

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA
NÍVEL MESTRADO**

SÉRGIO ALDRIGHI RAFFI

OS INVESTIMENTOS ESTATAIS NA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

São Leopoldo (RS)

2012

Sérgio Aldrighi Raffi

OS INVESTIMENTOS ESTATAIS NA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

**Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Economia, pelo Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
Orientadora: Dra. Angélica Massuquetti
Co-Orientador: Dr. Tiago Wickstrom Alves**

São Leopoldo (RS)

2012

FICHA CATALOGRÁFICA

R136i Raffi, Sérgio Aldrighi.
Os investimentos estatais na geração de hidrogênio no
Brasil / por Sérgio Aldrighi Raffi. – 2012.
63 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio
dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Economia,
2012.

“Orientação: Prof^a. Dr^a. Angélica Massuquetti ;
co-orientador Prof. Dr. Tiago Wickstrom Alves.”

1. Economia. 2. Hidrogênio como combustível – Brasil.
I. Título.

CDU 330.123.7:661.96(81)

Catálogo na Publicação:
Bibliotecária Fabiane Pacheco Martino - CRB 10/1256

Sérgio Aldrighi Raffi

OS INVESTIMENTOS ESTATAIS NA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Economia, pelo Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Aprovado em 29/04/2012

BANCA EXAMINADORA

Dra. Angélica Massuquetti (Orientadora) – Unisinos

Dr. Tiago Wickstrom Alves (Co-Orientador) – Unisinos

Dr. André Filipe Zago de Azevedo – Unisinos

Dr. Marcos Tadeu Caputi Lélis – Unisinos

Dr. Leonardo Alvim Beroldt da Silva – UERGS

A Deus, Criador.
Aos meus pais Elza Aldrighi Raffi e Antônio de Paula Raffi.
Ao querido Professor Samir Cury Hallal.

AGRADECIMENTOS

A consolidação deste projeto seria impossível sem os muitos e preciosos apoios recebidos durante o andamento do mesmo. Sendo assim expresso o meu agradecimento.

Em primeiro lugar, ao Criador do universo! Obrigado a Deus por me permitir algo tão importante!

Agradeço aos meus pais pelo apoio e ajuda. Sou infinitamente grato à minha mãe, que sempre esteve presente e confiante.

À Unisinos e em especial ao Programa de Pós-Graduação em Economia, pela oportunidade de cursar o Mestrado. Ao apoio financeiro do Fundo Pe. Milton Valente de Apoio Acadêmico à Pós-Graduação.

Aos professores João Carlos Medeiros Madail e Castelar Braz Garcia, pelas orientações técnicas.

Sou extremamente grato à minha orientadora, Dra. Angélica Massuquetti, pela ajuda, por confiar em meu projeto e pelo tempo a mim dedicado ao me orientar. É, sem dúvida, um exemplo de capacidade, dinamismo e amizade.

Ao meu co-orientador, Dr. Tiago Wickstrom Alves, pelas muitas ajudas quando do direcionamento deste trabalho.

Ao professor Dr. Paulo Dabdab Waquil, da UFRGS, pelo apoio e colaboração para a conclusão deste Mestrado.

Ao Gestor Ambiental Sr. Paulo Renato Gomes Bandeira, pela ajuda nesse trabalho.

Tenho muito a agradecer aos meus queridos colegas de aula e em especial ao colega Claudir Olímpio Graff, pelo auxílio em todos os momentos que necessitei. Também à colega Cristiane Alves Branco, que é uma pessoa para se levar na lembrança pela dedicação e carinho com que me ajudou.

A presença e o apoio por parte de vocês foi de muita valia e o mínimo que poderia fazer para demonstrar isso seria o que de fato faço agora, agradecer.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi analisar a política de investimento estatal na geração de hidrogênio no Brasil no período 2002-2010. A partir da metodologia de pesquisa bibliográfica, constatou-se que os investimentos brasileiros em hidrogênio estão direcionados para dois segmentos: gerar energia nas células a combustível para suprir veículos e unidades estacionárias e gerar hidrogênio com o objetivo de produzir um combustível com um menor teor de enxofre. Por fim, a preocupação com o meio ambiente tem suscitado a procura por combustíveis mais eficientes e menos poluentes. Neste sentido, os investimentos estatais brasileiros em hidrogênio estão buscando a redução dos impactos ambientais ocasionados por combustíveis fósseis.

Palavras-chave: Hidrogênio; Células a combustível; Economia do hidrogênio.

ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the policy of state investment in hydrogen generation in Brazil in the period 2002-2010. From the research methodology literature, it was found that Brazilian investments in hydrogen are directed to two segments: power generation in fuel cells to supply vehicles and stationary units and generate hydrogen with the goal of producing a fuel with a lower content of sulfur. Finally, concern for the environment has raised the demand for more fuel efficient and less polluting. In this sense, the Brazilian state investment in hydrogen are seeking to reduce the environmental impacts caused by fossil fuels.

Keywords: Hydrogen, Fuel Cells, Hydrogen Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa global com os teores de enxofre no combustível (diesel).....55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Emissões de poluentes por 1.000 kWh gerado de energia.....	22
Gráfico 2: Fontes de obtenção de hidrogênio mais utilizadas	24
Gráfico 3: Distribuição do número de publicações científicas por palavra-chave e por década no mundo – 1970-2006.....	28
Gráfico 4: Evolução das publicações sobre células a combustível e hidrogênio no mundo – 1970-2006	30
Gráfico 5: Evolução do número de artigos publicados no Brasil sobre hidrogênio e células a combustível – 1982-2008	35
Gráfico 6: Distribuição percentual de pesquisas sobre hidrogênio, por país – 1989-2008	38
Gráfico 7: Distribuição percentual das patentes sobre célula a combustível, por país – 1989-2008	39
Gráfico 8: Investimentos em economia do hidrogênio dos governos nacionais dos BRICs – 1999-2007 (em milhões de US\$)	43
Gráfico 9: Investimentos em economia do hidrogênio dos governos federais dos BRICs, EUA, Japão e UE – 1999-2007 (em milhões US\$)	43
Gráfico 10: Investimentos em hidrogênio no Brasil – 2001-2008 (em US\$).....	49
Gráfico 11: Prioridades no roteiro brasileiro para o hidrogênio – 2010-2030	50
Gráfico 12: Diversidade da matriz energética brasileira – combustíveis	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Utilização do hidrogênio nos diferentes setores da economia.....	25
Quadro 2: Estudos empíricos sobre hidrogênio no Brasil	34
Quadro 3: Resultados do Projeto CUTE – 2003-2005	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número total de publicações científicas referentes ao hidrogênio e às células a combustível por países – 1970-2006	29
--	----

SIGLAS E SÍMBOLOS

ANP – Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural
BRICS – Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CO – Óxido de Carbono
CO² – Dióxido de Carbono
CUTE – *Clean Urban Transport for Europe*
DOE – *Department of Energy*
EPA – *Environmental Protection Agency*
EUA – Estados Unidos da América
FAPERJ – Fundação de Amparo ao Estudo do Estado do Rio de Janeiro
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
Fuel cell – Células a Combustível
GEE – Gases de Efeito Estufa
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
H2 – CaC-Cient-Tec – Base de Dados do Universo Científico-Tecnológico
H2 – CaC-Gov – Base de Dados do Universo Governamental
H2 – Hidrogênio
HDT – Hidrodessulfurização do Diesel
HyWays – *The European Hydrogen Energy Roadmap*
IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente.
IPHE – *International Partnership for the Hydrogen Economy*
MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia
MedHysol – *Future Federator Project of Massive Production of Solar Hydrogen*
METI – *Ministry of Economy, Trade and Industry*
MME – Ministério de Minas e Energia
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NEDO – *New Energy and Industrial Technology Development Organization*
NEP – *New Energy Projects*
NIST – *National Institute of Standards and Technology*

Nm³ – Normal Metro Cúbico

NN – *Norilsk Nickel*

NO_x – Óxido de Nitrogênio

NREL – *National Renewable Energy Laboratory*

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A

ppm – Partes por Mil

ProCac – Programa Brasileiro de Sistemas Células a Combustível

Proconve – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores

RAS – *Russian Academy of Science*

SO_x – Óxido de Enxofre

UE – União Europeia

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UGH – Unidades de Geração de Hidrogênio

USDA – *U.S Department of Agriculture*

ZnS – Sulfeto de Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 A PESQUISA SOBRE HIDROGÊNIO NO BRASIL	20
2.1 A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO	20
2.2 A EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO ACADÊMICA SOBRE HIDROGÊNIO.....	27
2.3 OS ESTUDOS EMPÍRICOS SOBRE HIDROGÊNIO NO BRASIL	31
3 OS INVESTIMENTOS EM HIDROGÊNIO NO MUNDO	36
3.1 O HIDROGÊNIO NOS EUA	36
3.2 O HIDROGÊNIO NO JAPÃO	38
3.3 O HIDROGÊNIO NA EUROPA	40
3.4 O HIDROGÊNIO NOS BRICs (BRASIL, RÚSSIA, ÍNDIA, CHINA)	41
4 OS INVESTIMENTOS EM HIDROGÊNIO NO BRASIL	45
4.1 OS INVESTIMENTOS ESTATAIS.....	45
4.2 OUTROS PROJETOS.....	47
4.3 A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NO BRASIL	50
5 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXO	62

1 INTRODUÇÃO

A base energética mundial ainda está alicerçada no carbono, que teve seu início na Revolução Industrial, com a queima de carvão para movimentar máquinas ou alimentar caldeiras, e segue até os dias atuais, com a queima de combustíveis fósseis para movimentar a frota de veículos em circulação no mundo. Anualmente, milhões de unidades de veículos são ofertados no mercado mundial, demandando quantidades elevadas de combustíveis. Com o avanço da tecnologia, surgem novos modelos, diversificando a frota mundial. No entanto, os modelos mais antigos não contam com catalisadores ou regulagens, que permitem uma queima do combustível sem a emissão de partículas na atmosfera¹.

Em meio a essa demanda por combustíveis que emitem níveis significativos de poluentes, surge o hidrogênio, que permite a obtenção de calor (pela queima direta) e de energia. O hidrogênio é uma fonte de energia limpa, pois não gera a emissão de detritos poluentes, o que vem ao encontro das questões ambientais atuais². O mundo moderno, que teve seu alicerce tecnológico baseado no carvão e em combustíveis fósseis, deve ao planeta um reparo aos danos causados por anos de uso de fontes energéticas finitas e poluentes. A tecnologia do hidrogênio, portanto, surge como uma alternativa energética e tem sido estudada, nas últimas décadas, por diferentes nações, como Estados Unidos da América (EUA), Japão e países europeus, que procuram fontes de energia limpa, não poluentes e renováveis.

¹ Segundo Rohrich (2008, p. 8), “O uso intensivo das fontes fósseis para a geração de energia estacionária e veicular caracteriza o regime energético dominante. Historicamente, houve algumas variações em relação à fonte dominante, mas, desde o século XVIII, com a entrada do carvão mineral como fonte energética, os recursos não-renováveis passaram a dominar o cenário energético. No século XX, o desenvolvimento da indústria automobilística foi crucial para predominância dos combustíveis fósseis para abastecer os automóveis. Já nos dias atuais, não só em razão da disponibilidade de reservas e da evolução tecnológica, mas também devido aos problemas ambientais decorrentes das emissões de CO₂, o gás natural é apontado como a principal fonte para o século XXI. Contudo, embora a preocupação com o meio ambiente tenha começado a influenciar as decisões quanto ao uso energético, o que prevalece ainda são fatores econômicos e tecnológicos. Portanto, nesse aspecto os combustíveis fósseis têm suprido as necessidades energéticas da sociedade desde o século XVIII até os tempos atuais”.

