dos países a serem objeto de análise. Para os objetivos propostos é importante que esses países tenham grande influência nos rumos das tecnologias, das políticas e programas globais, bem como fortes economias que possam influenciar as escolhas de outros países. Portanto, alguns critérios de escolha foram assim elencados:

- pertencer ao G-8 (grupo de 8 países mais desenvolvidos);

- possuir PIB (Produto Interno Bruto) entre os 10 maiores do mundo;
- ter assento no Conselho de Segurança da ONU (Organização das Nações Unidas);
- estar entre os 10 maiores exportadores de produtos tecnológicos; e
- apresentar elevado consumo per capita de energia.

No presente caso, a análise dos programas governamentais permitiu identificar:

- quais são os países que tem maior interesse em tecnologias do hidrogênio e de células a combustível;
- a forma de produção do hidrogênio: centralizada ou descentralizada; e
- quanto se investe em pesquisa e desenvolvimento.

4.4 Correlações entre as palavras-chave

Como será visto no Capítulo 6, os gráficos com os números de artigos que contém as palavras-chave adotadas distribuídos ao longo dos anos apontam para existência de uma correlação entre o número de artigos contendo estas palavras, mas a certeza destas correlações somente pode ser estabelecida a partir do tratamento estatístico destes dados. Para isso adotou-se dois procedimentos simples e práticos, porém confiáveis.

O primeiro que é a análise de regressão a partir da análise do coeficiente de determinação da variabilidade de Pearson (R^2), utilizando para isso o *software* Excel da Microsoft. O valor de R^2 pode ser interpretado como a proporção da variância de uma palavra-chave que pode ser atribuída à variância de outra. Vale lembrar aqui que $R^2 = 1$ expressa uma relação perfeita, enquanto que valores menores que a unidade indicará graus de proporção entre as palavras-chave consideradas. Por exemplo, $R^2=0,8$ significa que apenas 20% da variabilidade de uma palavra-chave não pode ser atribuída (ou explicada) pela variabilidade da outra palavra-chave e vice-versa (Montgomery, 2003).

Cabe aqui também observar que mesmo a existência de uma proporção alta não implica na dependência entre as variáveis consideradas, ou seja, as variâncias de uma não podem com certeza ser atribuídas à outra. Da mesma forma, deve-se chamar a atenção para o fato deste coeficiente (R^2) se referir a uma regressão linear, não sendo capaz de expressar outras funções matemáticas (quadráticas, exponenciais, etc.).

A segunda análise estatística foi feita utilizando-se o *software* Minitab (versão Minitab® 16.1.0) em que a correlação (ρ) entre as palavras-chave foi comprovada matematicamente cruzando-se todas as palavras-chave e testando-as estatisticamente, através deste *software*. Esta correlação (ρ) é função dependente do coeficiente de determinação da variabilidade das duas variáveis, sendo expressa por (Montgomery, 2003):

$$\rho = \sqrt{R^2}$$

Foram seis análises estatísticas realizadas para estes dois parâmetros (ρ e R^2) sendo elas: *fuel cell x hydrogen*; *fuel cell x greenhouse gas*; *fuel cell x carbon capture and sequestration*; *hydrogen x greenhouse gas*; *hydrogen x carbon capture and sequestration* e, finalmente, *greenhouse gas x carbon capture and sequestration*.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior.

5.1. Resultados da base de dados H₂-CaC-Cient-Tec

A base de dados H₂-CaC-Cient-Tec é composta por 3.501 artigos. A Figura 5.1 e a Tabela 5.1 mostram a distribuição temporal de todos os artigos por palavra-chave.

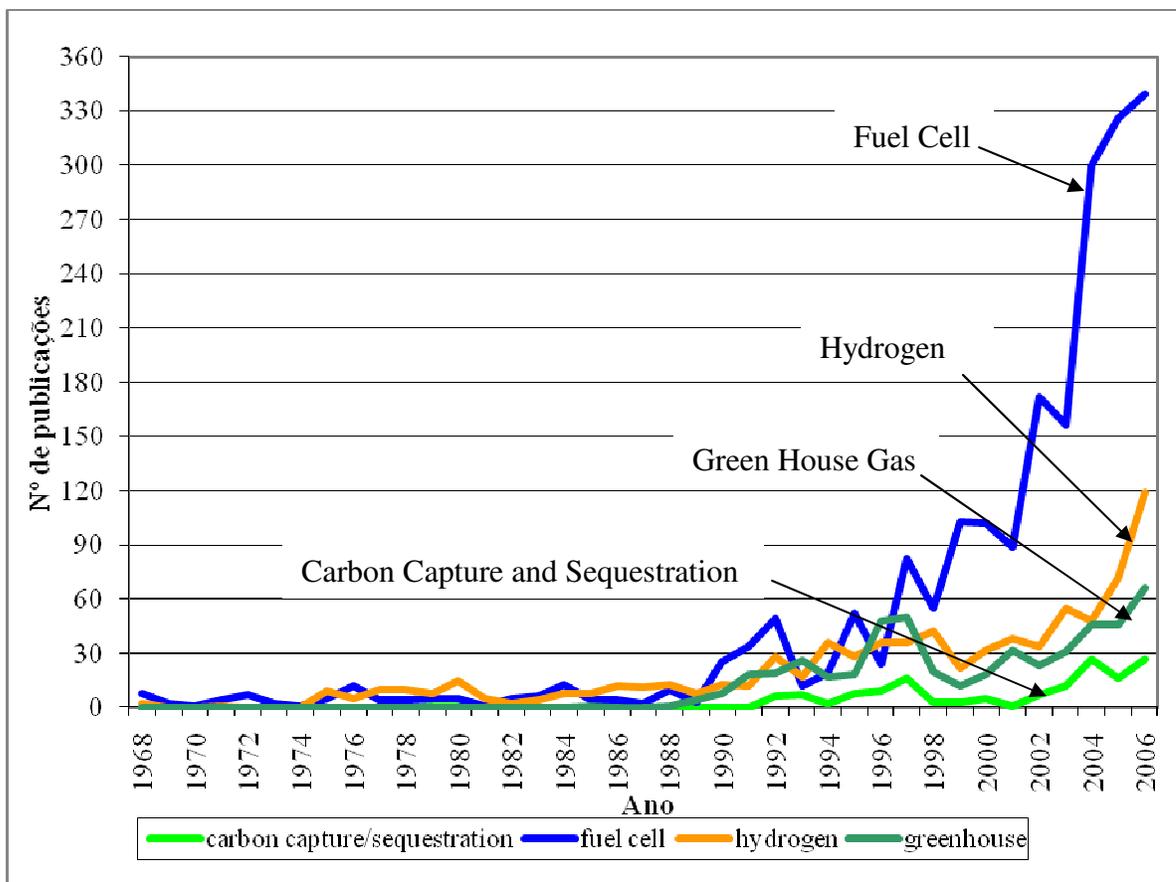


Figura 5.1: Número de publicações científicas por ano e palavra-chave (1970 a 2006).

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.1: Número total de publicações por ano, por cada palavra-chave.

ANO	NÚMERO DE PUBLICAÇÕES				Total
	Hydrogen	Fuel Cell	Greenhouse Gas	Carbon Capture e Sequestration	
1968	2	8	0	0	10
1969	0	2	0	0	2
1970	0	1	0	0	1
1971	1	4	0	0	5
1972	0	7	0	0	7
1973	0	2	0	0	2
1974	0	1	0	0	1
1975	9	5	0	0	14
1976	5	12	0	0	17
1977	10	4	0	0	14
1978	10	4	0	0	14
1979	8	5	0	1	14
1980	15	5	0	1	21
1981	5	1	0	0	6
1982	2	5	0	0	7
1983	4	6	0	0	10
1984	8	13	0	0	21
1985	9	4	1	0	13
1986	12	4	0	0	16
1987	11	2	0	0	13
1988	13	10	1	0	24
1989	8	3	4	0	15
1990	13	25	8	0	46
1991	12	34	18	0	64
1992	28	49	19	6	102
1993	17	12	26	7	62
1994	36	19	17	2	74
1995	28	52	18	8	106
1996	36	24	48	9	117
1997	36	80	50	16	184
1998	42	55	20	3	120
1999	22	103	12	3	140
2000	32	102	18	5	157
2001	38	89	32	1	160
2002	34	172	23	7	236
2003	55	156	31	12	254
2004	48	300	46	27	421
2005	72	326	46	16	460
2006	119	339	66	27	551
Total	799	2.047	504	151	3.501

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 5.1 mostra detalhadamente os dados da Figura 5.1. Nesta tabela pode-se notar um pequeno momento de elevação do número de publicações para as palavras-chave *fuel cell* e *hydrogen*, entre os anos de 1975 e 1980, período em que ocorreu a chamada “Crise do Petróleo”, quando em 1973 e 1979 ocorreram aumentos significativos dos preços internacionais do petróleo. Vale ressaltar que durante esse período o tema hidrogênio esteve em evidência, porém esta evidência não foi acompanhada de igual interesse pelas células a combustível.

Em relação à década de 80 observa-se que não houve aumento significativo no número de publicações, mantendo, portanto os mesmos patamares da década de 70.

Pode-se observar um crescimento maior do número de publicações ocorrido a partir de 1992 para as palavras-chave *hydrogen* e *fuel cell*, ano em que ocorreu a Convenção Marco das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – ECO-92, no Rio de Janeiro. Durante a década de 90, apesar das oscilações o número de publicações é crescente, culminando no ano de 1998, no qual se concentra o maior número de publicações científicas sobre o tema *hydrogen*, e no ano de 1999 sobre o tema *fuel cell*, sendo este o ano de abertura para assinaturas do Protocolo de Quioto. A partir de 1996 o número de publicações em *fuel cell* ultrapassa o número de publicações em *hydrogen*.

Entretanto, é no período de 2000 a 2006 em que se verifica o crescimento mais importante para *hydrogen* e *fuel cell*, conforme Figura 5.2. Provavelmente isso se deve a uma série de eventos ocorridos neste período, como por exemplo, a decisão dos Estados Unidos em não ratificar o Protocolo de Quioto em 2001, bem como a constituição do IPHE, em 2003, por iniciativa dos Estados Unidos, visando acelerar a penetração no mercado da tecnologia do hidrogênio e das células a combustível.

Em relação às palavras-chave *greenhouse gas* e *carbon capture and sequestration*, verifica-se um aumento, ou melhor, iniciam-se as publicações a partir da década de 90, com picos nos anos de 1993 e 1997, período após a ECO-92. Para o período de 2000 a 2006 percebe-se uma tendência ao crescimento do número de publicações.

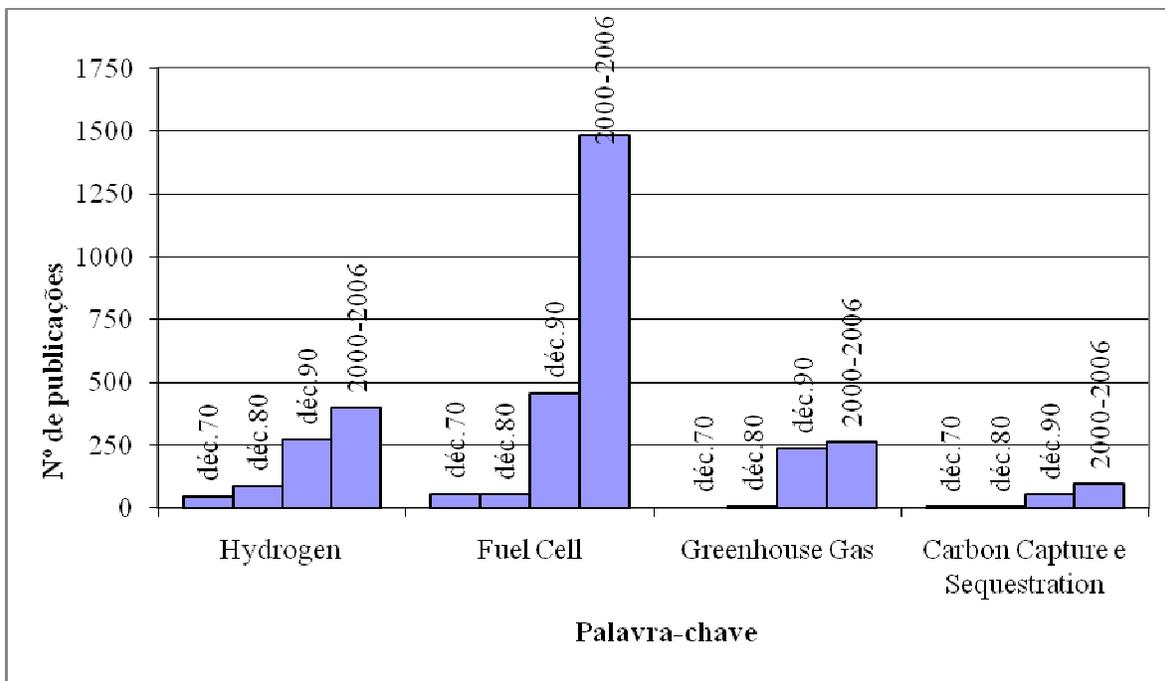


Figura 5.2: Distribuição do número de publicações científicas por palavra-chave e por década.
 Fonte: Elaboração própria.

Quanto à frequência relativa das palavras-chave consideradas, verifica-se o predomínio das publicações científicas ligadas à palavra *fuel cell*, com mais da metade de todos os artigos, conforme mostrado na Figura 5.3.

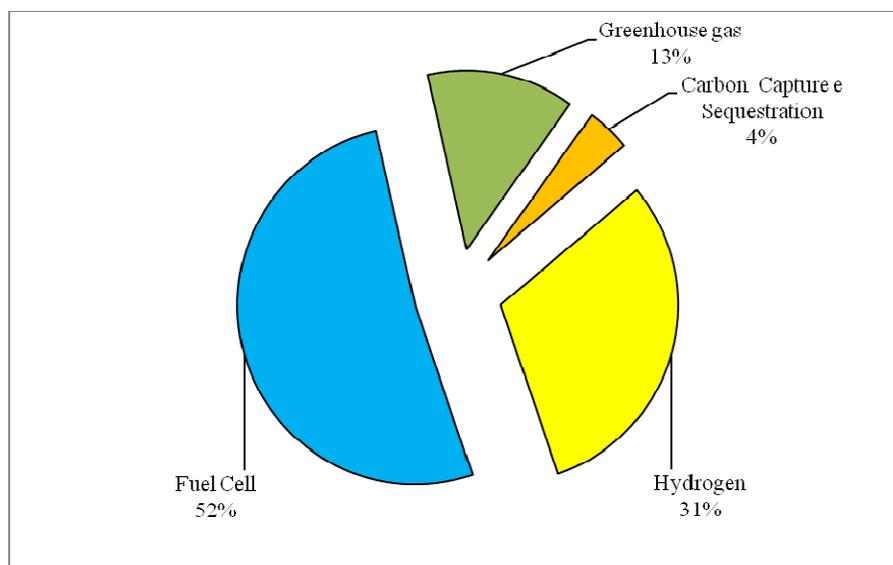


Figura 5.3: Distribuição do número total de publicações científicas por palavra-chave.
 Fonte: Elaboração própria.

Um aspecto importante deve ser considerado quando se observa o crescimento do número de artigos mostrado na Figura 5.1. Nos últimos anos tem-se verificado, por conta de diversos fatores que não cabe aqui analisar, um aumento progressivo do número de publicações praticamente em todas as áreas do conhecimento. Este crescimento está mostrado na Figura 5.4. Entretanto, este crescimento mundial é inferior ao crescimento dos artigos contendo as palavras-chave *fuel cell* e *hydrogen*, fato este mostrado na Figura 5.5, onde o número de artigos foi normalizado para o ano de 1985 (razão igual a 1,0 para este ano).

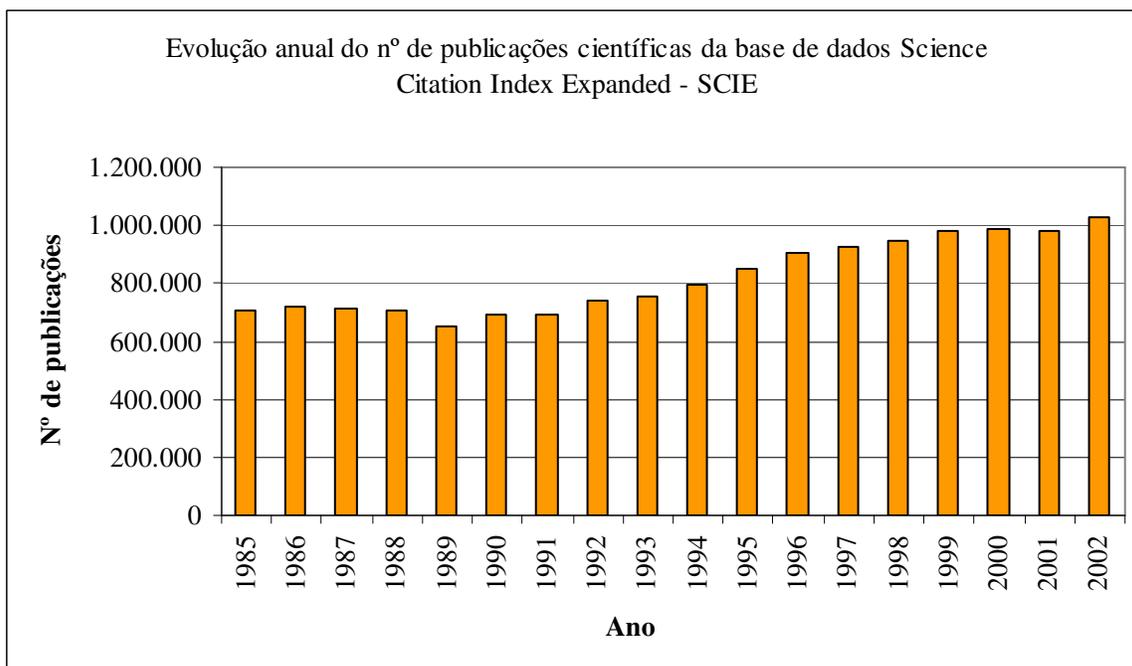


Figura 5.4: Evolução do número de publicações em todo o mundo.
Fonte: FAPESP, 2005.

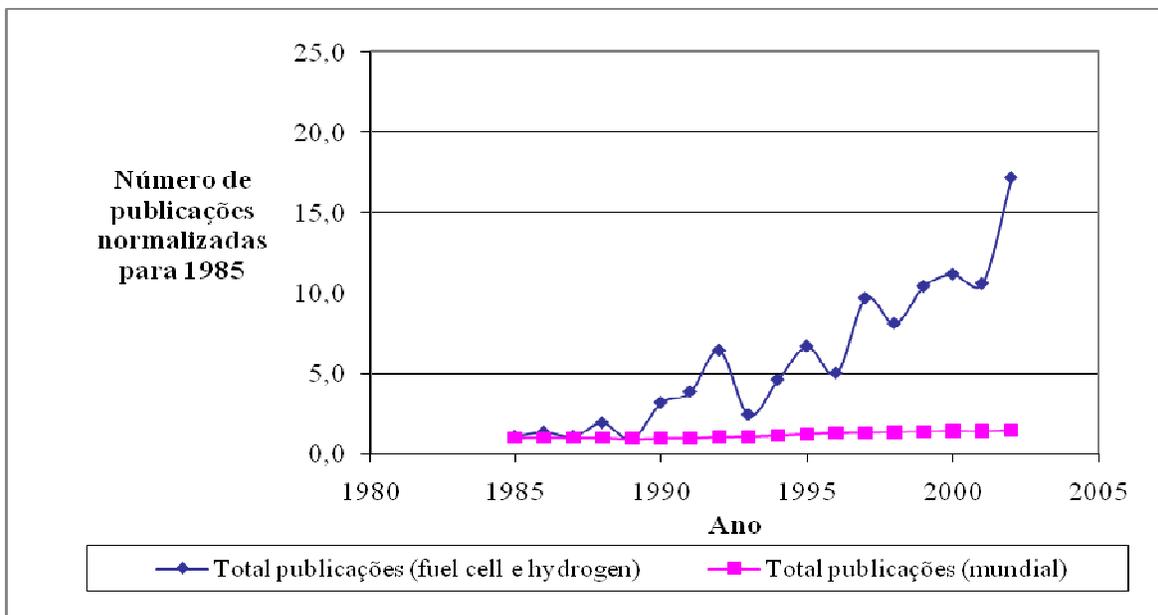


Figura 5.5: Crescimento relativo do número de artigos mundiais e dos selecionados de acordo com as palavras-chave, utilizando como base o ano de 1985.
 Fonte: FAPESP, 2005 e Base H₂-CaC-Cient-Tec.

Outra forma de expressar o aumento das publicações relacionado às palavras-chave consideradas, de forma mais clara, eliminando as oscilações observadas é agrupar os artigos por década, conforme Figura 5.6.

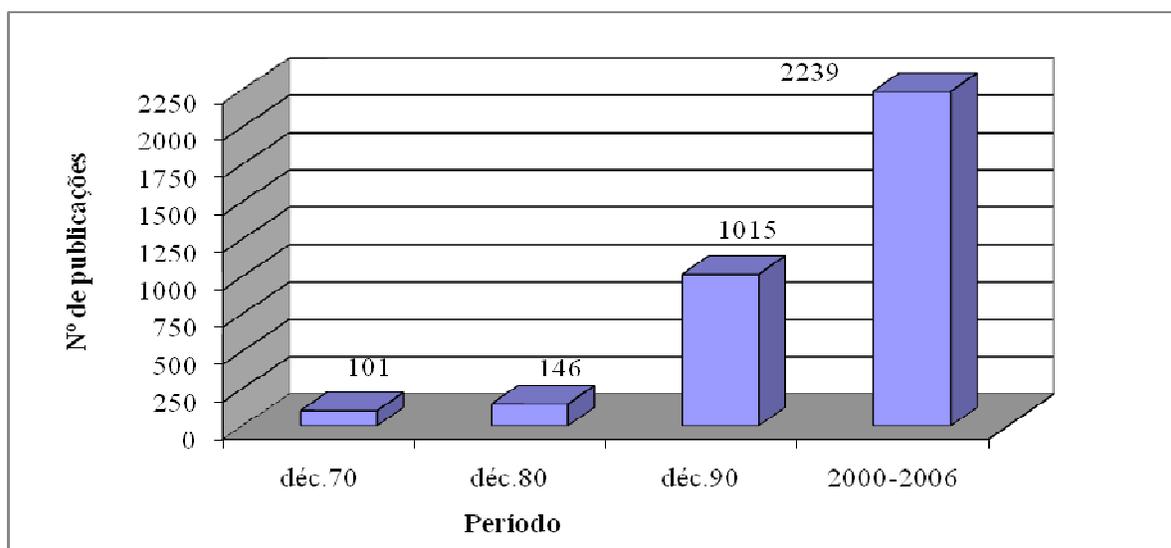


Figura 5.6: Número de publicações científicas por década.
 Fonte: Elaboração própria.

A análise dos dados das publicações fornece também uma idéia geral da distribuição dos artigos por países. Dos 3.501 artigos encontrados chegou-se ao número total de 79 países. Isto significa dizer que dos 241 países do mundo, 79 deles tem uma ou mais publicações sobre células a combustível, hidrogênio e/ou alguma das palavras-chaves consideradas. Para maiores detalhes consultar Anexo 1.

Para se ter uma visão geral da participação de cada país na formação da base H₂CaC-Cient-Tec, a Figura 5.7 mostra uma classificação do número de artigos por país acrescentando a União Européia. A partir dessa figura constata-se que a União Européia encontra-se em primeiro lugar em publicações científicas, seguida dos Estados Unidos, Japão e Alemanha.

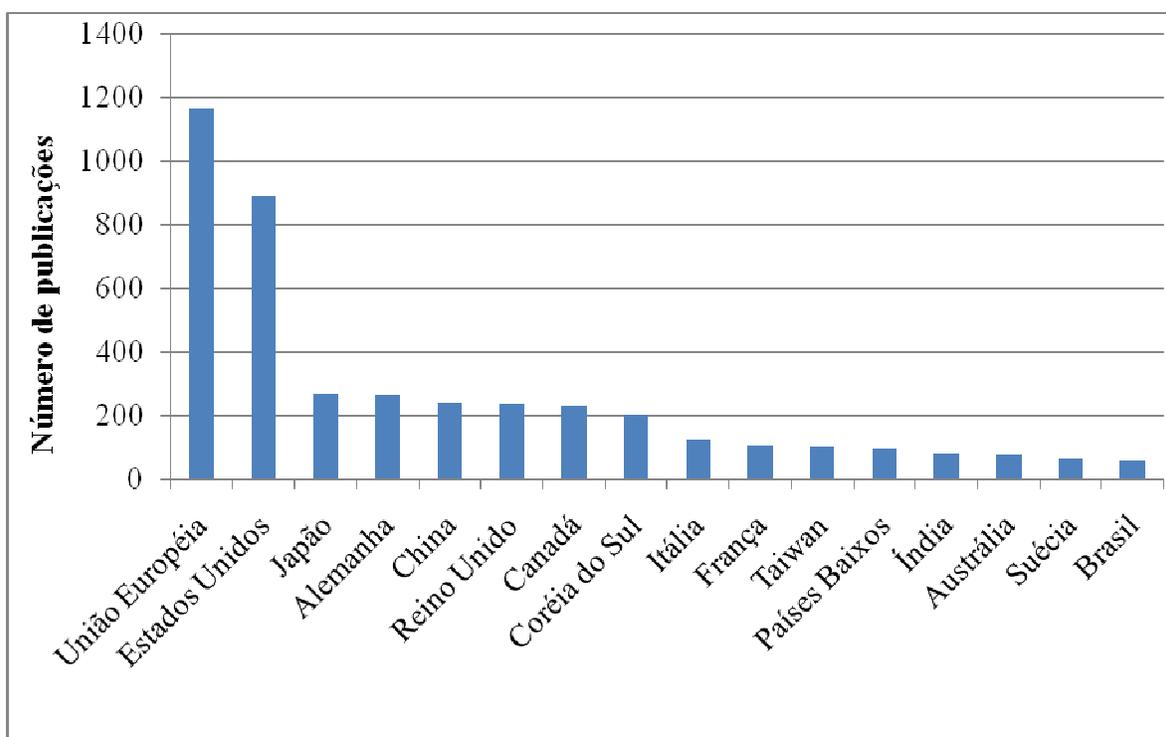


Figura 5.7: Classificação das publicações científicas entre os países mais União Européia.
Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar na Figura 5.8, que exprime graficamente os dados da Tabela 5.2, que entre as palavras-chave na classificação dos países que mais produzem publicações científicas, dentro da análise feita neste trabalho, são as palavras chave *fuel cell* e *hydrogen* classificadas em primeiro lugar, sendo proporcional a distribuição destas em cada país citado. A palavra-chave *greenhouse gas* está em segunda posição, com uma diferença significativa de publicações quando se analisa os totais das publicações dos países. No entanto, em alguns países como a Suécia, Austrália, Países Baixos, Reino Unido e, até quando se considera os países da União Européia, a palavra-chave *greenhouse gas* torna-se tão importante quanto às duas primeiras em proporção quase que de um terço das publicações para cada uma dessas palavras chave; chegando até a superar uma dessas outras duas palavras-chave. Já no caso da palavra-chave *carbon capture and sequestration* não há praticamente exceção nenhuma estando, dentre elas, no último (terceiro) lugar nesta classificação.

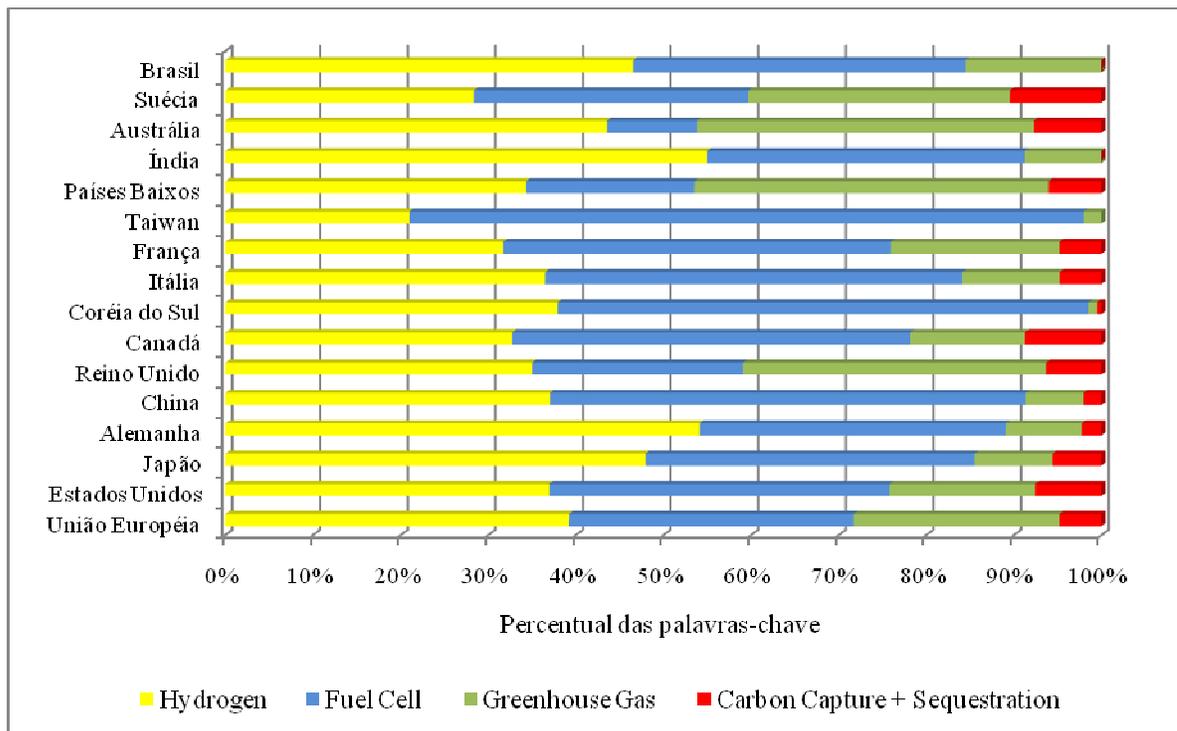


Figura 5.8: Percentual das palavras-chave nas pesquisas dos países que mais produzem publicações científicas nas revistas pesquisadas neste trabalho.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.2: Classificação dos países que mais pesquisam dentro das palavras-chave analisadas neste trabalho considerando também os países da União Européia aqui agrupados.