² O contínuo aumento na emissão de monóxido de carbono na atmosfera causa problemas ambientais, como o efeito estufa, o aumento da temperatura mundial, o degelo das calotas polares, a elevação do nível do mar, entre outros.

O aumento da quantidade de veículos automotores e, por consequência, da alta incidência de detritos gerados pela queima de combustíveis fósseis também têm promovido, portanto, o debate, por parte de ambientalistas, de políticos e de pesquisadores, acerca da necessidade de uma nova matriz energética, estimulando o investimento em pesquisas sobre energia limpa, como é o caso do hidrogênio. Os acordos tecnológicos e as trocas de experiências entre os países, nos últimos anos, têm revelado a busca por soluções quanto a esse problema ambiental.

Rifkin (2003) adverte que um ponto crítico na era dos combustíveis fósseis está se aproximando, com consequências catastróficas para a civilização industrial. O autor afirma que o hidrogênio pode terminar com a dependência do petróleo, diminuir a emissão de dióxido de carbono e o efeito estufa³ e abrandar guerras de cunho político e religioso.

Em relação aos problemas de saúde ocasionados pela poluição atmosférica, ISA (2008) afirma que os mais comuns são respiratórios, oftalmológicos, cardíacos, gastrointestinais e dermatológicos, sendo possível citar casos mais complexos, como câncer. O sistema nervoso central é afetado depois de exposição a níveis elevados de monóxido de carbono. Sendo assim, a utilização de fontes energéticas menos poluentes também está relacionada à saúde pública.

Matos (2009) afirma que a concentração de gases do efeito estufa apresentou-se em constante elevação nas últimas décadas. Além disto, os choques do petróleo, na década de 1970, fizeram com que determinados pesquisadores pensassem a respeito da utilização energética do hidrogênio, tendo em vista que naquele período o valor do barril de petróleo havia se elevado. Para o autor, naquele momento, inexistia uma preocupação global em relação ao meio ambiente, mas apenas determinadas questões ambientais isoladas estavam na pauta de pesquisa dos estudiosos da área. A utilização do hidrogênio como vetor energético era uma opção em substituição às fontes provenientes de petróleo.

³ Cruz (2010) relata que as emissões de dióxido de carbono têm por causa principal a queima de carvão, óleo e gás, que somados chegam a dois terços de todas as emissões, o desmatamento, as queimadas e outras fontes somam o outro terço.

A partir de 2002, no Brasil, o Ministério de Ciência de Tecnologia (MCT) iniciou o desenvolvimento da economia do hidrogênio⁴ no país. Ou seja, o MCT realizou a classificação para as competências científicas e tecnológicas referentes à tecnologia do hidrogênio, tendo como fato desencadeador as pesquisas na área da produção de hidrogênio e de células a combustível desenvolvidas em várias instituições, com financiamento de diversas agências ou empresas (LABORDE et al., 2010). As células a combustível são, segundo Lellis et al. (2010), equipamentos capazes de gerar energia elétrica a partir do hidrogênio.

No país, o uso do hidrogênio para fins de geração de energia ainda é reduzido, sendo sua produção consumida quase que totalmente na indústria. Já a produção de hidrogênio para fins industriais tem expressividade no Brasil e no ano de 2002, por exemplo, alcançou 425 mil toneladas. Em 2004, a Petróleo Brasileiro S/A (PETROBRAS) produziu mais de 180 mil toneladas de hidrogênio (FOSTER et al., 2011). Há evidências, de acordo com os autores, de que o Brasil se tornará o maior produtor do mundo de hidrogênio, tendo por base as fontes renováveis de energia.

Para Laborde et al. (2010), a produção do hidrogênio no Brasil se dará, preferencialmente, a partir do etanol⁵, sendo que outras fontes energéticas, como biomassa e fontes renováveis (solar, eólica e hidráulica⁶) também serão relevantes. Segundo Lellis et al. (2010), a utilização do hidrogênio como vetor energético reduz a sobrecarga pela demanda por poucos combustíveis, diminuindo o impacto no meio ambiente. O hidrogênio produzido a partir de diferentes fontes contém grande parte da energia química, térmica e/ou elétrica usada para ser gerado e que poderá ser recuperada quase totalmente em procedimentos adequados. O hidrogênio pode ser armazenado, transportado e reconvertido em energia e caracteriza-se como sendo

⁴ A expressão economia do hidrogênio foi introduzida pela *General Motors Co.*, em 1970, para denominar uma nova economia baseada no hidrogênio como vetor energético (MATOS, 2009).

⁵ Dada a existência no país de logística de distribuição de etanol, considera-se de grande interesse nacional o desenvolvimento de células a combustível tipo etanol direto. A menor disponibilidade deste combustível em outros países abre espaço para o desenvolvimento nacional desta tecnologia (CGEE 2010).

⁶ Segundo Espindola (2009), a usina hidroelétrica de Itaipu, bem como outras usinas, produz energia excedente, energia esta que pode ser armazenada na forma de hidrogênio. Uma vez que essa energia excedente produza o gás hidrogênio por meio de eletrólise, este gás pode então ser acondicionado, armazenado, transportado e utilizado novamente na conversão em eletricidade.

um transportador de energia, ou seja, um vetor energético. Essa evolução no uso dos combustíveis é citada por muitos autores como sendo a descarbonização da economia.

Os investimentos em hidrogênio, segundo CGEE (2010), apresentam grandes oportunidades para o Brasil, tendo em vista que o estímulo destas tecnologias por intermédio de instituições governamentais e empresariais deverá gerar frutos vultosos entre eles: diminuição de impactos ambientais na geração e na utilização de energia; aumento da segurança energética; melhoria do aproveitamento dos recursos naturais; desenvolvimento regional; desenvolvimento de parque industrial competitivo; e geração de empregos.

O hidrogênio apresenta-se como uma importante alternativa na geração de energia, já que pode ser produzido, armazenado e convertido diretamente em eletricidade por meio de células a combustível. O hidrogênio pode, ainda, ser utilizado na melhoria dos combustíveis fósseis usados atualmente, com isso, tornando-os mais eficientes e menos poluentes.

Este estudo, portanto, pretende contribuir para o conjunto de pesquisas acerca do hidrogênio no campo acadêmico brasileiro, destacando, em especial, a importância que os investimentos estatais brasileiros têm para este momento de discussão acerca da matriz energética nacional e mundial. Nesse sentido, o problema de pesquisa que orienta essa Dissertação é: Qual é a política de investimento estatal na geração de hidrogênio no Brasil?

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a política de investimento estatal na geração de hidrogênio no país no período 2002-2010. Como objetivos específicos, a pesquisa visa:

1. Apresentar os principais estudos sobre o hidrogênio no Brasil;
2. Mapear os principais investimentos em hidrogênio no mundo;
3. Descrever os investimentos estatais em hidrogênio no país.

Existe um consenso sobre a transição da atual matriz energética mundial para outra que leva em consideração combustíveis alternativos, como o hidrogênio.

Contudo, ainda há barreiras econômicas, institucionais e tecnológicas a serem superadas, relacionadas à produção, ao transporte, à armazenagem e à distribuição do hidrogênio. A superação de parte desses entraves é possível com investimentos públicos e privados (CGEE, 2010) e com pesquisas sobre o tema.

Neste estudo, utilizou-se a metodologia de pesquisa bibliográfica e o mesmo está dividido em cinco capítulos, considerando a Introdução e as Conclusões. No segundo capítulo são apresentados os principais estudos sobre o hidrogênio no Brasil. No terceiro capítulo são identificados os investimentos em hidrogênio no mundo. No quarto capítulo são analisados os investimentos estatais em hidrogênio no país. Por fim, são apresentadas as conclusões desta pesquisa.

2 A PESQUISA SOBRE HIDROGÊNIO NO BRASIL

Os investimentos em pesquisa energética a partir do hidrogênio têm gerado bons resultados, visto que constantes avanços tecnológicos tanto na obtenção quanto no armazenamento e na conversão do hidrogênio em células combustíveis são uma realidade. Houve também avanço no meio acadêmico, com o aumento de artigos e de publicações referentes às pesquisas sobre hidrogênio na última década, mostrando a relevância destes estudos (LELLIS et al., 2010). Neste capítulo são apresentados os principais estudos sobre o hidrogênio no Brasil.

2.1 A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

Cruz (2010) comenta que a utilização do hidrogênio como vetor energético e a concepção de um sistema energético, tendo por base o hidrogênio, não são ideias novas. Até os anos 1960, em muitos países, o hidrogênio era utilizado como fonte de energia, iluminação pública e, nas residências, para aquecimento e na preparação de alimentos. Essa ideia de um vasto uso do hidrogênio no alicerce energético dos sistemas econômicos foi estabelecida no momento em que o petróleo enfrentava sua crise (década de 1970), mas não houve continuidade após este período.

Com o efeito estufa e o desenvolvimento das células a combustível, contudo, a economia do hidrogênio ressurgiu. A geração de energia elétrica, tendo por base o hidrogênio, com o aperfeiçoamento das células a combustível, superou o uso em aparelhos estacionários e cunhou a possibilidade de sua utilização energética em outros setores, como o transporte (CRUZ, 2010).

De acordo com Matos (2009), no ano de 1987, o Relatório de *Brundtland* definiu o conceito de desenvolvimento sustentável, promovendo a ampliação do debate acerca da dimensão ambiental. A partir de então, a economia do hidrogênio, segundo CGEE (2010), passou a apresentar-se como um novo paradigma, já que os

principais motivos para os investimentos neste vetor são a segurança energética e a diminuição dos impactos ambientais⁷.

Num momento em que a preocupação com a preservação do meio ambiente está tão presente, surge a expressão descarbonização da economia, que prega a utilização de combustíveis menos poluentes, não vinculados ao carbono. Rohrich (2008) afirma que para uma redução nas emissões de CO₂, deve-se empregar o hidrogênio como vetor energético, sendo a célula a combustível a tecnologia que converte o hidrogênio em eletricidade e que pode ser utilizada para gerar energia em estações fixas e para movimentar veículos. A autora aborda tanto o hidrogênio quanto as células a combustível como substitutos potenciais para os combustíveis fósseis, mas alerta que os benefícios originados dessa troca não compreenderão os custos, pois ambos terão competitividade, em comparação ao atual regime, no momento em que o hidrogênio e a célula a combustível chegarem a uma economia de escala.

Segundo Matos (2009), no ano de 2003, em Washington (EUA), constituiu-se a *International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE) com a finalidade de formar parceiros internacionais para fortalecer a economia do hidrogênio. Através desse órgão, as nações participantes empenharam-se em consolidar a economia do hidrogênio por meio de investimentos em hidrogênio e em células a combustível. Dentre os países da América Latina, o Brasil é o único que compõe o IPHE.