PAÍS	HYDROGEN	FUEL CELL	GREENHOUSE GAS	CARBON CAPTURE AND SEQUESTRATION
União Européia	456	378	273	56
Estados Unidos	329	346	148	67
Japão	129	101	24	15
Alemanha	144	93	23	6
China	90	132	16	5
Reino Unido	83	57	82	15
Canadá	75	104	30	20
Coréia do Sul	77	123	2	1
Itália	46	60	14	6
França	33	46	20	5
Taiwan	21	77	2	0
Países Baixos	34	19	40	6
Índia	44	29	7	0
Austrália	34	8	30	6
Suécia	19	21	20	7
Brasil	27	22	9	0
Total	1641	1616	740	215

Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostram a distribuição do número de publicações científicas por palavra-chave, por década e pelos países Estados Unidos, Alemanha e Japão.

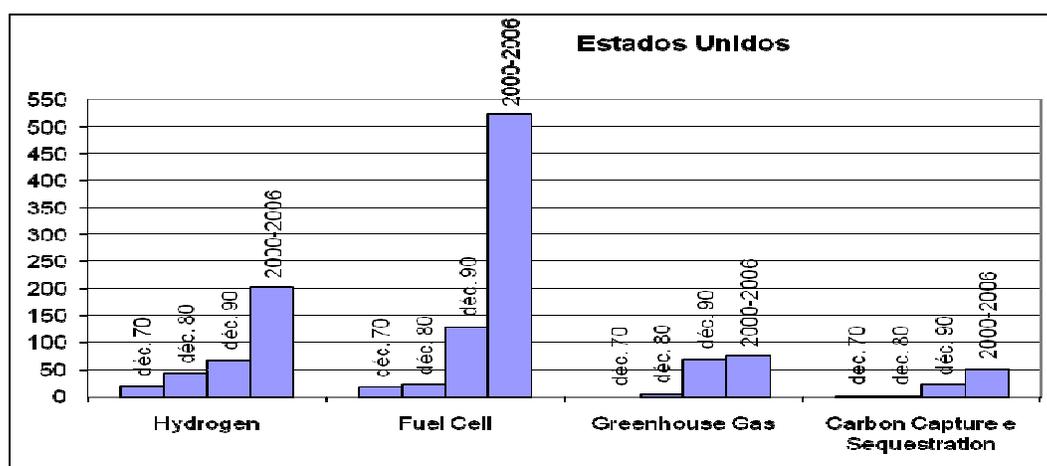


Figura 5.9: Distribuição do número de publicações científicas por palavras-chave e por década nos Estados Unidos.

Fonte: Elaboração própria.

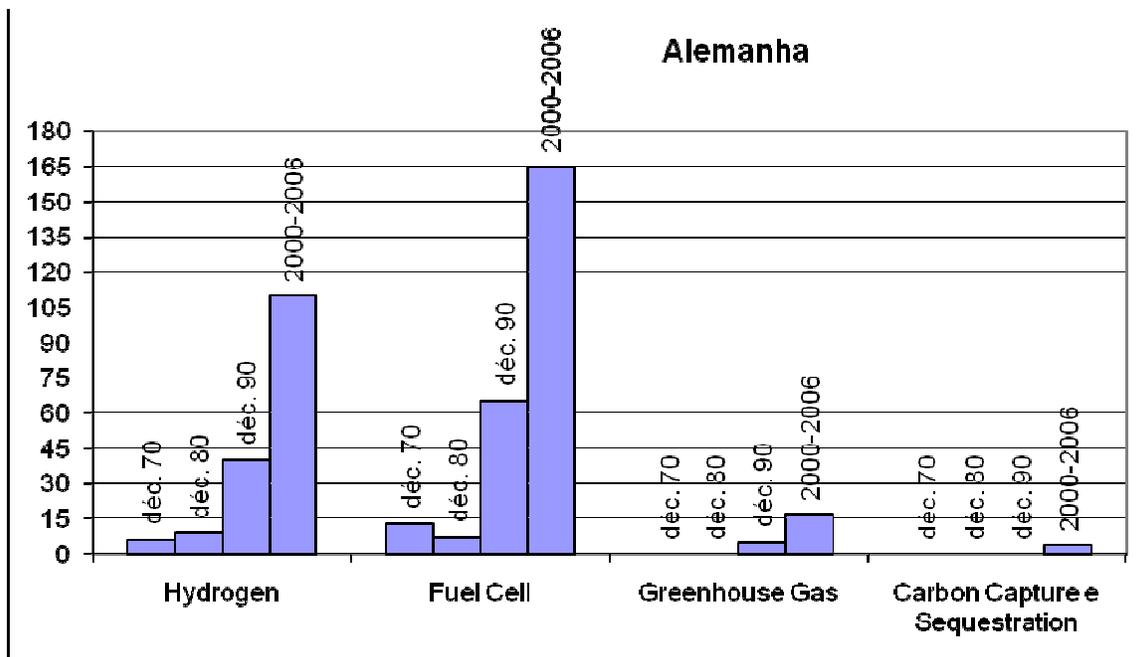


Figura 5.10: Distribuição do número de publicações científicas por palavras-chave e por década na Alemanha.

Fonte: Elaboração própria.

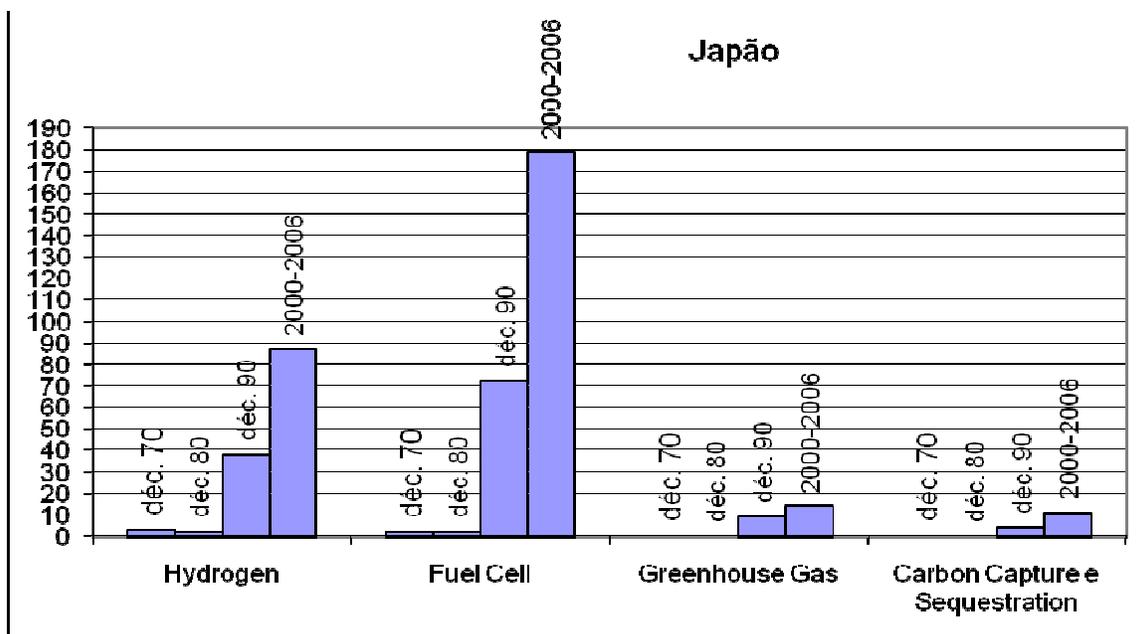


Figura 5.11: Distribuição do número de publicações científicas por palavras-chave e por década no Japão.

Fonte: Elaboração própria.

5.2. Resultados da base de dados H₂-CaC-Gov

Conforme estabelecido na metodologia apresentada no capítulo anterior, esta vertente da pesquisa necessita inicialmente definir os países que serão considerados, conforme os critérios apresentados.

O G8, ou Grupo dos Oito, atualmente é um grupo constituído pelos seguintes países: Alemanha, Canadá, Estados Unidos, França, Itália, Japão, Reino Unido e Rússia, e sua primeira reunião aconteceu em 1998. Inicialmente o grupo foi denominado de G7, pois não contava com a presença da Rússia. O primeiro encontro do G7 aconteceu em 1975 e reuniu os chefes de Estado desses países para discutir questões políticas e econômicas, de curto prazo, entre os países participantes. A idéia era que esses dirigentes se reunissem de maneira informal e sem protocolo (USINFO, 2006).

Atualmente as questões discutidas abordam temas tais como: desenvolvimento sustentável, saúde, entre outros. A União Européia ocupa uma posição de observadora nas reuniões do G8, onde é representada pelo Presidente da Comissão Européia e ainda pelo chefe de Estado e de governo do país que estiver exercendo a presidência da Comunidade Européia (USINFO, 2006).

Com relação ao Produto Interno Bruto (PIB)¹¹, o Fundo Monetário Internacional (FMI) através de seu relatório *World Economic Outlook Database* (IMF, 2007), apresenta uma lista de países organizada pelo seu PIB. A Tabela 5.3 apresenta a relação dos 10 países com maior PIB no ano de 2006.

¹¹ Produto Interno Bruto (PIB) representa a soma, em valores monetários, de todos os bens e serviços de um país produzidos em uma nação durante um ano. O PIB é um indicador econômico para mensurar a atividade econômica de um país.

Tabela 5.3: Relação dos dez países com maior PIB.

QUALIFICAÇÃO	PAÍS	PIB (TRILHÕES DÓLARES)
1º	Estados Unidos	13,0
2º	China	10,0
3º	Japão	4,2
4º	Índia	4,1
5º	Alemanha	2,6
6º	Reino Unido	2,1
7º	França	1,9
8º	Itália	1,8
9º	Rússia	1,7
10º	Brasil	1,7

Fonte: *International Monetary Fund* (2007).

No que diz respeito ao Conselho de Segurança da Organização das Nações Unidas (ONU), este é um órgão com responsabilidades sobre a segurança mundial, isto é, ele tem o poder de autorizar uma intervenção militar em qualquer país. Todos os conflitos e crises políticas mundiais são tratados pelo conselho, para que haja intervenções militares ou missões de paz (UN, 2006). O Conselho de Segurança é composto por cinco membros permanentes, China, Estados Unidos, Rússia, França e Reino Unido, e dez membros rotativos com mandatos de 2 anos.

Os membros rotativos atualmente são:

1. África do Sul (África) / 2007-2008
2. Bélgica (Europa Ocidental) / 2007-2008
3. Eslováquia (Europa do Leste) / 2006-2007
4. Gana (África) / 2006-2007
5. Indonésia (Ásia) / 2007-2008

6. Itália (Europa Ocidental) / 2007–2008
7. Panamá (América Central) / 2007–2008
8. Peru (América do Sul) / 2006–2007
9. Qatar (Ásia) / 2006-2007
10. República do Congo (África) / 2006-2007

A OECD¹² em seu relatório *Main Science and Technology Indicators* (2005), apresenta uma relação dos principais países exportadores de tecnologia no ano de 2003. A relação desses países é obtida a partir do Balanço de Pagamentos Tecnológicos. De acordo com este relatório, os indicadores refletem a capacidade que um país tem de exportar e importar tecnologia. O Balanço de Pagamentos Tecnológicos avalia as transferências de tecnologia internacionais e compreende quatro categorias:

1. transferência de técnicas (patentes, licenças);
2. transferência de projetos, marcas registradas e testes padrões (vendas, pagamento de royalties);
3. serviços com conteúdo técnico (estudos de engenharia); e
4. pesquisa e desenvolvimento industrial.

Na Tabela 5.4 tem-se que, em 2003, os principais países exportadores de tecnologia foram Estados Unidos, Reino Unido, Japão, França e Canadá. Entretanto, países como Alemanha, Itália, Coreia do Sul, Suíça e Espanha importaram a maioria das tecnologias.

¹² OECD: *Organization for Economic Co-operation and Development*.

Tabela 5.4: Relação dos principais países exportadores de tecnologia.

PAÍS	BALANÇO DE PAGAMENTOS EM TECNOLOGIA (MILHÕES DE DÓLARES)					
	Receitas		Pagamentos		Balanço	
Estados Unidos	48 227,0		20 049,0		28 178,0	
Reino Unido	22 495,7		9 559,6		12 936,1	
Alemanha	21 957,4		23 095,1		-1 137,7	
Japão	13 043,6		4 862,8		8 180,8	
França	5 188,3		3 233,5		1 954,8	
Bélgica	4 645,4	2002	3 875,6	2002	769,8	2002
Suíça	4 554,3		4 793,4		- 239,1	
Itália	3 108,5		3 794,9		- 686,4	
Áustria	2 429,7	2000	2 425,8	2000	3,9	2000
Canadá	2 033,9	2001	1 050,5	2001	983,4	2001
Finlândia	1 727,9		1 476,2		251,7	
Dinamarca	1 657,3	1999	1 055,3	1999	602,0	1999
Noruega	1 501,2		1 297,3		203,9	
Coréia do Sul	816,4		3 237,3		-2 420,9	
Portugal	401,0		742,2		- 341,2	
Hungria	216,1	1999	503,7	1999	- 287,6	1999
Espanha	190,9	1998	1 025,4	1998	- 834,5	1998
República Tcheca	187,9		548,8		- 360,8	
Polónia	176,8	2001	794,8	2001	- 618,0	2001
Austrália	103,0	1998	224,9	1998	- 121,9	1998
México	54,0		608,1		- 554,1	
Eslováquia	30,4	2001	64,9	2001	- 34,4	2001
Nova Zelândia	7,9	1999	3,7	1999	4,2	1999

Fonte: OECD, 2005.

Nota: os anos nas colunas paralelas significam que o ano das informações daquele país difere do ano em que a fonte às divulgou.

Embora o Balanço de Pagamentos Tecnológicos reflita a habilidade de um país em comercializar no exterior sua tecnologia e adquirir tecnologias estrangeiras, um déficit não indica necessariamente competitividade baixa. Em alguns casos, resulta das importações serem maiores que as exportações, podendo indicar a presença de filiais de multinacionais dentro do país. Do mesmo modo, um superávit pode ser devido a um grau elevado de autonomia tecnológica e um baixo nível de importações de tecnologia. Uma tecnologia pode ser obtida através do investimento que um país faz em pesquisa e desenvolvimento ou através da importação. Para o caso da Alemanha, Itália, Coreia do Sul, Suíça e Espanha as despesas relacionadas com a aquisição de tecnologias estrangeiras é maior do que as despesas relacionadas com o desenvolvimento de tecnologias dentro do próprio país.

Em relação ao último critério estabelecido, ou seja, o consumo de energia per capita, a Figura 5.12 mostra os resultados para vários países no ano de 2005.

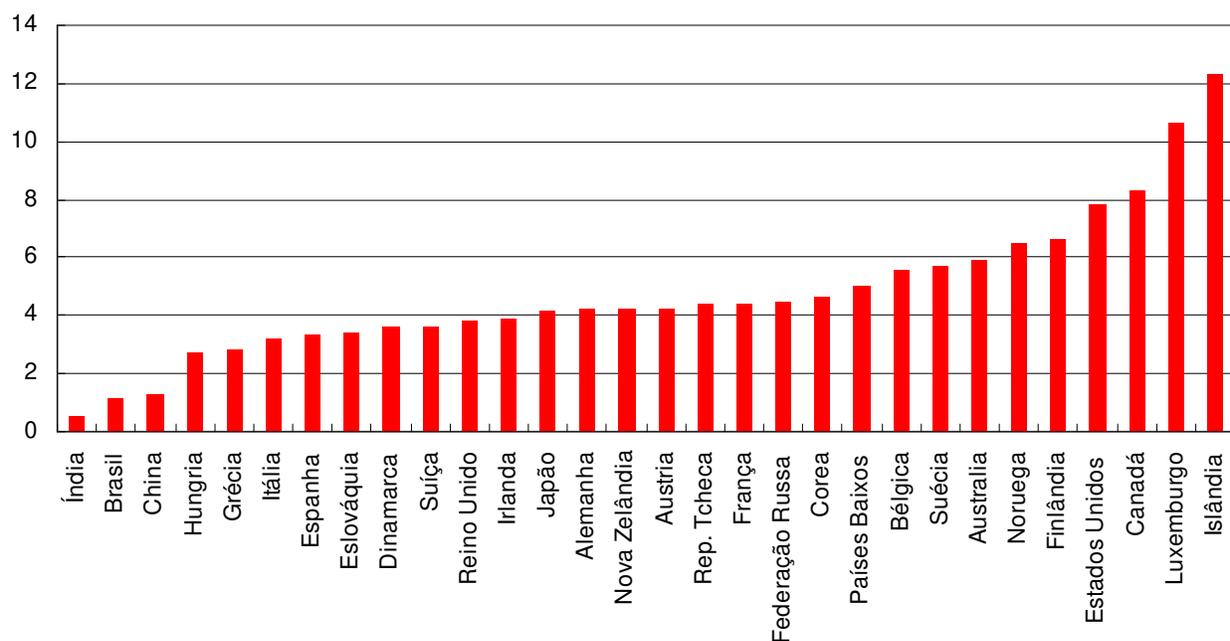


Figura 5.12: Consumo energético per capita, 2005.

Fonte: OECD, 2007; IEA, 2006.

Pela análise da Figura 5.12, constata-se que o consumo energético per capita varia significativamente entre os países. Entre os países com os índices mais elevados encontra-se a Islândia, em que o consumo energético em 2005 foi de 12,4 toe¹³/capita e Luxemburgo, com 10,7 toe/capita (OECD¹⁴, 2007; IEA¹⁵, 2006).

Em seu relatório *Factbook 2007: Economic, Environmental and Social Statistics* (2007), a OECD mencionou que o índice elevado para a Islândia justifica-se em parte pelo clima, e também pela disponibilidade de energia barata (OECD, 2007). Os Estados Unidos e o Canadá são também grandes consumidores de energia per capita, com relações de 7,8 e 8,3 toe/capita em 2005, respectivamente. Na outra extremidade, ou seja, entre os países com índice de consumo de energia per capita mais baixo encontram-se a China, com 1,24 toe/capita, e o Brasil, com 1,11toe/capita. A Tabela 5.5 mostra em detalhes os dados da Figura 5.8.

Para a seleção final dos países a serem considerados, foi elaborado uma classificação dos 10 principais países, a partir de uma pontuação para cada um dos critérios. A Tabela 5.6 apresenta esta classificação, sendo que para os critérios classificatórios foi estabelecida a pontuação 1 para os primeiros 5 países e 0 para os outros 5, considerando-se apenas os 10 primeiros colocados. A única exceção foi a composição do G8, do qual todos os países que participam receberam pontuação 1. O Brasil também foi considerado, apenas para efeito de comparação.

¹³ Toe/capita: Tonnes of oil equivalent (toe) per capita (OECD, 2007).

¹⁴ Países membros da OCDE (Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Econômico): Áustria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, França, Alemanha, Grécia, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Portugal, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido, Estados Unidos, Japão (em 1964), Finlândia (em 1969), Austrália (em 1971), Nova Zelândia (em 1973), México (em 1994), Coreia do Sul, Hungria, Polônia, República Tcheca.

¹⁵ IEA: *International Energy Agency*.

Tabela 5.5: Índice de consumo de energia per capita para alguns países em 2005.

PAÍS	ÍNDICE DE CONSUMO PER CAPITA (TOE PER CAPITA)
Islândia	12,36
Luxemburgo	10,67
Canadá	8,3
Estados Unidos	7,82
Finlândia	6,65
Noruega	6,5
Austrália	5,9
Suécia	5,66
Bélgica	5,58
Países Baixos	5,03
Coréia do Sul	4,59
Federação Russa	4,46
França	4,42
República Tcheca	4,4
Áustria	4,24
Alemanha	4,21
Nova Zelândia	4,21
Japão	4,17
Irlanda	3,89
Reino Unido	3,84
Suíça	3,62
Dinamarca	3,6
Eslováquia	3,43
Espanha	3,37
Itália	3,22
Grécia	2,8
Hungria	2,75
China	1,24
Brasil	1,11
Índia	0,53

Fonte: OECD, 2007; IEA, 2006.

Tabela 5.6: Classificação para seleção dos países de acordo com os critérios estabelecidos.

Nº	PAÍS	G8	PIB	ONU	EXPORTAÇÃO	ENERGIA	TOTAL
1	EUA	1	1	1	1	1	5
2	Alemanha	1	1	0	1	1	4
3	França	1	0	1	1	1	4
4	Japão	1	1	0	1	0	3
5	Reino Unido	1	0	1	1	0	3
6	Rússia	1	0	1	0	1	3
7	Canadá	1	0	0	0	1	2
8	China	0	1	1	0	0	2
9	Itália	1	0	0	0	0	1
10	Índia	0	1	0	0	0	1
	Brasil	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaboração própria.

Examinando a Tabela 5.6, verifica-se que os países classificados em 2º, 3º, 5º e 9º lugares são integrantes da União Européia e podem ser considerados como tal, ou seja, serão pesquisadas as políticas da União Européia para as tecnologias do hidrogênio e células a combustível. De fato, apesar de alguns programas e ações específicas, a maioria dos programas dos países europeus está agrupada nas políticas da União Européia. Por fim, limitando a escolha dos países em 3, devido às dificuldades de se obter informações sobre as políticas governamentais, o resultado, em ordem decrescente foi: Estados Unidos, União Européia e Japão, como era de se esperar, pois estes três são os principais financiadores em P&D em células a combustível e também em outros ramos.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é feita a análise dos dados obtidos e apresentados no capítulo anterior, cruzando as informações de cada uma das Bases de Dados. Evidentemente que o estabelecimento de correlações entre dados objetivos (quantitativos) e subjetivos (qualitativos) implica em se trabalhar com elevado grau de incertezas e imprecisões. Desta forma serão consideradas apenas as análises mais sólidas, ou seja, aquelas que possuem maior quantidade de argumentos e menor grau de incertezas, evitando-se análises cujas correlações sejam tênues e haja dúvidas importantes sobre sua veracidade.

6.1. Correlações entre as palavras-chave

Como foi apresentado no capítulo precedente, os gráficos com os números de artigos que contém as palavras-chave adotadas distribuídos ao longo dos anos apontam para existência de uma correlação entre o número de artigos contendo estas palavras, mas a certeza destas correlações somente pode ser estabelecida a partir do tratamento estatístico destes dados. Para isso adotou-se dois procedimentos simples. O primeiro a partir da determinação do quadrado do coeficiente de determinação da variabilidade de Pearson (R^2), utilizando o *software* Excel e o segundo a partir da determinação do percentual de correlação (ρ), calculada usando-se o *software* Minitab, entre os diversos cruzamentos das palavras-chave também mencionados no capítulo 5 deste trabalho.

Conforme mencionado no Capítulo 4, R^2 pode ser interpretado como a proporção da variância de uma palavra-chave que pode ser atribuída à variância de outra. Se $R^2 = 1$ então expressa uma variabilidade perfeita, enquanto que valores menores que a unidade indicará o grau de relação entre palavras-chave consideradas.

Cabe aqui também observar que mesmo a existência de um alto grau de relação não implica na dependência entre as variáveis consideradas, ou seja, as variâncias de uma não podem com certeza ser atribuídas à outra. Da mesma forma, deve-se chamar a atenção para o fato desta relação se referir a uma regressão linear, não sendo capaz de detectar outras funções matemáticas (quadráticas, exponenciais, etc.), mas não há na análise aqui realizada nenhuma indicação de que as eventuais relações, quando existirem, não sejam lineares.

O segundo procedimento foi feito utilizando-se o *software* Minitab. Dessa análise de correlação (ρ) entre as palavras-chave, teste T de *Student*, encontrou-se o P-valor = 0 (zero) em todos os cruzamentos das palavras-chave, sendo assim, como o grau de confiança foi de 95% tem-se o valor de $\alpha = 5\%$. Logo, $\alpha \geq$ P-valor, o que elimina a hipótese de correlação nula (teste de hipótese H_0). Assim temos, $\alpha = 0,05$ para todas as análises e P-valor = 0 (zero) em todos os casos também, o que leva a conclusão de que a hipótese de correlação nula é rejeitada:

$$\alpha \geq \text{P-valor} \Rightarrow \text{rejeita-se } H_0 \text{ (hipótese de correlação nula).}$$

Logo, tem-se a hipótese H_1 , em que a correlação é diferente de zero, o que valida todos os valores de correlação (ρ) encontrados.

Assim, com as palavras-chave selecionadas (*hydrogen, fuel cell, greenhouse gas, carbon capture and sequestration*) elaborou-se o cruzamento duas a duas, sendo os resultados gráficos das regressões lineares mostrados nas Figuras 6.1 a 6.6, assim como os valores de R^2 e as equações das retas que representam cada análise, bem como os valores percentuais resultantes da análise de correlação (ρ) obtidos através do *software* Minitab são apresentados na Tabela 6.1.

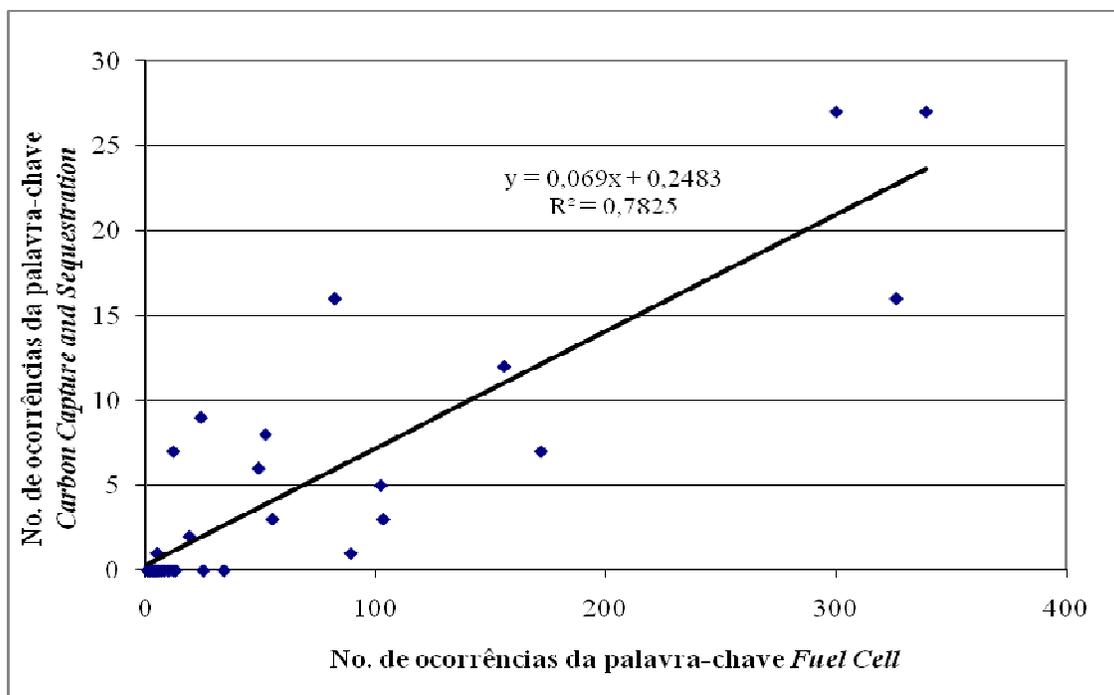


Figura 6.3: Gráfico de dispersão dos números de publicações entre *fuel cell* e *carbon capture and sequestration* com a equação da reta e valor de R^2 .
 Fonte: Elaboração própria.

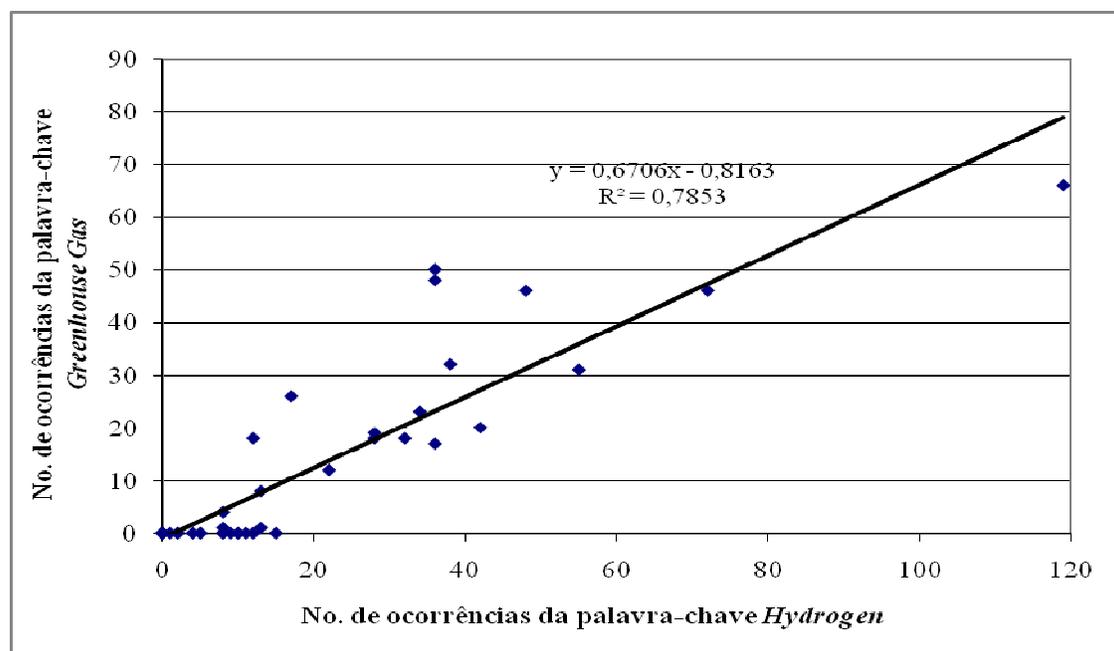


Figura 6.4: Gráfico de dispersão dos números de publicações entre *hydrogen* e *greenhouse gas* com a equação da reta e valor de R^2 .
 Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6.1: Valores calculados de R² e Grau de Correlação (ρ) entre as palavras-chave¹⁶.