Em 2005, após oito anos de sua preparação, o Protocolo de Quioto passou a vigorar, tendo como escopo central reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera. Inúmeros países assinaram o Protocolo, com exceção da Austrália, da África do Sul e, especialmente, dos EUA, que é um grande emissor dos gases que afetam a atmosfera, ficando atrás somente da China (MATOS, 2009). De acordo com Cruz (2010, p.21):

As emissões atmosféricas causadas pela utilização de combustíveis fósseis trazem graves consequências ao meio ambiente. Além da questão relativa aos gases de efeito estufa (GEE), principais responsáveis pelo processo de

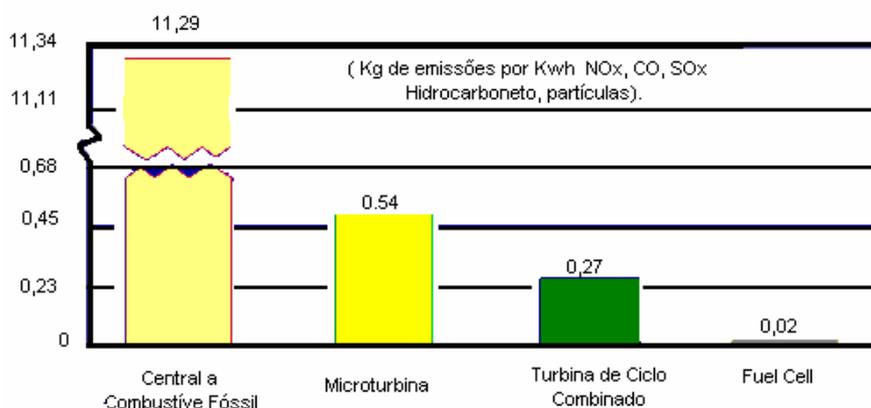
⁷ Segundo Gatto (2010, p. 27), “A queima de combustível fóssil adiciona alguns bilhões de toneladas por ano de CO₂ na atmosfera. Uma quantidade aproximadamente igual é gerada pela destruição de vegetação e solo”.

aquecimento global, existem questões relativas ao impacto na saúde pública, principalmente nas cidades.

Na atualidade, observa-se um acréscimo no número de especialistas que veem uma relação entre os gases de efeito estufa (GEE) liberados pela queima de combustíveis fósseis e a elevação da temperatura do planeta⁸. Este fato, somado à falta de reservas fósseis de energia e à elevação do consumo e dos preços do petróleo, tem sido o motivo para se pensar no uso de fontes renováveis de energia (CGEE, 2010). Além disso, a demanda por fontes de energia com baixo teor de poluição vem ao encontro das legislações ambientais atuais.

Segundo Almeida (2005), a tecnologia que utiliza as células a combustível geram emissões mínimas quando comparada com outras fontes energéticas. O Gráfico 1 revela que a utilização de combustíveis fósseis gera 11,29 kg de emissões por 1.000 kWh, entre elas óxido de nitrogênio (NOx), óxido de carbono (CO), óxido de enxofre (SOx) e partículas, de energia gerada. A tecnologia que utiliza as células a combustível, por outro lado, emite apenas 0,02 kg de emissões por 1.000 kWh de energia gerada.

Gráfico 1: Emissões de poluentes por 1.000 kWh gerado de energia



Fonte Almeida (2005, p.20).

⁸ De acordo com ISA (2008), a temperatura da terra teve uma elevação de, aproximadamente, 0,7 grau centígrado no século XX e existe uma aceleração nesse processo, pois em 25 anos a temperatura sofreu uma elevação quatro vezes maior do que vinha ocorrendo nos últimos 150 anos.

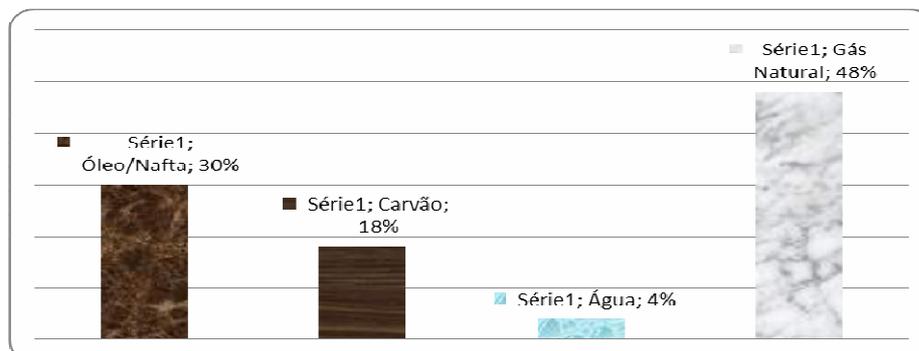
O hidrogênio pode ser obtido de fontes renováveis de energia ou de fontes não renováveis⁹, proporcionando uma segurança energética, pois cada país pode obtê-lo a partir de suas fontes locais. Atualmente, quase todo o volume de hidrogênio produzido no mundo é utilizado com finalidades químicas (87%), sendo a maior parte oriunda de combustíveis de origens fósseis (96%). Dessa forma, permanece sua vinculação aos hidrocarbonetos provenientes de petróleo, ocasionando um aumento do efeito estufa. As pesquisas em hidrogênio com o objetivo de preservar o meio ambiente são, portanto, importantes, já que seu uso afeta os mais variados campos econômicos, como industrial, comercial, residencial e transporte (MATOS, 2009).

De acordo com Cruz (2010), o gás natural é, atualmente, a principal fonte de produção do hidrogênio (Gráfico 2). A água tem uma participação de apenas 4% na produção e é utilizada nesse processo por meio de eletrólise, onde seus átomos são quebrados através da passagem de uma corrente elétrica. A água é a mais abundante de todas as fontes, mas é a menos utilizada. O autor afirma que

O processo de eletrólise utiliza energia elétrica para dividir moléculas da água em seus componentes básicos (hidrogênio e oxigênio). Este método de produção é o mais limpo ambientalmente (não contabilizando as emissões causadas na geração elétrica), no entanto, só é recomendado no uso industrial quando se tem a necessidade de obter hidrogênio com 100% de pureza, pois seu custo de operação é consideravelmente mais alto que os demais processos (CRUZ, 2010, p. 20).

⁹ O hidrogênio não é encontrado em sua forma pura, mas sim produzido a partir de outras fontes, como: etanol; metanol; biogás; gás natural; amônia; glicerol; eletrólise da água; e biomassa (cana-de-açúcar, milho, florestas cultivadas, soja, dendê, girassol, colza, mandioca, palha de arroz, lascas ou serragem de madeira, dejetos de criação animal) (LELLIS et al., 2010). Segundo Espindola (2010), 95% do hidrogênio que se obtém tem origem em fontes fósseis. Ainda segundo a mesma autora, é possível se obter hidrogênio por processos fotocatalíticos a partir da água, misturada a compostos orgânicos e irradiando-se essa mistura na presença de um agente catalítico.

Gráfico 2: Fontes de obtenção de hidrogênio mais utilizadas



Fonte: Cruz (2010, p. 15).

Segundo Bezerra Filho (2008), o hidrogênio também pode ser obtido pela eletrólise a partir de energia solar, de energia proveniente de hidrelétricas ou de energia oriunda dos geradores eólicos. Também tem origem na reforma a vapor de fontes fósseis ou biocombustíveis, o etanol e a biomassa, ou ainda a partir de outras formas de produção como, por exemplo, as que utilizam o lixo urbano. Conforme Carvalho (2009), também se obtém o hidrogênio a partir de restos agrícolas e de dejetos oriundos da indústria madeireira pelo processo denominado pirólise e reforma.

Na indústria, o hidrogênio encontra uma variada gama de aplicações, que vão desde a fabricação de produtos fármacos, a fabricação de semicondutores e a geração de energia térmica ou elétrica (quando utilizado como insumo nas células a combustível). Uma menor parte do hidrogênio que é produzida no mundo é usada para fabricar metanol, que é empregado em diferentes produtos, como plásticos, tintas, explosivos, solventes ou transformado em formaldeído. A produção de amônia gasta em torno de 50% da produção de hidrogênio, já o processamento de petróleo utiliza aproximadamente 40% da produção de hidrogênio (CRUZ, 2010). O Quadro 1 apresenta o uso do hidrogênio por setor industrial, identificando as mais variadas aplicações.

Quadro 1: Utilização do hidrogênio nos diferentes setores da economia

Segmento	Aplicação
Refino de Petróleo	Remoção de enxofre de combustíveis (dessulfurização) e hidrocraqueamento.
Processos Químicos	Fabricação de amônia, metanol, cloro e soda cáustica.
Indústria Farmacêutica	Fabricação de Sorbitol, utilizado em cosméticos, vitaminas, surfactantes e adesivos.
Indústria Alimentícia	Utilizado na hidrogenação de óleos e no aumento da saturação de gorduras.
Processos Metalúrgicos	Agente redutor de minérios metálicos.
Indústria Eletrônica	Utilizado no processo de fabricação de semicondutores.
Geração de Energia	Utilizado como fonte de energia térmica em queimadores ou como insumo de células a combustível.

Fonte: Cruz (2010, p.8).

Para Foster et al. (2011), o hidrogênio pode ser utilizado em aplicações denominadas estacionárias¹⁰, na geração de energia para hospitais e sistemas que não devam sofrer interrupção e nos sistemas de coeração, atendendo grupos isolados e armazenagem energética. O uso do hidrogênio em veículos se encontra direcionado para transporte urbano, sendo que a maior parte desses se move por meio de motores que consomem óleo diesel. Um setor também relevante é o de máquinas agrícolas. De acordo com os autores, o hidrogênio produzido do etanol, do gás natural e da gaseificação da biomassa tem o poder de substituir, em parte, os motores que utilizam óleo diesel, sendo uma opção com maior eficiência e menor poluição. Para Braga (2009), a geração distribuída¹¹ de energia apresenta muitas vantagens, sendo este um modelo ou modo de utilização do hidrogênio nas chamadas células a combustível com o objetivo de atender a demanda de energia em comunidades distantes.

Segundo CGEE (2010), atualmente, há interesse no uso do hidrogênio para movimentar veículos e na geração distribuída de energia elétrica. O método que se obtém melhores resultados é o conjunto de células a combustível usado nos veículos, cuja emissão local é quase nula. Para Laborde et al. (2010), o hidrogênio, quando utilizado em células a combustível na produção de energia elétrica, atinge uma eficiência energética muito superior à obtida apenas por sua queima. Sistemas de energia que necessitam funcionamento interrupto são consumidores em potencial da geração de energia a partir de células a combustível, como hospitais e bancos.

¹⁰ Conforme Bezerra Filho (2008), é considerada geração de energia estacionária aplicações acima de 5 kW, as quais são empregadas em grandes centros industriais, hotéis e residências, onde, nessas últimas, são utilizadas células combustíveis de baixa temperatura, como a PEMFC, também utilizada em veículos.

⁸ Entende-se como geração distribuída, pequenas unidades de geração de energia localizadas estrategicamente perto dos consumidores e dos centros de carga, que fornecem benefícios aos clientes e apoio para a operação econômica da rede de distribuição de energia existente (BRAGA, 2009).

Almeida (2005, p.16) relata os potenciais benefícios na geração distribuída, possível com a tecnologia do hidrogênio:

- Redução do consumo de energia primária, o que permite a diminuição da importação de combustíveis fósseis;
- Redução das emissões de dióxido de carbono;
- A GD [geração distribuída] reduz a necessidade de se expandir a capacidade de expansão do sistema elétrico (geração, transporte e distribuição);
- Redução das perdas de transporte e distribuição;
- Fornecimento de energia elétrica de elevada qualidade, para os consumidores com requisitos de fiabilidade elevados.