GRÁFICO	PALAVRA-CHAVE 1	PALAVRA-CHAVE 2	R ² *	P (%)**
6.1	<i>fuel cell</i>	<i>hydrogen</i>	0,7663	87,5
2.2	<i>fuel cell</i>	<i>greenhouse gas</i>	0,6421	80,1
3.3	<i>fuel cell</i>	<i>carbon capture and sequestration</i>	0,7825	88,5
4.4	<i>hydrogen</i>	<i>greenhouse gas</i>	0,7853	88,6
6.5	<i>hydrogen</i>	<i>carbon capture and sequestration</i>	0,7192	89,2
6.6	<i>greenhouse gas</i>	<i>carbon capture and sequestration</i>	0,7949	89,2

Fonte: Elaboração própria.

Nota:

* Coeficiente de determinação da variabilidade (R²), calculado no *software* Excel.

** Grau de correlação (ρ) calculado no *software* Minitab.

Como já comentado, mesmo valores elevados de R² não implicam em dependência que tampouco faz sentido nestes casos. Portanto, a conclusão para esses valores é que fatores influenciaram ambas as palavras-chave simultaneamente, de forma que artigos sobre estes temas foram publicados (ou não) no mesmo ano. Um destes fatores pode ser exatamente os preços do petróleo no mercado internacional, cuja elevação tem sido acompanhada de aumento nos artigos com as palavras-chave selecionadas (Figuras 6.7 e 6.8). Este fato ocorreu a partir dos anos 90 do mesmo século, se estendendo até os dias atuais.

Assim sendo, pode-se concluir que uma redução dos preços internacionais do petróleo terá como efeito a redução do interesse destes temas (diminuição do número de artigos e publicações com as palavras-chave consideradas), mas não a ponto de retornar este interesse aos níveis anteriores, uma vez que a componente ambiental, praticamente inexistente no período da “Crise do Petróleo” hoje é um importante componente que manteria sua influência. Pode-se imaginar até que o fator ambiental teria esta sua influência ampliada, pois a redução dos preços poderia elevar

¹⁶ Vale ressaltar que o *software* Minitab também calcula os valores de R², bem como as equações das retas dos gráficos de dispersão (regressão linear), sendo que, os seus resultados (valores) são similares aos resultados do Excel (ver Anexo 2). Ressalta-se que não há intenção em se comparar os *softwares*, mas sim realizar uma análise estatística (correlação no Minitab) que possa complementar a outra (regressão linear no Excel).

o consumo de petróleo e seus derivados, com o conseqüente aumento das emissões de gases de efeito estufa, provocando uma maior procura das alternativas a estes energéticos.

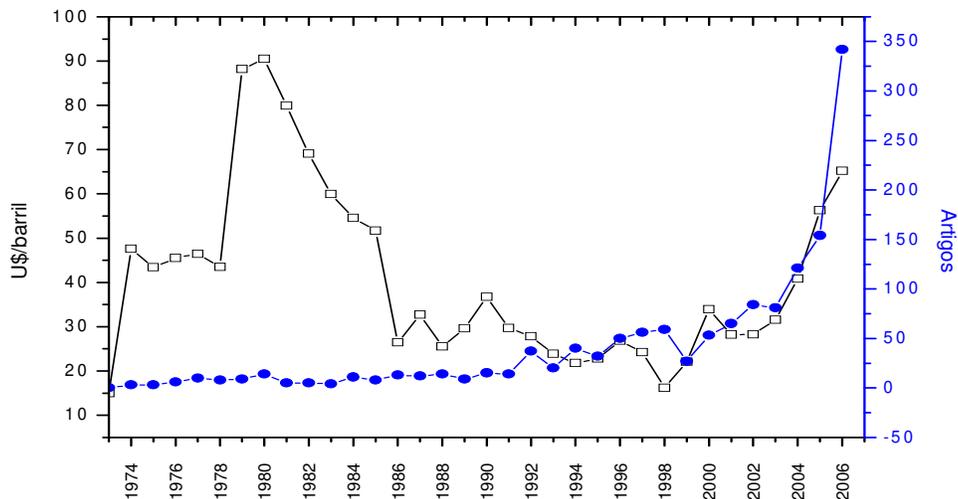


Figura 6.7: Evolução do preço do petróleo e o número de artigos publicados com a palavra-chave *hydrogen*.

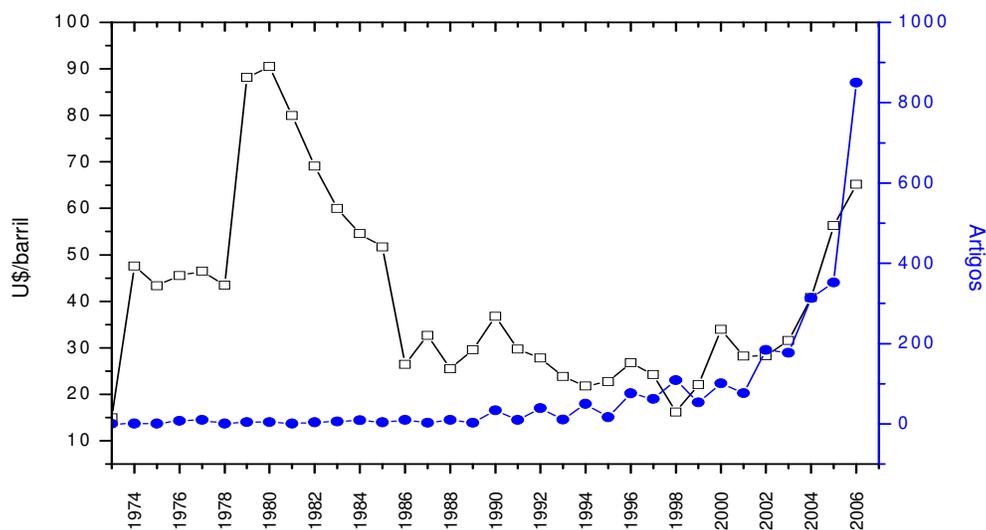


Figura 6.8: Evolução nos preços do petróleo e o número de artigos publicados com a palavra-chave *fuel cell*.

Legenda:

- => Preço do barril de petróleo
- => Nº. de artigos

Inúmeros estudos têm apontado que apesar dos preços internacionais do petróleo estarem pressionados por níveis elevados de consumo, principalmente por parte de países emergentes com taxas de crescimento acima da média mundial, como Índia e China, mesmo que estes países venham a reduzir seus consumos os preços atuais dificilmente voltariam aos valores dos anos 80 do Século XX (Vargas, 2005), níveis estes que inviabilizam economicamente a grande maioria das alternativas energéticas como eólica, biomassas e mesmo hidráulica (Apolinário, 2004; Camargo, 2004; Ferreira, 2003; Silva, 2003). Portanto, a presente influência do fator petróleo deverá ser mantida pelos próximos anos.

Quanto ao fator meio ambiente, a expectativa atual é que sua influência seja mantida ou até mesmo ampliada, em vista das preocupantes constatações sobre as mudanças climáticas verificadas em todo o mundo. Constatações estas apresentadas através do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima - Mudança do Clima 2007, Quarto Relatório de Avaliação do IPCC, divulgado no início de 2007.

6.2. Hidrogênio e Células a Combustível

Um fato que não pode passar despercebido na análise dos gráficos do capítulo anterior é que durante o primeiro período que o tema hidrogênio esteve em evidência (“Crise do Petróleo”), esta evidência não foi acompanhada de igual interesse pelas células a combustível. É fato que naquele momento a tecnologia destes dispositivos não tinha alcançado os níveis que viriam a ter 20 anos depois, no segundo período, mas programas de P&D poderiam ter sido propostos e recursos alocados para estas pesquisas. Mas isto não ocorreu.

Atualmente, o tema células a combustível tem merecido uma atenção elevada, superior mesmo ao tema hidrogênio, o que pode ser confirmado examinando-se a Figura 5.1, pág. 51. As células a combustível podem ser consideradas como sistemas com amplo espaço para desenvolvimento e inovações, com muitas oportunidades de obtenção de propriedades industriais

e patentes. Mas apenas estes fatores não são suficientes para justificar os enormes investimentos que têm sido feitos nesta área.

Portanto, vale a pena então analisar alguns casos, sendo que neste trabalho foram selecionados três dos principais países, Estados Unidos, Japão e Alemanha, este último como representante da União Européia. Entre estes, o destaque maior é para as políticas e programas norte-americanos, não apenas pela influência política e econômica que o país exerce em todo o mundo, mas também pelos elevados investimentos que tem feito nestas áreas.

Observando-se novamente o gráfico da Figura 5.1 nota-se o crescimento das publicações a partir do início dos anos 90, com uma taxa ainda maior a partir do ano 2000. Como o primeiro mandato do presidente dos Estados Unidos, George W. Bush começou em janeiro de 2001, pode-se dizer, também, pelos investimentos e pelos programas que seu governo realizou em hidrogênio e células a combustível, que este presidente teve influência direta no desenvolvimento destas tecnologias, conforme já foi comentado anteriormente.

Uma importante observação pode ser obtida do discurso do presidente Bush, quando do anúncio do investimento de 1,2 bilhões de dólares em hidrogênio e células a combustível, (apresentada no item 3.2.1 do Capítulo 3). A referência do presidente é para o uso automotivo, nada mencionando sobre a energia elétrica (no caso das células a combustível) utilizada em residências, no comércio ou na indústria. Portanto, verifica-se aí a intenção do uso desta tecnologia prioritariamente para veículos, que no caso norte-americano recai sobre veículos de passeio, uma vez que o conceito de transporte coletivo não faz parte da cultura do país.

Os resultados da análise dos artigos científicos, apresentados nas Figuras 6.9 e 6.10, apontam nessa mesma direção, ou seja, corrobora com o discurso do presidente Bush sobre a aplicação automotiva das células a combustível.

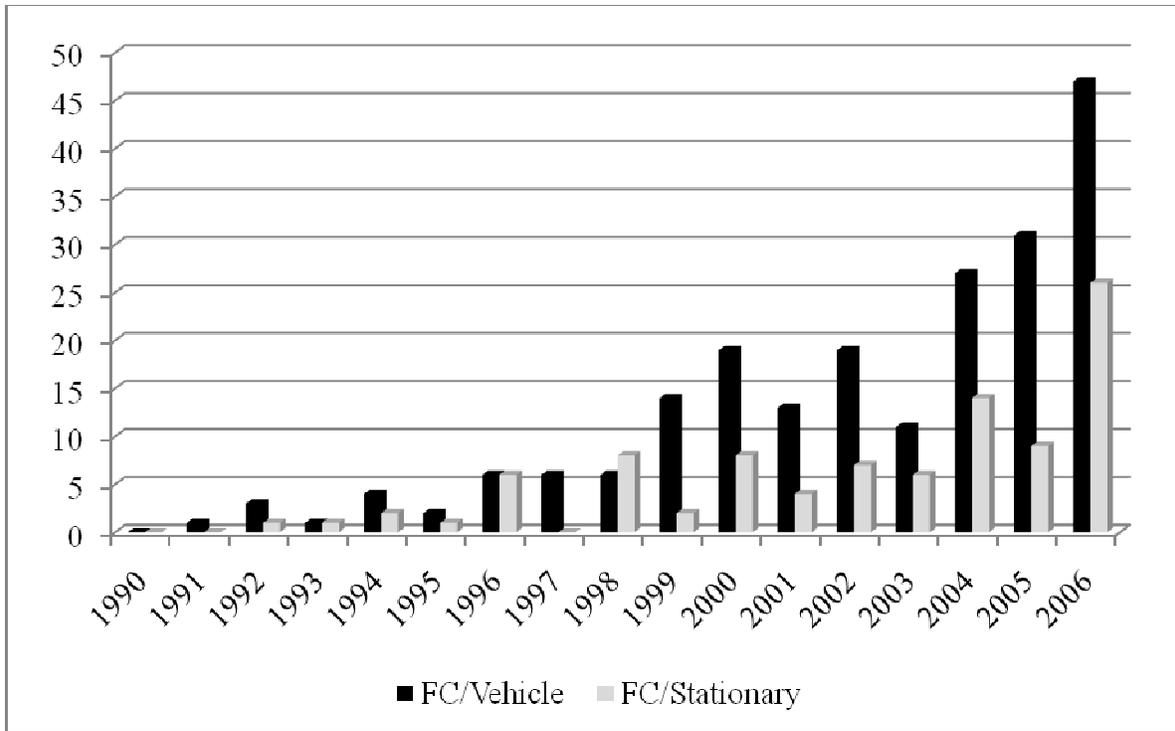


Figura 6.9: Número de artigos sobre aplicações estacionárias e veiculares das células a combustível.

Fonte: Elaboração própria.

Os países identificados na análise dos artigos que mais pesquisam a aplicação automotiva das células a combustível são Estados Unidos, Alemanha, Japão, Reino Unido, Canadá e Coréia do Sul.

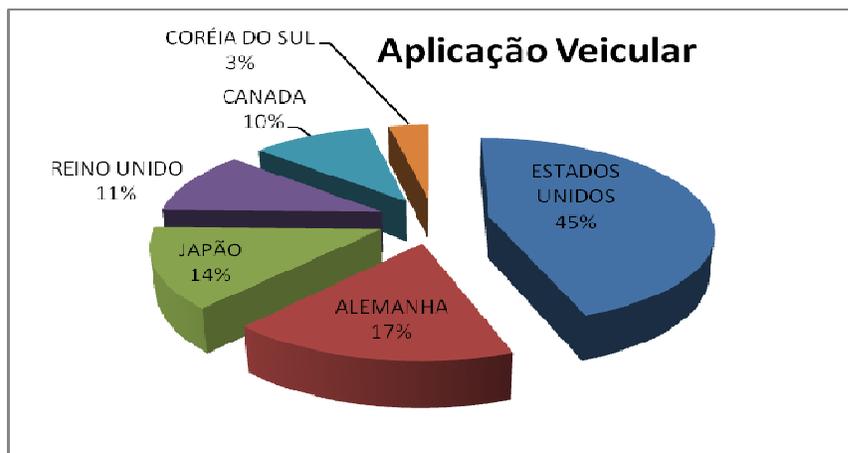


Figura 6.10: Relação dos países que mais pesquisam a aplicação automotiva das células a combustível.

Fonte: Elaboração própria.

Outro fato significativo é que a aplicação estacionária, a maioria como Geração Distribuída (GD), não apresenta o mesmo nível de investimentos do setor automotivo, pois células a combustível com potência mais alta (100 a 1.000 kW) ainda não são comerciais e o custo é elevado. Não há, portanto, junto aos produtores e/ou distribuidores de energia elétrica o mesmo entusiasmo com esta tecnologia. Se por um lado as empresas do setor elétrico não têm manifestado grande interesse pela tecnologia das células a combustível, por outro tampouco têm manifestado oposição ou mesmo restrições aos investimentos governamentais que vêm sendo feitos no seu desenvolvimento. Não que estas empresas estejam se colocando completamente à margem deste processo, mas não deixa de chamar a atenção o fato deste setor, com forte presença na formulação de políticas públicas e com elevada capacidade de investimentos, como algumas delas fizeram com a energia solar fotovoltaica (*British Petroleum e Shell*), não estar externando oposição à introdução desta tecnologia. O resultado da análise dos artigos científicos indicou que os países com maior número de publicações em aplicação estacionária para células a combustível são Alemanha, Estados Unidos, Japão, Reino Unido, Canadá, conforme Figura 6.11.



Figura 6.11: Relação dos países que mais pesquisam a aplicação estacionária das células a combustível.

Fonte: Elaboração própria.

Isto é claro, no que se refere aos países desenvolvidos, que têm comandado o processo de desenvolvimento destas tecnologias. Isto não se verifica em países periféricos (os chamados emergentes), uma vez que nestes países o setor automotivo é composto principalmente por

montadoras de veículos, que muito pouco realizam em P&D, atividade quase sempre exercida pelas matrizes, que depois repassam as inovações para suas unidades no exterior.

Sendo esta a aplicação principal esperada para as células a combustível, então os investimentos devem estar sendo alocados prioritariamente nas células tipo PEM, mais adequadas a esta aplicação, conforme foi mostrado no Capítulo 2. A Figura 6.12 apresenta os resultados da análise dos artigos científicos. Para as aplicações estacionárias (GD) a melhor alternativa são as células tipo SOFC, cujo desenvolvimento ainda necessita de pesquisas mais fundamentais (novos materiais, catalisadores adequados, etc.).

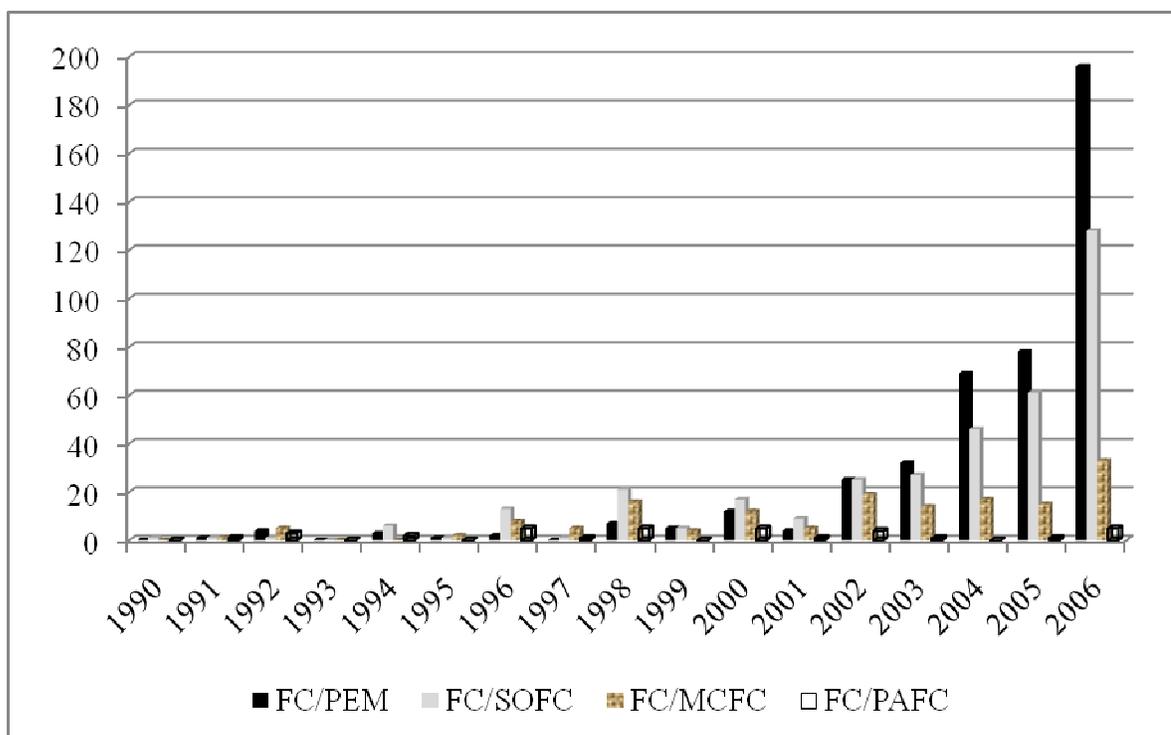


Figura 6.12: Cruzamento da palavra-chave *fuel cell* com os tipos de células a combustível.
 Fonte: Elaboração própria.

Os países com maior número de publicações em células a combustível tipo PEM, apresentados na Figura 6.13, são Estados Unidos, Alemanha, Japão, Canadá, Reino Unido e Coreia do Sul. A Figura 6.14 apresenta os resultados dos países que mais pesquisam em células a combustível tipo SOFC.

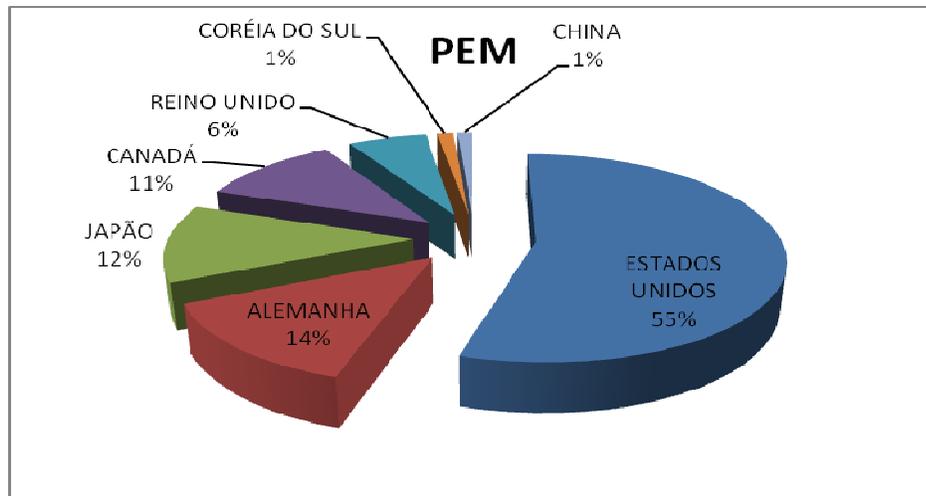


Figura 6.13: Relação dos países que mais pesquisam células a combustível tipo PEM.
 Fonte: Elaboração própria.

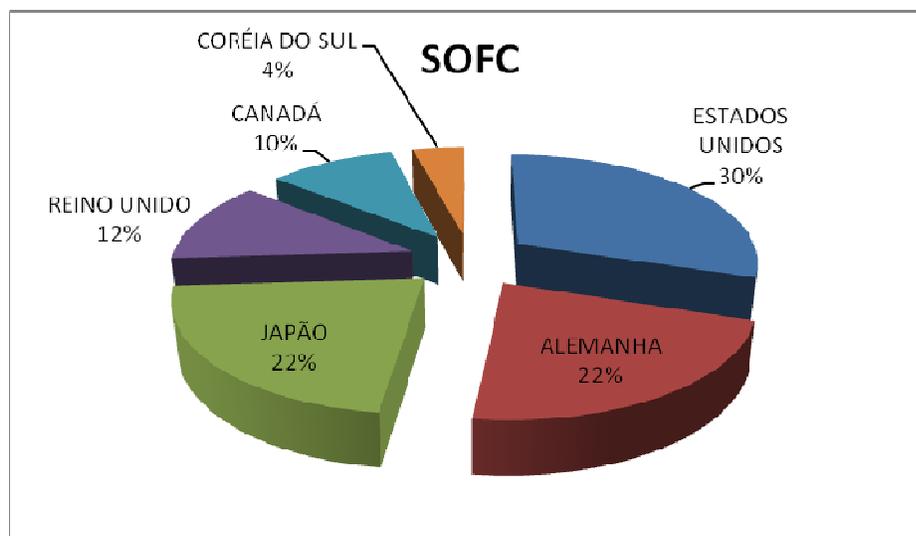


Figura 6.14: Relação dos países que mais pesquisam células a combustível tipo SOFC.
 Fonte: Elaboração própria.

O uso das células a combustível em veículos pode ser feito de três maneiras básicas (Duarte, 2004):

- hidrogênio armazenado em cilindros pressurizados ou na forma líquida;

- produção do hidrogênio embarcado (*on board*) por meio de reformador de hidrocarboneto; e
- uso do combustível diretamente na célula (DMFC – Direct Methanol Fuel Cell)

O último caso ainda necessita de muito desenvolvimento científico e tecnológico, em vista das menores eficiências obtidas. Os dois primeiros casos já foram testados em veículos (protótipos) com muitos quilômetros rodados, de forma que podem ser considerados tecnicamente disponíveis. Os principais protótipos e modelos dos fabricantes de veículos podem ser vistos, com suas características técnicas, em muitos estudos (Ferreira, 2007; Esteves 2007) e sítios na Internet.

Um fato importante para a compreensão das estratégias que vêm sendo adotadas para esta tecnologia foi à descontinuidade do programa americano de veículos com reforma embarcada. A partir deste momento o interesse dos fabricantes de veículos foi focado na tecnologia do hidrogênio pressurizado, uma vez que o uso de hidrogênio líquido apresenta dificuldades e custos muito superiores, exceto talvez para aplicações aeroespaciais. Como consequência, um grande avanço foi dado no desenvolvimento de cilindros leves (fibras de carbono e outros compósitos) para armazenamento de hidrogênio em pressões acima das já estabelecidas para uso veicular do gás natural.

O processo de reforma de combustível líquido embarcado significa a solução do problema de armazenamento do hidrogênio nos veículos. Este gás, de baixa densidade de energia por volume, sempre implicou no uso de tanques volumosos, pesados, mesmo assim deixando os veículos com pequena autonomia, quando comparados com os convencionais. Como principal desvantagem, o sistema embarcado exigia a instalação de complexo sistema de reforma e purificação do hidrogênio no interior dos veículos, que também significava a ocupação de grande espaço, problema minimizado no protótipo Classe A da Daimler-Benz com a elevação do piso do veículo, criando um espaço embaixo do assoalho. Além destes aspectos relativos ao veículo, a reforma embarcada também implicava na desnecessária construção de estações especiais de abastecimento, uma vez que os postos convencionais já dispõem dos combustíveis a serem

utilizados (gasolina ou etanol), ou poderiam introduzir tanques de novos combustíveis líquidos (metanol, por exemplo) sem grandes dificuldades.

Outro aspecto interessante é que no caso de uso das células SOFC em veículos não há a necessidade do reformador embarcado, podendo gás natural ou mesmo metanol ser utilizado diretamente nas células, uma vez que neste caso a reforma ocorre internamente no dispositivo. Mas as dificuldades para a manutenção da temperatura de operação deste tipo de célula, no regime de funcionamento de um veículo urbano (funcionamento intermitente), com a tecnologia atual, acabou por reduzir o interesse nesta configuração de veículos. A tendência neste caso parece ser a de realizar a reforma fora da SOFC devido aos problemas de formação de carbono que prejudicam a célula.

No que diz respeito à produção de hidrogênio fez-se um levantamento das publicações a fim de verificar quais as fontes estavam sendo pesquisadas. As seguintes fontes foram encontradas:

- combustíveis fósseis
- energia nuclear
- etanol
- metano (biogás)
- biodiesel
- vento

As fontes renováveis (etanol, biogás, biodiesel e vento) foram agrupadas em um único bloco e foram denominadas de “Renovável”. A Figura 6.15 apresenta os resultados obtidos a partir da consulta feita nos artigos.

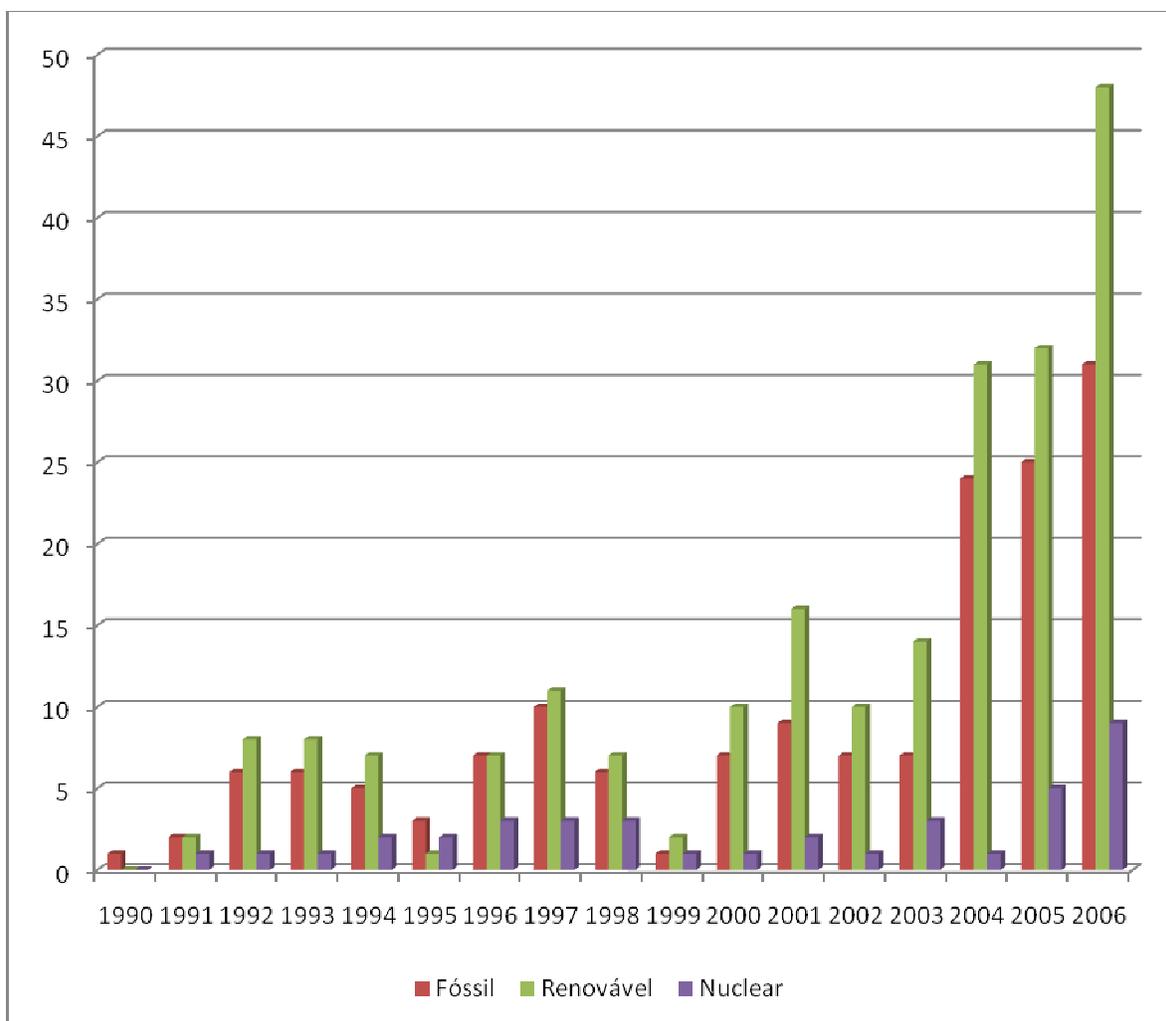


Figura 6.15: Número de artigos sobre fontes de produção de hidrogênio.
 Fonte: Elaboração própria.