Segundo Lellis et al. (2010), a utilização de combustíveis com menos carbono tem sido uma tendência observada nos últimos 20 anos e seguindo-se essa premissa da descarbonização da economia, o mundo poderá conhecer o fim da era do carbono como combustível, um papel onde o hidrogênio assume sua importância como gerador de energia. O Brasil, por sua vez, tem potencialidade na produção de hidrogênio, tendo por base várias fontes energéticas, tornando sua matriz energética mais equilibrada ainda. Para Gatto (2010), o Brasil tem todas as características necessárias para o bom incremento de sua matriz energética, tecnologia adequada por seu conhecimento em fontes renováveis fartas e fatores economicamente viáveis.

Assim, uma alternativa para a redução dos transtornos causados pela queima de combustíveis fósseis está na utilização de outras fontes para a geração de energia, a chamada energia limpa, sendo o hidrogênio uma delas (LABORDE et al., 2010). De acordo com Assis et al. (2008), frente à probabilidade da escassez de fontes energéticas oriundas do petróleo e diante dos impactos ambientais e de saúde pública causados por essas práticas, se faz necessário promover o desenvolvimento de novas matrizes energéticas com menores impactos ambientais, afirmando, também, que o hidrogênio é uma dessas opções.

As universidades e os centros de pesquisa no mundo têm trabalhado no intuito de desenvolver pesquisas sobre o hidrogênio, montadoras de grande porte possuem protótipos que usam o hidrogênio na forma de combustível e empresas do setor petrolífero do mundo todo procuram adaptar-se à nova concepção energética e diversificam seu portfólio, como a *British Petroleum* (BP). Os investimentos realizados

pelo setor público tem aumentado nos últimos 10 anos com o objetivo de instalar a infraestrutura indispensável para distribuir o hidrogênio até os consumidores. Determinados países da União Europeia (UE) têm programas relacionados à ampliação do hidrogênio para uso como combustível em veículos há mais de uma década, como Holanda, França e Alemanha. Os EUA têm elevado os investimentos relacionados à utilização do hidrogênio como vetor de energia, sendo que no campo de pesquisa e de infraestrutura, o Departamento de Energia Norte-Americano (DOE) tinha um orçamento de US\$ 200 milhões em 2009 e havia estimativa de que, no período 2010-2013, esse montante se aproximaria à US\$ 1 bilhão (CRUZ, 2010).

As pesquisas nessa área são relevantes, pois, segundo Cruz (2010), a grande parte do hidrogênio que é obtida atualmente tem origem em combustíveis fósseis, portanto, poluente. Para Lellis et al. (2010), o hidrogênio produzido pode ser utilizado na geração de energia de forma eficiente nas células a combustíveis, já que seu uso como agente transmissor de energia diminui a demanda por outro combustível, reduzindo o impacto ambiental gerado pelo excesso da produção de outro material a ser utilizado. Com isso, se reduz a emissão de poluentes nos centros urbanos, bem como se gera oportunidade para uma nova indústria nos países. De acordo com CGEE (2010), a obtenção de energia elétrica por meio de células a combustível, que não produzem gases de efeito estufa, é adequada para uma nova matriz energética, pois o subproduto originado de seu uso é apenas a água. Quando queimado em motores a combustão interna, as emissões desses gases também são minimizadas significativamente.

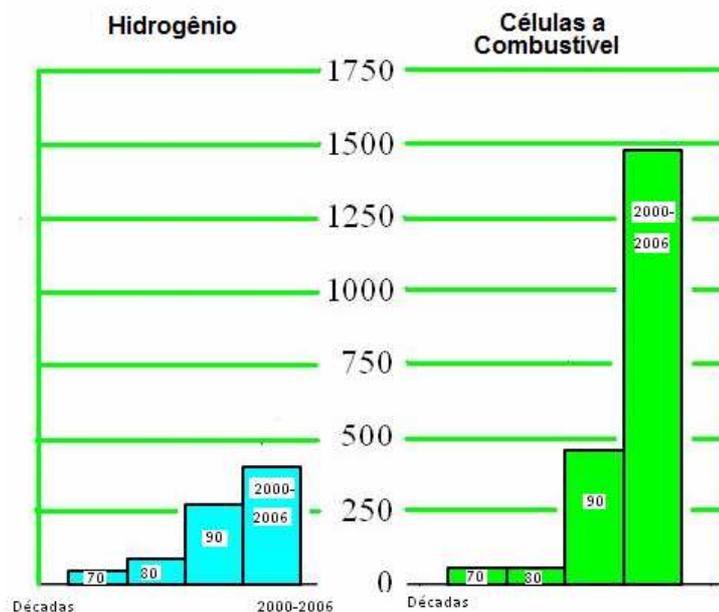
2.2 A EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO ACADÊMICA SOBRE HIDROGÊNIO

De acordo com Santos (2008), o uso energético do hidrogênio jamais foi tão analisado e recomendado como recurso de diversos problemas no quadro energético mundial como na atualidade. Os países mais desenvolvidos se destacam nessas pesquisas em razão de suas competências para empreender e pela disponibilidade de recursos para os investimentos, especialmente na ampliação tecnológica das células a combustível. Sobre o aspecto ambiental, Rohrich (2008, p. 150) afirma que

Para o Brasil, o regime energético vigente não apresenta impactos tão graves ao meio ambiente como a realidade observada em muitos países desenvolvidos. Fato que se dê em função de uma matriz energética representada 45% por fontes renováveis.

Nas últimas décadas, observa-se um crescente número de publicações científicas voltadas ao hidrogênio e às células a combustível. Tal fato leva a crer que o mundo está cada vez mais voltado às novas tecnologias, que visam a geração de energia considerada limpa, ou seja, com poucos ou nenhum poluente emitido. No Gráfico 3 apresenta-se o número de publicações científicas por palavra-chave – hidrogênio e células a combustível – e por década, onde se observa que existe um maior número de publicações referentes ao segundo tema.

Gráfico 3: Distribuição do número de publicações científicas por palavra-chave e por década no mundo – 1970-2006



Fonte: Santos (2008, p. 54).

A tecnologia para a obtenção de hidrogênio se encontra em desenvolvimento, sendo que para isso estuda-se a possibilidade de sua obtenção até mesmo a partir de lixo urbano, que seria uma solução para o lixo nas grandes cidades. Quanto às células a combustível, estas se encontram em fase de aprimoramento, com a finalidade de produção em escala de células eficientes e baratas para atender às mais variadas necessidades em termos energéticos.

A produção científica do Brasil, no período 1970-2006, no total de estudos sobre o tema, foi de 27 publicações sobre hidrogênio e de 33 sobre células a combustível (Tabela 1). Um momento crucial para o aumento dessas pesquisas foi a crise do petróleo na década de 1970, que gerou o envolvimento de pesquisadores, apoiados por empresas privadas ou públicas, com o estudo de alternativas ao setor energético em crise. Observa-se que os EUA lideram o *ranking* mundial, seguidos por Alemanha, Japão e Reino Unido, e que o Brasil aparece na 17ª posição.

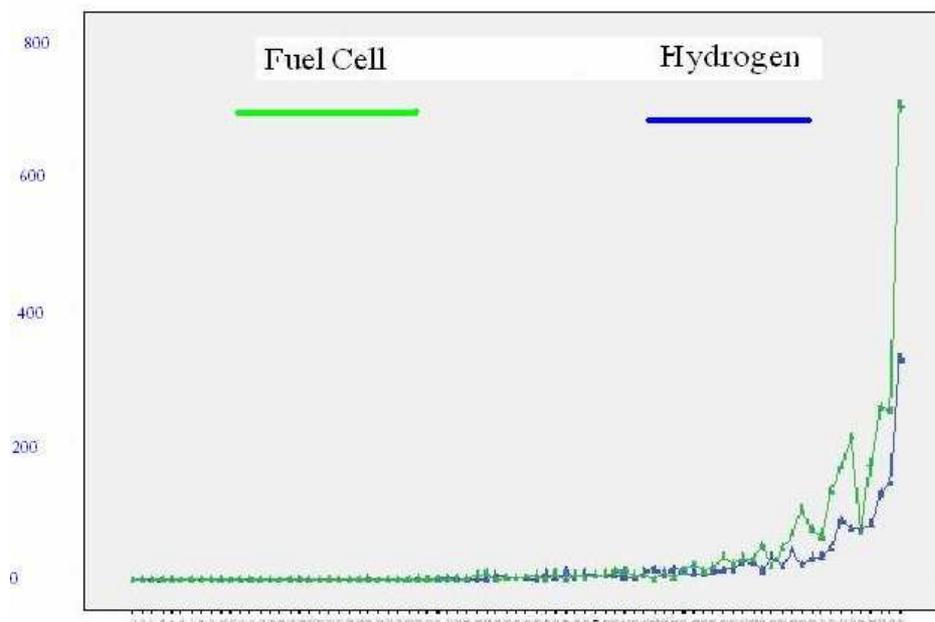
Tabela 1: Número total de publicações científicas referentes ao hidrogênio e às células a combustível por países – 1970-2006

País	Hidrogênio	Células a Combustível	Total
Estados Unidos	329	705	1034
Alemanha	144	252	396
Japão	129	256	385
Reino Unido	83	173	256
Canadá	75	70	145
Coréia	77	212	289
China	90	169	259
Itália	46	130	176
Países Baixos	34	64	98
França	33	75	108
Taiwan	21	105	126
Índia	44	67	111
Suécia	19	48	67
Austrália	34	20	54
Espanha	14	51	65
Suíça	26	31	57
Brasil	27	33	60
Áustria	15	24	39
Singapura	15	35	50
Noruega	13	18	31
Dinamarca	9	13	22
Grécia	10	23	33
Finlândia	12	14	26
Turquia	17	4	21
Irã	8	13	21
Jordânia	16	0	16
Polônia	12	8	20
Tailândia	4	8	12
Bélgica	5	14	19
Israel	7	13	20
Arábia Saudita	8	9	17
Federação Russa	8	6	14
Egito	10	5	15
Malásia	5	8	13
Bulgária	11	0	11
México	4	9	13
República Tcheca	10	1	11
Nova Zelândia	0	8	8
Emirados Árabes	4	6	10
Irlanda	3	3	6

Fonte: Santos (2008, p.100).

No Gráfico 4 observa-se que as publicações sobre células a combustível superam os estudos sobre o hidrogênio.

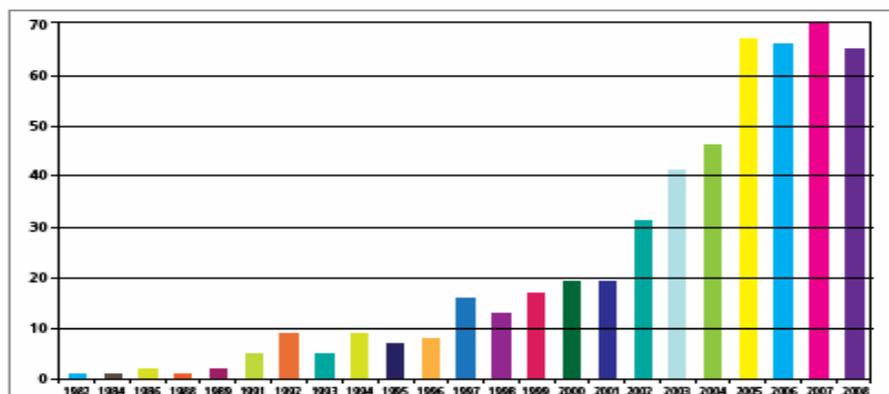
Gráfico 4: Evolução das publicações sobre células a combustível e hidrogênio no mundo – 1970-2006



Fonte: Santos (2008, p.100).