Quando os combustíveis fósseis são comparados individualmente com cada fonte de energia renovável revela-se o interesse pelas fontes fósseis para obtenção de hidrogênio. Entretanto, quando comparado com o conjunto de energias renováveis o interesse pela obtenção do hidrogênio passa a ser a partir de fontes renováveis.

Analisando-se a Figura 6.16 conclui-se que as pesquisas para produção de hidrogênio a partir dos combustíveis fósseis têm sido feita de forma mais intensiva pelos Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Japão, Alemanha e Noruega. Juntamente com os países objeto desse estudo (Estados Unidos, Japão e Alemanha) vale ressaltar o interesse de países em produzir o

hidrogênio a partir do petróleo como a Noruega que se destaca por ser um dos países líderes em tecnologia petrolífera em alto mar.

Em relação às pesquisas realizadas para produção de hidrogênio a partir das fontes renováveis de energia os países com o maior número de publicações são Estados Unidos, Alemanha, Canadá, Reino Unido, Países Baixos, Japão e Itália

Os países que mais se destacaram em produção de hidrogênio a partir da energia nuclear foram Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Reino Unido e França.

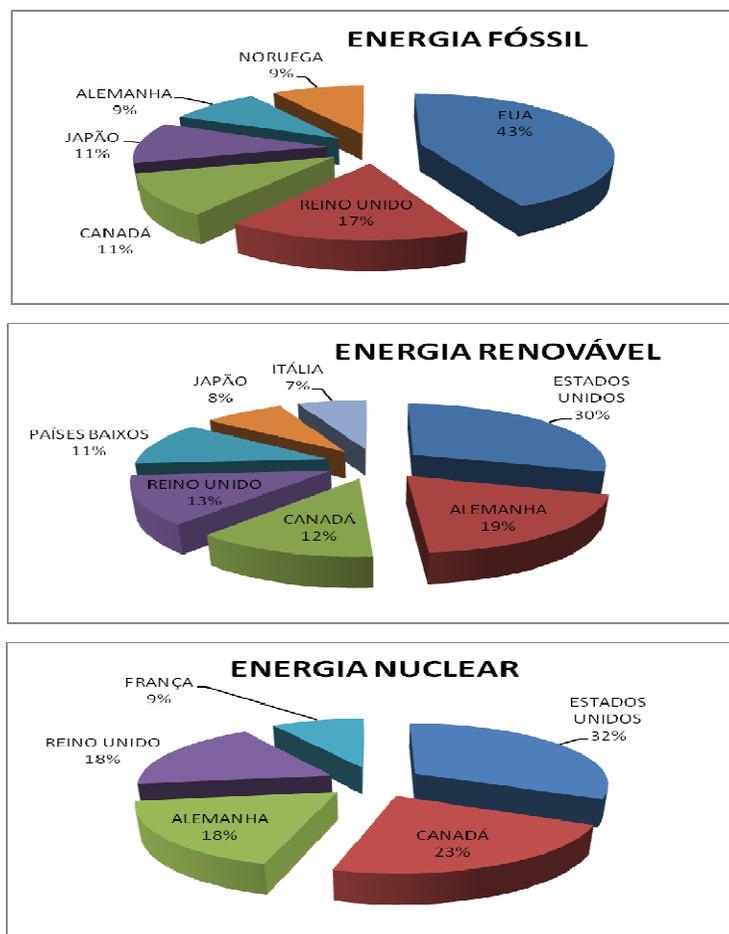


Figura 6.16: Relação entre os países e as fontes para produção de hidrogênio.
Fonte: Elaboração própria

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Considerando os objetivos desta tese e fundamentando-se nos resultados desta pesquisa conclui-se que:

- A primeira conclusão, de caráter geral, é que o uso energético do hidrogênio nunca foi tão estudado e proposto como solução de vários problemas do atual quadro energético de muitos países. A importância dada a esta alternativa varia de país a país, predominando o interesse dos países mais desenvolvidos, que possuem condições de realizar os elevados investimentos que vêm sendo feitos, principalmente no desenvolvimento da tecnologia das células a combustível. A magnitude dos recursos investidos por governos e empresas permite concluir que a introdução do uso energético do hidrogênio será uma questão de tempo, não sendo possível, neste trabalho prever quando isso ocorrerá. A inserção do uso energético do hidrogênio dependerá da evolução do quadro dos problemas relacionados às mudanças climáticas, do suprimento de petróleo e seus derivados aos principais países consumidores e dos avanços tecnológicos nesta área.

- No período em que ocorreu a chamada “Crise do Petróleo” (1973-1979) verifica-se que o número de publicações para as palavras-chave *fuel cell* e *hydrogen*, foi pequeno. Entretanto, um fato que não pode passar despercebido na análise dos gráficos é que durante esse período o tema hidrogênio esteve em evidência e esta evidência não foi acompanhada de igual interesse pelas células a combustível.

- Em relação à década de 80 observa-se que não houve aumento significativo no número de publicações, mantendo, portanto os mesmos patamares da década de 70.

- A partir de 1992 observa-se um crescimento maior do número de publicações para as palavras-chave *hydrogen* e *fuel cell*, ano em que ocorreu a Convenção Marco das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – ECO-92, no Rio de Janeiro. Durante a década de 90, apesar das

oscilações o número de publicações é crescente, culminando no ano de 1998, no qual se concentra o maior número de publicações científicas sobre o tema *hydrogen* e no ano de 1999 sobre o tema *fuel cell*, sendo este o ano de abertura para assinaturas do Protocolo de Quioto. A partir de 1996 o número de publicações em *fuel cell* ultrapassa o número de publicações em *hydrogen*.

- No período de 2000 a 2006 é que se verifica o crescimento mais importante para o número de publicações sobre *hydrogen* e *fuel cell*. A partir da análise feita dos programas governamentais constatou-se que em 2003 foi constituído o IPHE por iniciativa dos Estados Unidos, visando acelerar a penetração no mercado da tecnologia do hidrogênio e das células a combustível (IPHE, 2007). Vale ressaltar que a decisão dos Estados Unidos em não ratificar o Protocolo de Quioto ocorreu em 2001. Como o primeiro mandato do presidente dos Estados Unidos, George W. Bush começou em janeiro de 2001, pode-se dizer, também pelos investimentos e pelos programas que seu governo realizou em hidrogênio e células a combustível, que este presidente teve influência direta no desenvolvimento destas tecnologias, conforme já foi comentado anteriormente. Não se pode afirmar que os investimentos feitos pelo governo norte-americano em tecnologias do hidrogênio e de células a combustíveis foram uma alternativa ao Protocolo de Quito, no entanto, os resultados dessa pesquisa mostram que as pesquisas realizadas nesse tema tiveram um crescimento substancial a partir do ano de 2001, principalmente nos Estados Unidos.

- Em relação às palavras-chave *greenhouse gas* e *carbon capture and sequestration*, verifica-se um aumento, ou melhor, iniciam-se as publicações a partir da década de 90, com picos nos anos de 1993 e 1997, período após a ECO-92, com destaque no ano de 2003. Os resultados apontam que o interesse pelo tema *carbon capture and sequestration* surgiu em meados da década de 90, com destaque no ano de 2003.

- Quanto à frequência relativa das palavras-chave consideradas, verifica-se o predomínio das publicações científicas ligadas à palavra *fuel cell*, com 61% e *hydrogen* com 24%. Em relação à *greenhouse gas* e *carbon capture and sequestration*, tem-se respectivamente 11% e 3%.

- A análise dos dados das publicações forneceu também uma idéia geral da distribuição dos artigos por países. Dos 3.501 artigos encontrados chegou-se ao número total de 79 países. Isto significa dizer que dos 241 países do mundo, 79 deles tem uma ou mais publicações sobre células a combustível, hidrogênio ou alguma das palavras-chaves consideradas.

- Na classificação dos países que mais produzem publicações científicas (Estados Unidos, Japão, Alemanha, China, Reino Unido, Canadá, Coreia do Sul, Itália, França, Taiwan, Países Baixos, Índia, Austrália, Suécia e Brasil) destacam-se as palavras chave *fuel cell* e *hydrogen* classificadas em primeiro lugar como um “empate técnico”, sendo bastante proporcional a distribuição destas em cada país citado.

- A palavra-chave *greenhouse gas* em alguns países como a Suécia, Austrália, Países Baixos, Reino Unido torna-se tão importante quanto *fuel cell* e *hydrogen*. A proporção é de um terço das publicações para cada uma dessas palavras-chave; chegando até mesmo a superar uma dessas outras duas palavras chave. Já no caso da palavra-chave *carbon capture and sequestration* não há praticamente exceção nenhuma estando, dentre elas, no último (terceiro) lugar nesta classificação.

- A análise estatística demonstrou que há uma correlação entre *fuel cell* e *hydrogen*, isto implica dizer que fatores influenciaram ambas simultaneamente, de forma que artigos sobre estes temas foram publicados no mesmo período. Um destes fatores podem ser os preços do petróleo no mercado internacional, cuja elevação tem sido acompanhada de um aumento no número de artigos publicados com as palavras-chave *fuel cell* e *hydrogen*. Este fato ocorreu a partir da década de 90, se estendendo até os dias atuais.

- No discurso pronunciado pelo presidente Bush dos Estados Unidos em 2003 foi mencionado o uso automotivo das células a combustível, sendo que as análises dos resultados dessa pesquisa apontam também nessa mesma direção. Os países que mais se destacaram nesse tipo de pesquisa foram Estados Unidos, Alemanha, Japão, Canadá, Reino Unido e Coreia do Sul. Por outro lado, a aplicação estacionária não apresenta o mesmo nível de investimentos do setor

automotivo, pois células a combustível com potência mais alta (100 a 1.000 kW) ainda não são comerciais e o custo é elevado. O resultado da análise dos artigos científicos indicou que os países com maior número de publicações em aplicação estacionária para células a combustível são Estados Unidos, Alemanha, Japão, Reino Unido, Canadá.

- Os resultados indicam que o interesse maior está em células do tipo PEM seguido do tipo SOFC. Os países com maior número de publicações em células a combustível tipo PEM são Estados Unidos, Alemanha, Canadá, Japão e Coreia do Sul. Em relação às células tipo SOFC os países que mais pesquisam são Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido, Japão e Coreia do Sul.

- As células PEM operam com hidrogênio, combustível que precisa ser extraído de compostos que possuem este elemento químico. Neste caso duas tecnologias se destacam: a eletrólise da água e os reformadores de hidrocarbonetos. Apesar de se constituírem em tecnologias dominadas, estas se encontram mais disseminadas por várias empresas e em diversos países. Por serem tecnologias mais simples que as das células a combustível, neste campo há mais possibilidades de domínio tecnológico por parte de países como o Brasil, comparado ao domínio das tecnologias das células a combustível.

- Os resultados indicam que quando os combustíveis fósseis são comparados individualmente com cada fonte de energia renovável (etanol, biogás, biodiesel e vento) revela-se o interesse pelas fontes fósseis para obtenção de hidrogênio. Entretanto, quando comparado com o conjunto de energias renováveis o interesse pela obtenção do hidrogênio passa a ser a partir de fontes renováveis.

- Constatou-se, a partir da pesquisa realizada nas publicações, que a produção de hidrogênio a partir dos combustíveis fósseis tem sido feita de forma mais intensiva pelos Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Japão, Alemanha e Noruega.

- Em relação às pesquisas realizadas para produção de hidrogênio a partir das fontes renováveis de energia, os países com o maior número de publicações são Estados Unidos,

Alemanha, Canadá, Reino Unido, Países Baixos, Japão e Itália. Os países que mais se destacaram em produção de hidrogênio a partir da energia nuclear foram Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Reino Unido e França.

O tema tecnologia do hidrogênio e das células a combustível, abordados neste trabalho, é amplo e muitos estudos complementares podem se elaborar. A seguir são feitas algumas recomendações para estudos futuros:

- Incorporar a análise de patentes ao estudo;
- Realizar uma análise prospectiva sobre a utilização das células a combustível em escala comercial;
- Fazer o levantamento das características técnicas das células a combustível;
- Investigar as tendências das vocações tecnológicas do Brasil, avaliadas a partir da análise de patentes, de artigos científicos e do perfil dos grupos de pesquisa;
- Caracterizar o conhecimento e os temas tecnológicos que se destacam nas instituições de ensino de pesquisa e nas empresas nacionais;
- Contabilizar o potencial de créditos de carbono que poderia ser conseguido com a substituição da geração de energia elétrica convencional pela geração de energia elétrica a partir das células a combustível.

Referências

APOLINÁRIO, F. R. **Análise do desempenho de um sistema de conversão de energia solar-fotovoltaica em hidrogênio.** 83p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

APPLEBY, A. J. **Characteristics of Fuel Cell Systems.** In: BLOMEN, L. J. M. J., MUGERWA, M. N. Fuel Cell Systems New York: Plenum Press, 614p, 1993.

BRITANNICA. Encyclopedia Britannica. Disponível em: <<http://www.britannica.com/eb/article-9022590/Jacques-Alexandre-Cesar-Charles>>. Acesso: 17 mar. 2007.

BCC Inc. **World Global Hydrogen Demand by Type of Category with Table: Bulk Hydrogen Demand.** 2002.

BEN, Balanço Energético Nacional. **Recursos e reservas energéticas.** Ministério de Minas e Energia, 2007.

BRIGHT, J. R. **Practical Technology Forecasting-Austin: Technology Futures, Inc.** 1998.

CAMARGO, J. C. **O etanol como fonte de hidrogênio para células a combustível na geração distribuída de energia elétrica.** 151p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

CAMARGO, J. C. **Medidas do potencial fotovoltaico na região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari.** 108p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos. Faculdade de Engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

CLARK II, W. W., Rifkin, J. **A green hydrogen economy.** *Energy Policy*, v.34, pp.2630-2639, 2006.

CSLF. **Carbon Sequestration Leadership Forum**. Disponível em: <www.clsforum.org>
Acesso em: 20 Fev. 2007.

CORAZZA, R.I. **Políticas públicas para tecnologias mais limpas: uma análise das contribuições da economia do meio ambiente**. 191p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

DOE - US Department of Energy. **Fuel Cell Handbook**. 5ª edição. EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation. Morgantown, West Virginia, EUA, 352 p. 2000.

DOE (a) - US Department of Energy. **Carbon Sequestration - Technology Roadmap and Program Plan**. U.S., 2003. Department of Energy/DOE - Office of Fossil Energy - National Energy Technology Laboratory, 2003. Disponível em: <<http://www.energy.gov>>. Acesso em: 11 nov. 2006.

DOE (b) - US Department of Energy. **Hydrogen Program**, “Record 5010: HFI Budget FY 2004-2007”, 2003. Disponível em: http://www.hydrogen.energy.gov/program_records.html. Acesso em: 11 nov. 2006.