No Brasil, as pesquisas na área da produção de hidrogênio e de células a combustível foram desenvolvidas em várias instituições, com financiamento de diferentes agências ou empresas. Isto fez com que o MCT realizasse uma classificação para as pesquisas científicas e tecnológicas nestas áreas (LABORDE et al., 2010). No Gráfico 5 é possível observar a evolução do número de artigos publicados no Brasil sobre hidrogênio e células a combustível no período 1982-2008, em especial a partir de 2002.

Gráfico 5: Evolução do número de artigos publicados no Brasil sobre hidrogênio e células a combustível – 1982-2008



Fonte: Laborde et al. (2010, p. 34).

Conforme Santos (2008), a utilização do hidrogênio como fonte de energia teve início a partir da metade da década de 1970, fato que ocorreu no momento em que acontecia a crise do petróleo. Porém, com a diminuição dos preços do petróleo na metade dos anos 1980, ocorreu uma redução do interesse pelo hidrogênio. A partir dos anos 1990, com o aumento de questões de cunho ambiental, propondo a não degradação do meio ambiente pela ação do homem e os cuidados com os detritos industriais, e as legislações referentes ao tema, motivadas pelo Protocolo de Quito, a questão do hidrogênio como fonte energética foi retomada e, por consequência, das células a combustível.

2.3 OS ESTUDOS EMPÍRICOS SOBRE HIDROGÊNIO NO BRASIL

Moreira (2005) realizou uma avaliação dos aspectos ambientais da geração de energia através de termoelétricas a gás natural. Seu estudo foi desenvolvido, tendo-se por base a classificação e a apreciação da literatura referente ao assunto e dados de 1970-2003. Suas principais conclusões foram que houve uma elevação no nível de preocupação e de empenho dos cientistas quanto à necessidade de produzir e gastar energia sustentavelmente. Para a autora, não há apenas um caminho a ser seguido, mas muitas são as alternativas para a solução de questões de ordem energética.

Santos (2008) analisou as tendências tecnológicas das células a combustível para uso do hidrogênio derivado de petróleo e de gás natural, no período 1974-2006, em bases de dados do universo científico-tecnológico (H2-CaC-Cient-Tec) e do universo governamental (H2-CaC-Gov). A autora concluiu, por meio de análise estatística, que houve uma redução do número de artigos e de publicações referentes ao tema hidrogênio e células a combustível (número de artigos e publicações a partir das palavras-chave analisadas) com a diminuição dos preços internacionais do petróleo, mas não a ponto de voltar este empenho aos planos anteriores, apesar de ainda estar presente em razão das questões ambientais, como o efeito estufa.

Rohrich (2008) estudou a descarbonização do regime energético dominante e as perspectivas para a economia do hidrogênio no Brasil a partir de dados do período 1983-2005. Em relação à política brasileira para a economia do hidrogênio, o autor analisou seus obstáculos e suas oportunidades, colocando em evidência que as barreiras para a alteração no regime energético ainda não foram ultrapassadas nem mesmo no campo tecnológico. Por fim, afirmou que ainda há problemas de ordem institucional e econômico para que ocorra a modificação de regime.

Bernardi Junior (2009) analisou as principais fontes de energia renováveis, bem como avaliou a produção de resíduos das regiões brasileiras (por estado). O autor também analisou o potencial de produção de hidrogênio pela biomassa, por célula fotovoltaica e pela energia eólica e os custos da energia obtida. A metodologia empregada pelo autor foi exploratória, documental e quantitativa. A produção de hidrogênio pela biomassa através da gaseificação desta ou ainda pela fotovoltaica e pela eólica são alternativas que oferecem momentos de produção que, em grande parte do tempo, não são compatíveis com os períodos de demanda. Dessa forma, a célula a combustível se enquadra às necessidades da sociedade, podendo utilizar hidrogênio como vetor energético.

Braga (2009) realizou a análise da viabilidade econômica da integração de sistemas de célula a combustível, nas plantas de cloro-soda, para utilização do hidrogênio gerado no processo. Sua metodologia foi exploratória, documental e quantitativa, partindo da hipótese de que, na indústria de cloro-soda, o uso do

hidrogênio obtido no processo pode ser utilizado para a geração de energia elétrica e, com isso, trazer vantagens.

Matos (2009) analisou os investimentos financeiros em projetos de células a combustível e hidrogênio no Brasil. A partir de dados compreendidos entre 1999-2007, a metodologia empregada pela autora foi *Bottom-up*¹² e *Top-down*¹³, compatibilidade de dados de comparação entre os investimento no Brasil e no mundo. A autora afirmou que a agência de fomento que mais investiu na área do hidrogênio foi a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), com R\$ 40,63 milhões, seguida pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), com R\$ 26,99 milhões, pela P&D Aneel, com R\$ 21,32 milhões, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), com R\$ 8,93 milhões.

Cruz (2010) estudou a produção de hidrogênio em refinarias de petróleo – avaliação energética e custo de produção – e realizou um levantamento bibliográfico sobre o hidrogênio e as perspectivas futuras dos seus diferentes processos de obtenção. O autor observou que os custos obtidos pela reforma a vapor são sensíveis aos custos do gás natural usado como matéria-prima no processo. Essa é uma indicação de que o uso de plantas de gaseificação na geração de hidrogênio podem trazer benefícios de ordem econômica, tendo em vista que o carvão ou coque poderão sofrer impactos sobre seu preço atual em decorrência de uma elevação na demanda por energéticos, particularmente, no Brasil. O autor alcançou custos de obtenção de hidrogênio a partir de diferentes métodos, que podem servir de base para estudos posteriores, como a eletrólise.

D'Alessandro (2011) analisou a metodologia de gerenciamento de risco do hidrogênio, investigando a infraestrutura da geração de hidrogênio e os riscos de instalação, adequação do processo, vazamento, parada total do sistema de produção, despressurização e falta de ventilação para a expansão de possíveis perdas. Outros riscos também foram caracterizados para serem estudados e

¹² *Bottom-up*: Consiste em obter as informações diretamente dos grupos de pesquisa de universidades ou de outras instituições beneficiadas com os recursos financeiros (MATTOS, 2009).

¹³ *Top-down*: Consiste em obter as informações através dos órgãos financiadores dos projetos, como instituições e fundos de fomento à Ciência e Tecnologia (C&T) no Brasil (MATTOS, 2009).

inseridos num estudo mais completo e abrangente. O hidrogênio é considerado altamente inflamável, mas não existe registro de perdas ou eventos catalogados com acidentes na obtenção ou uso do hidrogênio no Brasil. Dessa forma, os cuidados necessários no momento de se identificar e gerenciar os riscos devem ser feitos com a máxima precisão, usando-se a alta tecnologia disponível.

O Quadro 2 apresenta um resumo dos estudos empíricos analisados, onde são expostos os períodos e as metodologias empregadas, além dos principais resultados de cada pesquisa.

Quadro 2: Estudos empíricos sobre hidrogênio no Brasil

Autor	Período	Metodologia	Resultado
Moreira (2005)	1970-2003	Pesquisa bibliográfica.	Houve uma elevação no nível de preocupação e de empenho dos cientistas e dos estudiosos quanto à necessidade de produzir e gastar energia sustentavelmente. Indicou que não há apenas um caminho a ser seguido, mas muitas são as alternativas para a solução de questões de ordem energética. As saídas são condicionadas às precisões inerentes de cada localidade, país ou continente.
Santos (2008)	1974-2006	Base de dados do universo científico-tecnológico: H2-CaC-Cient-Tec. Base de dados do universo governamental: H2-CaC-Gov Correlações entre as palavras-chave.	O elemento ambiental surge como um importante fator e que tem sua influência aumentada com a diminuição dos preços do petróleo, pois acarretaria num maior consumo do mesmo. O resultado seria o aumento da poluição e do efeito estufa, o que provocaria uma procura mais elevada por fontes alternativas de energia.
Rohrich (2008)	1983-2005	Exploratória, documental e quantitativa.	Os obstáculos e as oportunidades da política brasileira para a economia do hidrogênio evidenciaram que as barreiras para a alteração no regime energético não foram ultrapassadas nem mesmo no campo tecnológico, institucional e econômico.
Bernardi Junior (2009)	2009	Exploratória, documental e quantitativa.	A produção de hidrogênio pela biomassa através da gaseificação desta, ou ainda a fotovoltaica e eólica, são metodologias que oferecem aumento de produção e que, em grande parte do tempo, não são compatíveis com os períodos de demanda. Dessa forma, a célula a combustível se enquadra às demandas da sociedade.
Braga (2009)	2009	Exploratória, documental e quantitativa.	Na indústria de cloro-soda, o uso do hidrogênio gerado no processo pode ser utilizado para a geração de energia elétrica e, com isso, trazer vantagens.
Matos (2009)	1999-2007	<i>Bottom-up e Top-down</i> , compatibilidade de dados de comparação entre os investimentos no Brasil e no mundo.	A agência de fomento que mais investiu na área foi a FINEP, seguida pela FAPESP, pela P&D Aneel e pelo Cnpq.
Cruz (2010)	2010	Pesquisa bibliográfica.	A gaseificação na geração de hidrogênio pode trazer benefícios de ordem econômica, tendo em vista que o carvão ou coque podem sofrer impacto sobre seu preço em decorrência de uma elevação na demanda por energéticos particularmente no Brasil.
D'Alessandro (2011)	2011	Exploratória, documental e quantitativa.	O hidrogênio é altamente inflamável, mas não existe registro de perdas ou eventos catalogados com acidentes na obtenção ou uso do hidrogênio no Brasil.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em alguns estudos, observa-se a preocupação em se utilizar o hidrogênio de uma forma sustentável, minimizando seus custos de obtenção. O hidrogênio, apesar de ser um gás altamente inflamável, não apresenta registro de acidentes em sua

obtenção e uso no Brasil, o que vem a fortalecer outros estudos acerca de sua utilização e de seus benefícios.

No próximo capítulo são apresentados os investimentos em hidrogênio no mundo.

3 OS INVESTIMENTOS EM HIDROGÊNIO NO MUNDO

Os problemas ambientais causados pelos combustíveis fósseis têm gerado debates políticos e acadêmicos e investimentos de países na geração de energia limpa. Os convênios entre os países têm ocorrido na forma de acordos tecnológicos e de trocas de experiências. A preocupação tanto de caráter ambiental quanto econômico leva a repensar a matriz energética, não apenas no Brasil, mas no mundo. Neste capítulo são apresentados os investimentos em hidrogênio no mundo.

3.1 O HIDROGÊNIO NOS EUA

Os EUA se encontram em estágio avançado na tecnologia de produção e de utilização do hidrogênio nas células combustíveis. O Departamento de Energia do país¹⁴ tem dado continuidade ao programa de construção dessas células a fim de superar barreiras tecnológicas e econômicas. Com isto, pretende atingir a comercialização dessas células e tecnologias. Esse programa se coordena com outros, em quatro setores subordinados ao DOE: Energia Eficiente e Renovável, Energia Fóssil, Energia Nuclear e Ciência (DOE, 2011). De acordo com Matos (2009), portanto, os EUA orientam sua ação para examinar, ampliar e legitimar a fabricação, o transporte e o armazenamento de hidrogênio e da metodologia das células a combustível.