DOE – US Department of Energy. **Fuel Cell Vehicle World Survey 2003**. Breakthrough Technologies Institute, Washington, DC; Energy Efficiency and Renewable Energy; February, 2004.

DOE (a) - US Department of Energy. **Releases Climate Change Technology Program Strategic Plan**. Disponível em: <<http://www.energy.gov/news/4178.htm>>. Acesso em: 20 Fev. 2007.

DOE (b) - US Department of Energy. Disponível em: <<http://www.energy.gov/news/1727.htm>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

DOE (c) - US Department of Energy. Disponível em: <<http://www.energy.gov/news/3778.htm>>. Acesso em: 22 Fev. 2007.

DUARTE, P.A. **Impactos ambientais e na matriz de consumo de combustíveis pela introdução de uma frota de veículos leves com células a combustível na cidade de São Paulo – SP**. 145p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas

Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

EARTHSCAPE. Disponível em: <<http://www.earthscape.org/r3/hop01/hop01.pdf>> Acesso em: 20 fev. 2004.

EIA - U.S. Energy Information Administration. **Independent Statistics and Analysis**. Annual Oil Market Chronology. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, publicações e serviços. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/emeu/cabs/AOMC/Overview.html>. Acesso em: 08 set. 2007.

ESTEVES, G. R. T. **Custo da poluição dos transportes na saúde pública da região metropolitana de São Paulo**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, tese de doutorado, 2007.

EU - **European Union Roadmap Towards a European Partnership for a Sustainable Hydrogen Economy**. Disponível em: <<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/03/1229&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en>>. Acesso em: 08 set. 2007.

EU - Commission Research. Disponível em: http://ec.europa.eu/research/fch/index_en.cfm. Acesso em: 08 set. 2007.

EVOBUS. Disponível em: <<http://www.evobus.com/>> Acesso em: 20 fev. 2007.

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. **Indicadores de ciência, tecnologia e inovação em São Paulo – 2001**. São Paulo: FAPESP, 488 p., 2002.

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. **Indicadores de ciência, tecnologia e inovação em São Paulo – 2004**. São Paulo: FAPESP, 2v., 992p., 2005.

FERREIRA, P.F.P. **Análise da viabilidade de sistemas de armazenamento de energia elétrica na forma de hidrogênio utilizando células a combustível**. 102p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FERREIRA, P.F.P. **Infra-estrutura para uso energético do hidrogênio: estações de abastecimento para veículos com células a combustível.** 149p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

FUEL CELL ENERGY. **Fuel Cell Energy**, 2007. Disponível em: <http://www.fuelcellenergy.com/>. Acesso: fev 2007.

FUEL CELLS. **Worldwide Hydrogen Fueling Stations**, 2007. Disponível em: <http://www.fuelcells.org/info/charts/h2fuelingstations.pdf>. Acesso em: 25/03/2007.

FUEL CELLS TODAY (a). Disponível em: <<http://www.fuelcells.org/info/charts/buses.pdf>>. Acesso em: 17 mar 2007.

FUEL CELLS TODAY(b). Disponível em: <<http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/EducationCentre/EducationCentreExternal/EduCentreDisplay/0,1741,History,00.html>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

FUEL CELLS TODAY (c). Disponível em: <<http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/EducationCentre/EducationCentreExternal/EduCentreDisplay/0,1741,History,00.html>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

FUELCELLS TODAY (d). Disponível em: <<http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/EducationCentre/EducationCentreExternal/EduCentreDisplay/0,1741,History,00.html>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

FUEL CELL TODAY (e). Disponível em: <<http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/EducationCentre/EducationCentreExternal/EduCentreDisplay/0,1741,History,00.html>>. Acesso em: 17 mar 2007.

FURTADO, A.T. **A crise energética mundial e o Brasil.** Novos Estudos CEBRAP, São Paulo, n.11, p.17-29, janeiro 1985.

GULLO, L.M.G. **Tecnologias para construção de rodovias: o documento de patente como ferramenta para a competitividade no Brasil.** 88p. Dissertação (Mestrado) – Marseille: Faculté des Sciences et Techniques de St. Jérôme, Université Aix – Marseille, 2002.

HINOSTROZA SUÁREZ, M.L. **Política energética e desenvolvimento sustentável: taxa sobre o carbono para mitigação de gases de efeito estufa no Brasil.** 299p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

HONDA. Disponível em: <<http://world.honda.com/FuelCell/>>. Acesso em: 20 fev. 2007.

HOOGERS, G. **Fuel Cell Technology Handbook.** CRC Press. Boca Raton, Florida, EUA. 2003

HYDROGEN Posture Plan: **An Integrated Research, Development and Demonstration Plan, 2006.** Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_posture_plan_dec06.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2007.

IEA-HIA. International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement. **In pursit of the future. 25 years of IEA research towards the realization of hydrogen energy systems.** 132p., 2004.

IEA. International Energy Agency. **Key World Energy Statistics,** 2006. Disponível em: <<http://www.iea.org/>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

IMF. International Monetary Fund. Report for Selected Countries and Subject. **World Economic Outlook Database.** Disponível em: <<http://www.imf.org/>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

IPHE. International Partnership for the Hydrogen Economy. Disponível em: <<http://www.iphe.net/>> Acesso em: 20 fev. 2007.

IPHE. Steering Commitee. Energy Conversion and Renewable Energy Department Agency for Natural Resources and Energy, METI, Japan, 2006.

LAMARÃO, S.T.N. **A energia elétrica como campo de pesquisa historiográfica no Brasil.** América Latina em La Historia Econômica, n.8, jul-dez 1970. Disponível em: <http://www.institutomora.edu.mx/revistas/Numero%208/8-3-SegioT_deNiemeyerL.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2006.

LARMINIE, J. **Fuel cell systems explained.** Editora John Willey & Sons. West Sussex, Inglaterra. 2ª ed., 405 p. 2003.

MARQUES, T.H. Companhia de Gás de São Paulo. **Revista Eletrônica Mackenzie de Casos (REMAC)**, ano II, n.2, jan-jun 2006. Disponível em: <<http://www.mackenzie.com.br/remac/2.2/02.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

MEADOWS, D. et al. **The Limits to Growth**. New York: Universe Books, 1972.

MCT. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php>> Acesso em: 16 nov. 2006.

MCT. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/4948.html>>. Acesso em: 16 nov. 2006.

MME. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 16 nov. 2007.

METI. Ministry of Economy, Trade and Industry. Japan. Disponível em: <<http://www.enecho.meti.go.jp/english/data/newnationalenergystrategy2006.pdf> >. Acesso em: 20 nov. 2006.

MICROSOFT Minitab, version 16.1.0. Versão demo do software disponibilizado gratuitamente pela Líder Softwares.

MONTEIRO, J.V.F. **A contribuição da automação para o mercado residencial brasileiro do gás combustível**. 2002. 139p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. Chapter 11, Simple Linear Regression and Correlation. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, 2003.

MICROSOFT Minitab, version 16.1.0. Versão demo do software disponibilizado gratuitamente pela Líder Softwares.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL; NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING. **The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs**. National Academies Press, Washington, D.C, 2004.

NAKICENOVIC, N. Energy **Perspectives into the Next Millennium: from resources scarcity to decarbonization**. Technological Forecasting and Social Change. 62, p.101–106, 1999.

NEGRÃO, R. **Desenvolvimento, meio ambiente e recursos naturais**. Notas de aula da disciplina Desenvolvimento, Meio Ambiente e Recursos Naturais. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

NONNENBERG, M. J. B. **Evolução recente dos preços do petróleo**. Nota Técnica, IPEA, Boletim Conjuntura, set 2004.

OECD. Organization for Economic Co-operation and Development. **Main Science and Technology Indicators**. STAN Indicators Database, May 2005. Disponível em: <<http://www.oecd.org/sti/ict/broadband>>. Acesso em: 16 nov. 2006.

OECD. Organization for Economic Co-operation and Development. **Factbook 2007: Economic, Environmental and Social Statistics**. Disponível em: <<http://www.oecd.org/>>. Acesso em: 16 nov. 2007.

PERSSON, O. **Measuring Scientific Output by on-line techniques**. In: Vann Rass, A.F.J. Handbook of Quantitative Studies of Science and Technology. Cap. 8. p. 229-252. Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands, 1988.

PORTER, A.L. DETAMPEL M.J. **Technology Opportunities Analysis**. Technological Forecasting and Social Change, n. 49, p. 237-255, 1995.

PORTER, A.L.. et al. **Technological futures analysis: towards integration of the Field and new methods**. Technological Forecasting and Social Change, New York, n.49, 2004.

PRATER, D.N., RUSEK, J.J. **Energy density of a methanol/hydrogen-peroxide fuel cell**. Applied Energy, Volume 74, Issues 1-2, January-February 2003, Pages 135-140

PRICE, D.J.S. Simão Mathias. Livros técnicos e científicos. Editora S.A. Rio de Janeiro, 1976.

SIEMENS. Disponível em : <http://www.energy.siemens.com/us/en/power-generation/fuel-cells/>, 2007

SILVA, E.P. **Hidrogênio: Geração, Armazenamento e Conservação.** In: E. L. La Rovere; L. P. Rosa; A. P. Rodrigues. (Org.). Hidrogênio: Geração, Armazenamento e Conservação. p. 402-420. Rio de Janeiro: Marco Zero/FINEP, 1985.

SILVA, E.P. **Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio.** Campinas: Editora da UNICAMP, v. 1. 204 p. 1991.

SILVA, E.P.; BARBOSA, S.R.C.S. **Tópicos Especiais em Planejamento de Sistemas Energéticos I.** Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, anotações de aula da disciplina Tópicos Especiais em Planejamento de Sistemas Energéticos I, 2003.

SILVA, E.P.; CORTEZ, L.A.B. **Fontes Renováveis de Energia.** Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, anotações de aula da disciplina Fonte Renováveis de Energia. 2003.

SILVA, E. P.; et al. **Estudo prospectivo sobre o uso do hidrogênio.** In: Tolmasquim, M.T.(organizador). Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

TARGINO, M.G. **Comunicação científica: o artigo de periódico nas atividades de ensino e pesquisa do docente universitário brasileiro na pós-graduação.** Tese (Doutorado) Universidade de Brasília, Brasília, 1998.

THE NATIONAL CENTER FOR PUBLIC RESEARCH. Disponível em: <<http://www.nationalcenter.org/>>. Acesso em: 16 nov. 2006.

UN. United Nations. Disponível em: <<http://www.un.org/>>. Acesso em: 16 nov. 2006.

U.S. CENTENNIAL OF FLIGHT COMMISSION. Disponível em: <<http://www.centennialofflight.gov/essay/Dictionary/Charles/DI16.htm>>. Acesso: 17 mar. 2007.

USINFO. U.S. Department of State's Bureau of International Information Programs. Disponível em: <<http://usinfo.state.gov>> Acesso em: 16 nov. 2006.

VARGAS, J. I.; ALVIM. C. F. **Preços do petróleo: o terceiro choque?.** Economia & Energia. Ano VIII, n. 47, jan 2005.

VELHO, L.M.S. **Estratégias para um sistema de indicadores de C&T no Brasil**. Parcerias estratégicas, n. 13, dezembro de 2001.

WATTS, R.J., PORTER, A.L. **Innovation Forecasting**. Technological Forecasting and Social Change, n. 56, p. 25-47, 1997.

WHITE HOUSE. Disponível em:

<<http://www.whitehouse.gov/news/releases/2003/01/20030128-19.html>> Acesso em: 16 NOV. 2006.

ZIMAN, J. Community and communications. In: *Public Knowledge, the social dimension of science*. London: Cambridge University Press, 1968.

ANEXO A – Número Total de Publicações Científicas

Número total de publicações científicas distribuídas por países (1970 a 2006).

PAÍS	Hydrogen	Fuel Cell	Greenhouse Gas	Carbon Capture/Sequest	Total
Estados Unidos	329	705	148	67	1.249
Alemanha	144	252	23	6	425
Japão	129	256	24	15	424
Reino Unido	83	173	82	15	353
Canadá	75	170	30	20	295
Coréia	77	212	2	1	292
China	90	169	16	5	280
Itália	46	130	14	6	196
Países Baixos	34	64	40	6	144
França	33	75	20	5	133
Taiwan	21	105	2	0	128
Índia	44	67	7	0	118
Suécia	19	48	20	7	94
Austrália	34	20	30	6	90
Espanha	14	51	5	3	73
Suíça	26	31	14	1	72
Brasil	27	33	9	0	69
Áustria	15	24	16	6	61
Singapura	15	35	0	0	50
Noruega	13	18	10	5	46
Dinamarca	9	13	20	0	42
Grécia	10	23	7	0	40
Finlândia	2	14	13	1	30
Turquia	17	9	4	0	30
Irã	8	13	2	0	23
Jordânia	16	0	6	0	22
Polônia	12	8	1	0	21
Tailândia	4	8	9	0	21
Bélgica	5	14	1	0	20
Israel	7	13	0	0	20
Arábia Saudita	8	9	1	0	18
Federação Russa	8	6	3	1	18
Egito	10	5	2	0	17
Malásia	5	8	4	0	17
Bulgária	11	0	3	0	14

PAÍS	Hydrogen	Fuel Cell	Greenhouse Gas	Carbon Capture/Sequest	Total
México	4	9	1	0	14
República Tcheca	10	1	1	0	12
Nova Zelândia	0	8	2	1	11
Emirados Árabes	4	6	0	0	10
Irlanda	3	3	4	0	10
Argentina	5	4	0	0	9
Iraque	8	1	0	0	9
Portugal	0	9	0	0	9
Eslovênia	0	8	0	0	8
África do Sul	0	3	3	0	6
Iugoslávia	4	1	0	0	5
Romênia	4	1	0	0	5
Croácia	2	1	1	0	4
Hungria	1	1	1	1	4
Sérvia e Montenegro	3	1	0	0	4
Sri Lanka	1	1	2	0	4
Chipre	0	1	2	0	3
Kuwait	2	1	0	0	3
Líbano	0	0	3	0	3
Argélia	2	0	0	0	2
Filipinas	0	0	1	1	2
Marrocos	2	0	0	0	2
Nigéria	1	1	0	0	2
Tanzânia	0	1	1	0	2
Ucrânia	1	1	0	0	2
Azerbaijão	1	0	0	0	1
Bielo-Rússia	0	1	0	0	1
Cazaquistão	0	0	1	0	1
Chile	0	0	1	0	1
Colômbia	1	0	0	0	1
Eslováquia	1	0	0	0	1
Líbia	1	0	0	0	1
Malawi	0	1	0	0	1
Nepal	0	0	1	0	1
Oman	1	0	0	0	1
Qatar	0	0	1	0	1
Quênia	1	0	0	0	1
República Fiji	0	0	1	0	1

PAÍS	Hydrogen	Fuel Cell	Greenhouse Gas	Carbon Capture/Sequest	Total
Senegal	0	0	1	0	1
Serra Leoa	0	0	1	0	1
Síria	1	0	0	0	1
Tunísia	1	0	0	0	1
Zâmbia	0	0	1	0	1
Zimbabwe	0	0	1	0	1
Total	1.465	2.846	619	179	5.109

Fonte: Elaboração própria

ANEXO B – Correlação das palavras-chave a partir do uso *software* Minitab