Nos últimos 10 anos, o DOE pôs em funcionamento o Programa de Células a Combustível, com o qual obtiveram avanços quanto à diminuição dos custos para produzir hidrogênio a partir de gás natural e de recursos renováveis. Com o uso da tecnologia de reforma do gás natural, o custo de produção compete, por exemplo,

¹⁴ De acordo com Matos (2009, p. 69), “existem algumas agências federais nos Estados Unidos que trabalham em parceria no desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio e às células a combustível como o U.S Department of Agriculture (USDA), U.S Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S Department of Defense, U.S Department of Transportation, Environmental Protection Agency (EPA), National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Science Foundation, U.S Department of Energy (DOE) e United States Postal Service”. A autora afirma que a dotação de recursos para o hidrogênio e as células a combustível é distribuída entre estes departamentos, porém 73% desse montante são destinados ao DOE.

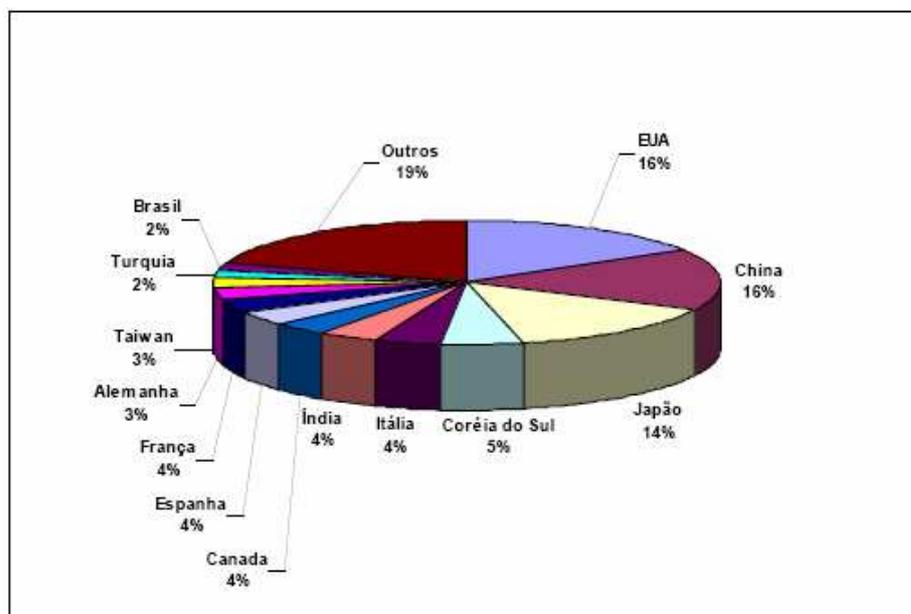
com os da produção da gasolina. Além disso, o Departamento trabalha na identificação de materiais que oferecem melhora de 50% na capacidade de armazenagem de hidrogênio. Com o intuito de dar validade a essa tecnologia, o DOE visa, ainda, a inclusão de 140 veículos que se movem a partir de hidrogênio (LABORDE et al., 2010). Os recursos que o DOE e o Departamento de Transportes dos EUA mantêm referentes à pesquisa sobre o hidrogênio, recursos humanos e células a combustíveis cresceram no período de 2005 a 2008, se mantiveram estáveis no ano de 2009 e caíram 10% no ano de 2010 (LELLIS et al., 2010).

Em novembro de 2003, os EUA, por meio do DOE, estabeleceram parceria para a economia do hidrogênio, um esforço internacional com a proposta de organizar e de implantar a pesquisa e o desenvolvimento, as atividades de utilização e de demonstração pertinentes ao hidrogênio e as tecnologias envolvidas nas células a hidrogênio. De acordo com a CGEE (2010, p.14),

Dezesseis parceiros formaram originalmente a IPHE: Alemanha, Austrália, Brasil, Canadá, China, Comissão Européia, Federação Russa, Estados Unidos, França, Índia, Islândia, Itália, Japão, Noruega, República da Coreia, e o Reino Unido. Mais tarde juntou-se à parceria a Nova Zelândia e, mais recentemente, a África do Sul. Por meio da assinatura dos termos de cooperação, os parceiros têm se comprometido a, juntos, acelerar o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e das células a combustível, buscando a melhoria da segurança energética, de padrões ambientais e promoção da economia.

No Gráfico 6, observa-se que os EUA, juntamente com a China e o Japão, lideram as pesquisas de processo de produção de hidrogênio nos últimos 20 anos, com 16%, 16% e 14%, respectivamente, do total de pesquisas. Segundo Bezerra Filho (2008), a Coreia do Sul, que aparece em quarto lugar no *ranking*, conta com uma das maiores usinas de energia de células a combustível do mundo.

Gráfico 6: Distribuição percentual de pesquisas sobre hidrogênio, por país – 1989-2008



Fonte: Lellis et al. (2010, p. 22).

Os EUA apresentam uma preocupação acentuada quanto à busca de novas fontes energéticas, oriundas do hidrogênio, como o Programa de Células a Combustível. Com este programa, conseguiram avançar no intuito de diminuir os custos para produzir hidrogênio a partir de gás natural e de recursos renováveis. Dessa forma, é notável o interesse por parte dessa nação na busca por medidas que visem a tecnologia do hidrogênio, tornando-a atrativa financeiramente.

3.2 O HIDROGÊNIO NO JAPÃO

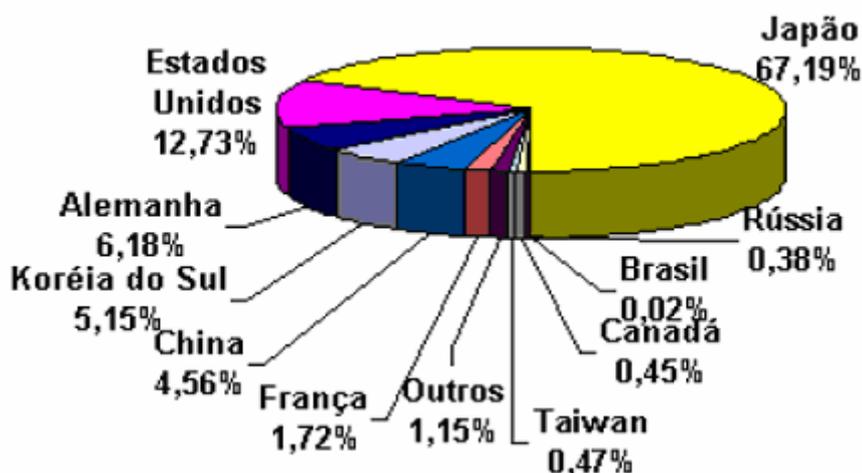
O país foi pioneiro ao possuir um programa em pesquisa e desenvolvimento sobre hidrogênio e células a combustível, sendo investidos US\$ 153,34 milhões no período 1992-2002. Em 2003, foi disseminado o plano *New Hydrogen*, que focava sua comercialização. No ano de 2005, foram orçados US\$ 33,7 milhões em projetos de investigação sobre hidrogênio em veículos com células a combustível, desenvolvidos pelo *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO). O NEDO também aprimora estruturas fundamentais do procedimento de armazenagem de hidrogênio. O NEDO e o *Ministry of Economy*,

Trade and Industry (METI) são as instituições que mais têm projetos em hidrogênio e em células a combustível no país.

No Japão, existe a pressão oriunda de legislação ambiental, concomitante a isso, a população depende dos recursos fósseis não disponíveis. Esses fatos motivaram o país a definir estratégias para o setor de energia. Para isso foram desenvolvidas novas baterias, células a combustível e base de construção para estas. O país quer, com isso, apresentar uma inovação no conceito de combustíveis limpos e de baixo consumo (LABORDE et al., 2010; LELLIS et al., 2010).

Grandes fabricantes de automóveis japoneses utilizaram as células a combustível em alguns modelos de veículos¹⁵, obtendo bons resultados de desempenho: autonomia de 620 km, num determinado modelo; e mais de 830 km noutro modelo, diante da incorporação de nova tecnologia. O Gráfico 7 apresenta a distribuição percentual das patentes sobre as células a combustível no período 1989-2008, onde se observa a representatividade do Japão (67,19%).

Gráfico 7: Distribuição percentual das patentes sobre célula a combustível, por país – 1989-2008



Fonte: Lellis et al. (2010, p. 73).

¹⁵ De acordo com Bezerra Filho (2008, p.42), “Aproximadamente vinte empresas estão desenvolvendo automóveis movidos por células a combustível, em parcerias com órgãos governamentais, indústrias ou outras fábricas em todo o mundo. Na União Europeia, EUA, Austrália, Japão, China, inclusive no Brasil, existem 12 empresas desenvolvendo ônibus a células a combustível”.

O Japão, por ser um país altamente dependente de recursos fósseis, vê a necessidade da busca por novas alternativas de geração de energia. No entanto, outro fator acarreta ainda uma maior relevância quanto ao tema, que são as questões ligadas à forte legislação ambiental do país. Estes fatos levaram o Japão a realizar altos investimentos nesse setor, tornando-o um dos maiores investidores em hidrogênio e em células a combustível.

3.3 O HIDROGÊNIO NA EUROPA

Na Europa, o primeiro grande projeto na área de hidrogênio foi o Projeto *Clean Urban Transport for Europe* (CUTE), que teve por finalidade básica colocar em circulação 27 ônibus de transporte público abastecidos com célula a combustível. Esse projeto começou a funcionar no ano de 2000 e foram investidos 52 milhões de euros (LABORDE et al., 2010). O Quadro 3 apresenta os resultados do Projeto CUTE no período 2003-2005, onde se observa a eficiência de 90% obtida e o número de mais de 4 milhões de passageiros transportados e nenhum acidente grave, além disso se obteve uma quantidade de diesel substituído por hidrogênio da ordem de 450.000 litros.

Quadro 3: Resultados do Projeto CUTE – 2003-2005

Especificações	Resultados
Número de instalações	2 novas e 7 adaptadas de instalações existentes
Hidrogênio carregado (total)	> 192.000 kg
Número de cargas	> 8.900
Quilômetros percorridos	841.123
Horas de operação	62.545
Velocidade média	12,8 km/h
Consumo médio de combustível	24,6 kg/100 km
Eficiência média do ônibus	90%
Eficiência média de estações de serviço	87%
Passageiros transportados	> 4 milhões
Número de incidentes de segurança maiores	Nenhum
Número de incidentes de segurança menores	100 aproximadamente
Tempo médio para atingir a certificação reguladora	10 meses
Quantidade de diesel substituído por hidrogênio	450.000 litros
Número de condutores e técnicos treinados	565
Número de artigos de jornal	479
Número de anúncios em rádio e tv	127
Número de acessos à página da web	6,5 milhões

Fonte: Laborde et al. (2010, p.19).

Há, na Europa, outros projetos com o intuito de desenvolver as tecnologias de geração de energias limpas, como o *The European Hydrogen Energy Roadmap* (HyWays). Este projeto desenvolveu-se entre 2004 e 2007, integrado por institutos de pesquisa, por indústrias e pela Comissão Europeia, tendo como objetivo desenvolver um mapa da rota para a introdução do hidrogênio no sistema energético europeu e dando prioridade ao setor de transporte (LABORDE et al., 2010).

O Projeto MedHysol tem como finalidade produzir hidrogênio, empregando a energia solar. Numa primeira etapa, deve construir uma plataforma piloto para produção de hidrogênio a partir da energia obtida do sol na forma de energia elétrica (10-100 kW). O hidrogênio pode ser produzido da água a partir da energia elétrica gerada da luz solar, salientando que a potencialidade da costa do mediterrâneo no desenvolvimento de energia solar é de 100 vezes a demanda energética do mundo. Posteriormente, numa segunda etapa, o projeto aplicará tecnologias eficientes e de baixo custo para sítios piloto de maior escala (1 a 1.000 MW). O hidrogênio é obtido então pela eletrólise da água (LABORDE et al., 2010).

Na Espanha estão concentrados os maiores números de grupos de empresas envolvidas nessa tecnologia. Este país, como integrante da UE, também participa das políticas desenvolvidas no continente (LABORDE et al., 2010). Entre 2001 e 2011, há expectativa de que a totalidade do financiamento da UE, não levando em consideração as estimativas nacionais, seja de US\$ 3,3 bilhões, sendo que metade desses recursos é de origem privada.

3.4 O HIDROGÊNIO NOS BRICs (BRASIL, RÚSSIA, ÍNDIA, CHINA)

Segundo Matos (2009), no ano de 2003, a *Russian Academy of Science* (RAS) e a empresa *Norilsk Nickel* (NN) realizaram um acordo de incremento de instruções sobre hidrogênio e células a combustível. Esse acordo gerou um financiamento de US\$ 120 milhões no período 2004-2007. No primeiro ano de existência do acordo, em 2004, a *Norilsk Nickel* realizou modificações organizacionais no mesmo, criando a companhia *New Energy Projects* (NEP), que é atualmente a encarregada por dirigir o projeto. Esta Resolução teve a intenção de

impedir as questões burocráticas da RAS e os problemas administrativos de investigação nos estabelecimentos acadêmicos.

Em 2004, houve também um projeto acadêmico realizado pelo *Educational Methodical and Research Centre Sokolinaya Gora*, pela Universidade de Rádio *Engineering, Electronics and Automation* (MIREA) e pela Faculdade de Química da Universidade Estadual de Moscou (MGU) de, aproximadamente, US\$ 7 milhões. Houve o auxílio financeiro da Associação Nacional de Hidrogênio, do Ministério da Economia Russo da Educação e Ciência, com o objetivo de administrar a pesquisa científica e adequar as informações técnicas a respeito dos temas do hidrogênio, trabalhando com instituições em todo o território russo (MATOS, 2009).

Em relação à Índia, Matos (2009, p. 79) afirma que

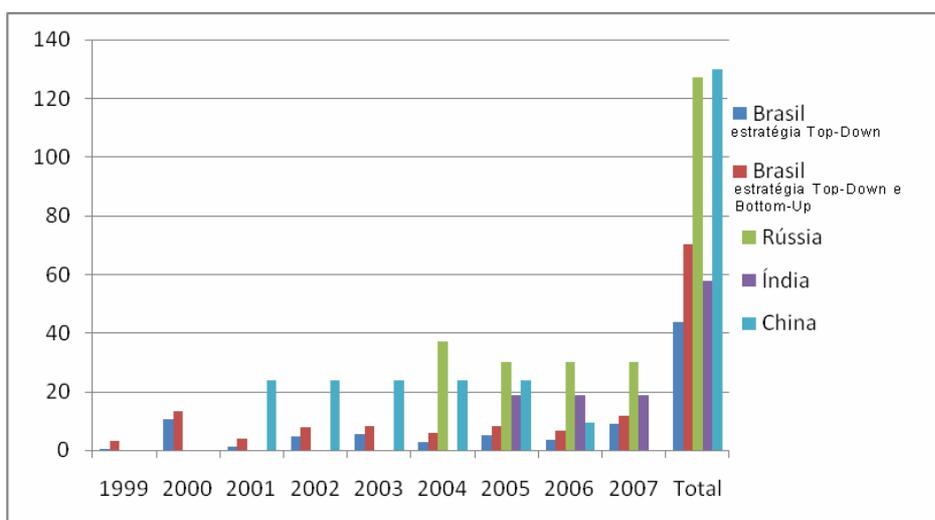
O governo indiano orçou 2,5 bilhões de rúpias (aproximadamente 57,70 milhões de dólares americanos) para financiar projetos em hidrogênio e células a combustível nas universidades e laboratórios do governo ao longo de 2005 a 2007.

Na China, os investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na área do hidrogênio, conforme Matos (2009, p. 80),

[...] são motivados pela poluição atmosférica das grandes cidades, além da preocupação com a segurança energética. De acordo com o “Tenth Five-year Plan (2001-2005)” da China, o financiamento para programas relacionados às tecnologias do hidrogênio e células a combustível corresponderam a 997,75 milhões de yuans (aproximadamente 120,36 milhões de dólares americanos), ou seja, 40% do total do orçamento de pesquisa em energia.

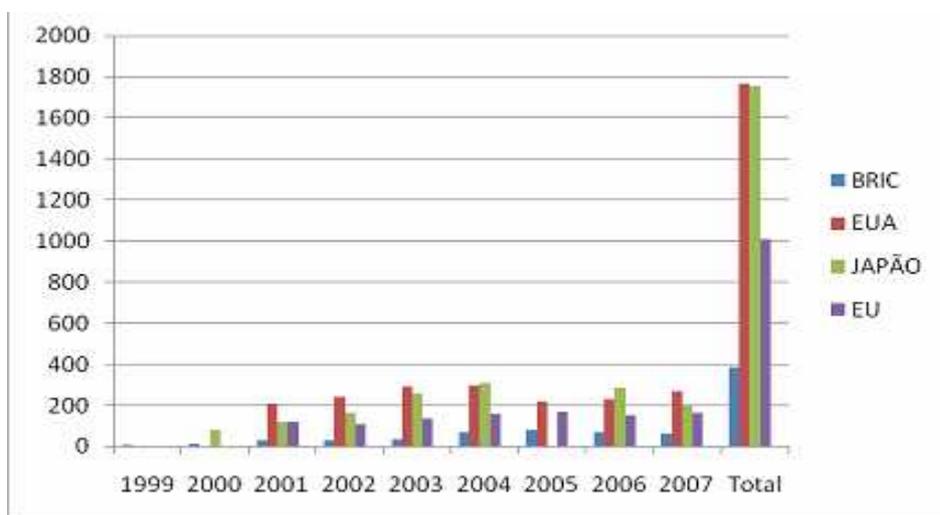
Os valores investidos pelos BRICs, no período 2001-2008, foram reduzidos em comparação às demais economias. A totalidade do valor investido pelos BRICs representa a mesma proporção dos investimentos feitos, anualmente, pelos EUA, Japão ou UE. A Índia, dentre os países dos BRICs, investiu apenas 15,01% da totalidade dos investimentos atingidos pelo grupo de países. Os Gráficos 8 e 9 apresentam, respectivamente, os investimentos em economia do hidrogênio dos governos federais dos BRICs e os investimentos em economia do hidrogênio dos governos federais dos BRICs, EUA, Japão e UE.

Gráfico 8: Investimentos em economia do hidrogênio dos governos nacionais dos BRICs – 1999-2007 (em milhões de US\$)



Fonte: Matos (2009, p. 82).

Gráfico 9: Investimentos em economia do hidrogênio dos governos federais dos BRICs, EUA, Japão e UE – 1999-2007 (em milhões US\$)



Fonte: Matos (2009, p. 82).

Matos (2009, p. 87) conclui, afirmando que

Mesmo não dispondo dos dados completos para os demais países do BRIC no período de interesse, verificou-se que o Brasil investiu cerca de 55% dos valores investidos individualmente por Rússia ou China. Estes resultados permitem concluir que para melhorar sua participação no mercado de equipamentos e serviços relacionados à Economia do Hidrogênio o Brasil necessitará aumentar seus esforços em pesquisa, desenvolvimento e inovação na área. Para tanto poderiam ser utilizadas novas fontes de recursos ou até mesmo fazer melhor uso das fontes já existentes.

Conforme Matos (2009), portanto, a Índia é o país dos BRICs que realizou o menor investimento na área do hidrogênio. No Brasil, os investimentos foram menores do que os da Rússia e da China, de 1999 a 2007. No período 2005-2006, o país investiu menos do que os demais participantes dos BRICs. Em comparação aos demais membros dos BRICs, os valores investidos pelo Brasil, no período 1997-2007, foram de, aproximadamente, R\$ 157 milhões, que corresponde a 55% do valor investido pela Rússia ou pela China.

Segundo CGEE (2010), identifica-se, observando documentos oficiais de países com envolvimento na tecnologia do hidrogênio, que sua motivação principal é a capacidade de geração de hidrogênio a partir de diversas fontes e com mínimos impactos ambientais. Os países que priorizam essa tecnologia são aqueles que demandam muita energia e, conseqüentemente, poluem muito e emitem um volume maior de gases de efeito estufa. A geração de hidrogênio apresenta-se como uma alternativa ao consumo de fontes energéticas fósseis. As tecnologias do hidrogênio têm amplo potencial de desenvolvimento tecnológico, de diminuição de despesas e de aumento de utilizações. Porém, ainda não estão tecnicamente consolidadas. Há expectativa de que, nos próximos anos, os preços caiam em proporção significativa devido aos ganhos de escala e à maturidade tecnológica.

No próximo capítulo são analisados os investimentos em hidrogênio no Brasil.

4 OS INVESTIMENTOS EM HIDROGÊNIO NO BRASIL

Os investimentos em hidrogênio no Brasil estão direcionados para dois segmentos: gerar energia nas células a combustível para suprir veículos e unidades estacionárias e gerar hidrogênio com o objetivo de produzir um combustível com um menor teor de enxofre (MME, 2012). Neste capítulo são analisados os investimentos estatais em hidrogênio no país.

4.1 OS INVESTIMENTOS ESTATAIS

Na América Latina, o Brasil lidera as pesquisas em tecnologia de hidrogênio. No período 1999-2007, os investimentos brasileiros, de origem pública e privada somaram, aproximadamente, R\$ 134 milhões, que representam 25% a 35% dos investimentos individuais da Rússia, da Índia, da China ou da Coreia do Sul e de 3% a 5% do que é investimento no Japão, na UE ou nos EUA (CGEE, 2010). Embora tenha ocorrido uma elevação das pesquisas nessa tecnologia, os recursos destinados por parte do governo federal são reduzidos se comparados com os demais países.

Segundo Matos (2009), o Brasil tem duas políticas com a finalidade de incremento da economia do hidrogênio, sendo uma delas coordenada pelo MCT e a outra pelo Ministério das Minas e Energia (MME). De acordo com o autor,

Em 2001, o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) por intermédio do Centro de Estudos Estratégicos (CGEE) contratou a consultora internacional Dra. Helena L. Chum, do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) dos Estados Unidos, para realizar um diagnóstico das competências nacionais e ações em andamento relacionadas às pesquisas e desenvolvimentos em células a combustível e tecnologias do hidrogênio no Brasil (MATOS, 2009, p.11).

No ano seguinte, o Brasil instituiu o Programa Brasileiro de Sistemas Células a Combustível (ProCac)¹⁶, sendo implantado em 2004 e tendo como objetivo promover ações que deem viabilidade para o desenvolvimento nacional dessa

¹⁶ O estudo realizado pelo MCT acerca das pesquisas científicas e tecnológicas sobre hidrogênio no Brasil, citado no segundo capítulo, foi uma base para a concepção do ProCac, em 2002.

tecnologia. Esse programa foi arquitetado em redes cooperativas de pesquisa e desenvolvimento, sendo que três delas já se encontram em funcionamento: Rede de Células PEM, Rede de Células de Óxido Sólido e Rede de Combustíveis e Hidrogênio (FOSTER et al., 2011). Em 2005, o ProCac foi transformado no Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para uma Economia do Hidrogênio (ProH2)¹⁷ e está inserido no Plano de Ação para Ciência, Tecnologia e Inovação (PACT&I). Seu objetivo é o desenvolvimento de ações que permitirão criar tecnologia brasileira nos sistemas de energia, tendo-se por base as células combustíveis para a produção de energia elétrica de forma eficiente e com menor impacto ambiental (LABORDE et al., 2010).

Segundo CGEE (2010), o ProH2 considera diretrizes específicas, que consistem em:

1. Conceber a operação das redes cooperativas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), envolvendo universidades, institutos de pesquisa, núcleos de pesquisa, incubadoras e empresas;
2. Revitalizar e melhorar a infraestrutura da investigação por parte dos estabelecimentos abrangidos no ProH2;
3. Promover o desenvolvimento e o treinamento de recursos humanos, dando destaque à pós-graduação no país e aprimoramento em núcleos de destaque no assunto no Brasil e em outros países;
4. Implantar projetos de esclarecimento de distintos aparelhos de células a combustível e metodologias da produção de hidrogênio, dando ênfase às metodologias desenvolvidas no programa ProH2;
5. Implementar projetos demonstrativos associados, privilegiando o uso dos combustíveis renováveis brasileiros, destacando especialmente a reforma do etanol;
6. Promover a colocação de cláusulas e moldes a fim da afirmação dos produtos, procedimentos e serviços atinentes às metodologias de hidrogênio e células a combustível;

¹⁷ Atualmente, o programa ProH2 tem 40 grupos de pesquisa em todo país, conveniados com a FINEP.

7. Conservar e disponibilizar documentos sobre os grupos de observação, infraestrutura, planos e empresas abrangidas com os procedimentos do hidrogênio no país.

Para Laborde et al. (2010), o ProH2, portanto, pretende promover a formação e o treinamento de recursos humanos, com ênfase em pós-graduação no Brasil e pós-doutorado no Brasil e no exterior. Além disso, busca implantar projetos de demonstração de aparelhos de células a combustível e de tecnologias da produção de hidrogênio (prioridade às tecnologias criadas no ProH2), entre outros.

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) coordenou a participação de pesquisadores e de executivos ligados às instituições governamentais e empresariais com a finalidade de se chegar a propostas de atuação na área da economia do hidrogênio: produção, logística e sistemas de utilização. Essas propostas têm o prazo de 15 anos, divididas em três níveis: ações de curto prazo, de 0 a 5 anos; ações de médio prazo, de 5 a 10 anos; e ações de longo prazo, de 10 a 15 anos (CGEE, 2010).

4.2 OUTROS PROJETOS

Há outros projetos sobre hidrogênio e células a combustível, com fontes de financiamento distintas. O primeiro deles se destina à construção de um ônibus urbano elétrico híbrido de 12 metros¹⁸. Este projeto foi financiado por FINEP, PETROBRAS, CNPq e Fundação de Amparo ao Estudo do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ). O ônibus foi desenhado pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), e as células a combustível construídas pela empresa brasileira Eletrocel¹⁹ (LABORDE et al., 2010).

¹⁸ O Brasil tem investido no uso desta tecnologia no transporte coletivo rodoviário de passageiros, ao contrário das tendências internacionais, que têm investido no transporte individual. Essa convergência vem ao encontro do amplo potencial industrial do Brasil na fabricação de ônibus urbanos e também à necessidade de melhoria do trânsito e à diminuição de emissões poluidoras nas cidades grandes (CGEE, 2010).

¹⁹ Grupo de empresários sediados no CIETEC.

O segundo projeto consistiu, em julho de 2009, no funcionamento de um ônibus alimentado por células a combustível pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP). O ônibus foi construído pela própria empresa e contou com apoio de outras, entre elas a MARCOPOLO, fabricante de carrocerias e de seus componentes, e a PETROBRAS Distribuidora, integradora e operadora da estação de abastecimento de hidrogênio (LABORDE et al., 2010).

O terceiro projeto se relaciona à montagem e à operação de uma célula a combustível capaz de produzir energia, utilizando o etanol com potência mínima de 5 kW. Este projeto é financiado pela FINEP e conta com sócios, como o Instituto Nacional de Tecnologia (INT), o Instituto de Investigações Energéticas e Nucleares (IPEN) e o Centro de Investigações de Energia Elétrica (CEPEL) (LABORDE et al., 2010).

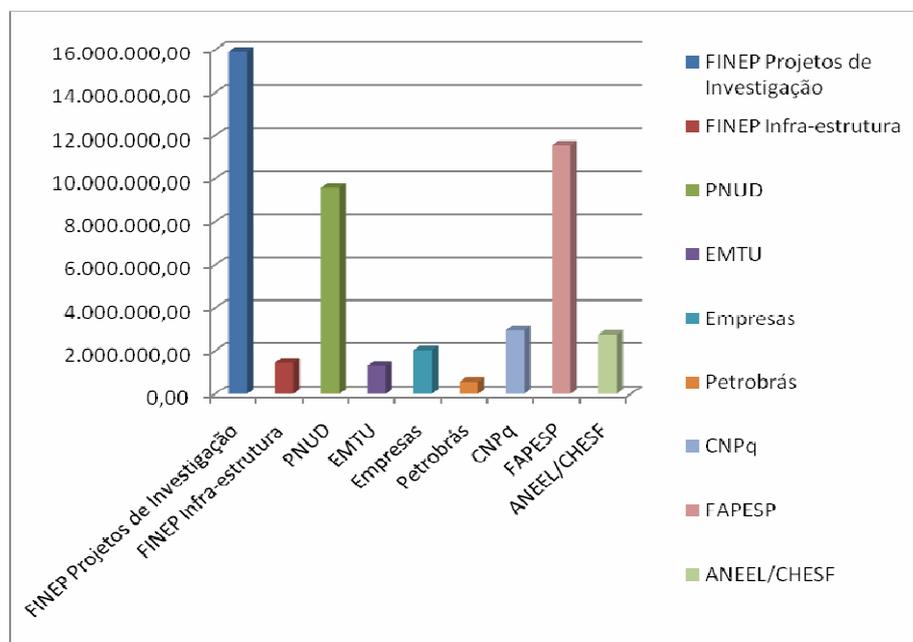
A produção de hidrogênio²⁰ no Brasil tem finalidade industrial de acordo com Assis et al. (2008). Neste aspecto, cabe destacar também o papel desempenhado pela empresa PETROBRAS, que vem destinando recursos no aprimoramento dessa tecnologia, como é o caso da implantação da Unidade de Geração de Hidrogênio (UGH) na Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), situada em Canoas (RS). O objetivo da Unidade, segundo REFAP (2011), é fornecer hidrogênio para a Unidade de Hidrotratamento (UHDT) com o intuito de “reduzir os teores de enxofre e de componentes instáveis no combustível, o que possibilita a Refap produzir um diesel mais estável e menos poluente”. Segundo dados da Refinaria, a capacidade de produção é de 550 mil Nm³/dia de hidrogênio com 99,9% de pureza, com cargas de gás natural (224.880 Nm³/dia) ou gás de refinaria (302.000 Nm³/dia). A PETROBRAS tem realizado pesquisas na área energética com o intuito de reduzir a produção de compostos tóxicos, como é o exemplo da célula a combustível de hidrogênio (PETROBRAS, 2011).

²⁰ De acordo com Assis et al. (2008), a melhor opção para produzir hidrogênio por processos biológicos é a fermentação, dada a possibilidade da produção desse gás ser constante. Neste caso, é utilizado um bioreator alimentado com produtos, como substratos de origem orgânica simples (glicose, sacarose e melação de cana de açúcar, sendo, porém, que os dois primeiros são mais estudados).

A PETROBRÁS já produz o hidrogênio a partir do processo denominado reforma a vapor do gás natural, GLP (gás de cozinha). A capacidade da planta instalada foi de 10 milhões de Nm³ no ano de 2008 e deverá ser aumentada, no mínimo, em 400% nos anos seguintes para suprir a demanda por combustíveis, tanto diesel como gasolina produzidos com um menor teor de enxofre (10ppm), seguindo determinações ambientais (RODRIGUES et al., 2010).

O Gráfico 10 apresenta os investimentos e as instituições brasileiras que investem na pesquisa sobre hidrogênio.

Gráfico 10: Investimentos em hidrogênio no Brasil – 2001-2008 (em US\$)



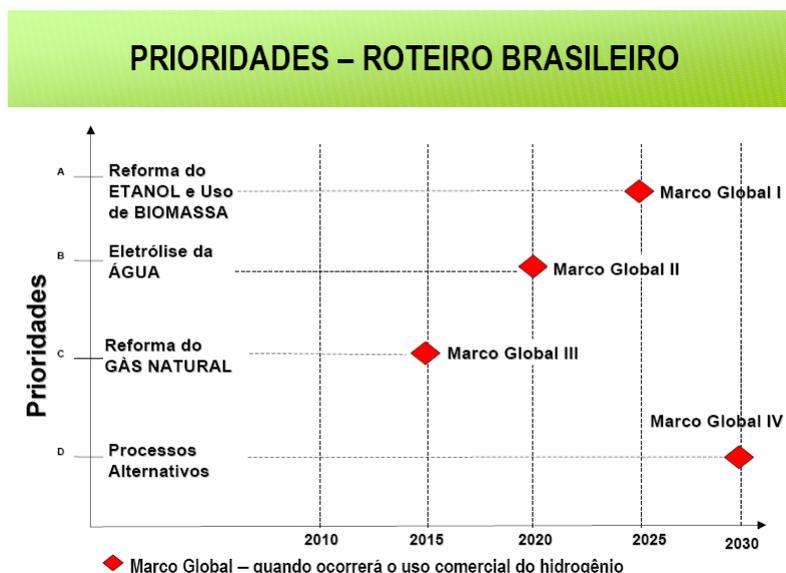
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Laborde et al. (2010, p.34).

O Brasil tem a sua disposição uma variada matriz energética, tendo em vista todas as alternativas que dispõe para a produção de combustíveis fósseis e renováveis. Simultaneamente, o crescimento dos setores econômicos implicará numa maior demanda por energia, em médio e longo prazo, o que constitui um ambiente adequado para o ingresso gradativo do hidrogênio com fins comerciais.

4.3 A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NO BRASIL

Araújo (2009) apresenta as prioridades, para o Brasil, de quando acontecerá a utilização comercial do hidrogênio, oriundo de fontes distintas, sendo elas a reforma do etanol e o uso de biomassa, a eletrólise da água, a reforma do gás natural e processos alternativos. Como se observa no Gráfico 11, já para o ano de 2015 ocorrerá o uso comercial do hidrogênio produzido pela reforma do gás natural, sendo que em 2020 ocorrerá o uso comercial do hidrogênio obtido pela eletrólise da água. Para o ano de 2025 está prevista a comercialização do hidrogênio oriundo da reforma do etanol e do uso de biomassa. Por fim, para o ano de 2030, processos alternativos para obtenção de hidrogênio entram em pauta.

Gráfico 11: Prioridades no roteiro brasileiro para o hidrogênio – 2010-2030



Fonte: Araújo (2009, p.4).

No Brasil, há três plantas de células a combustível em funcionamento, sendo duas delas no estado do Paraná e uma no Rio de Janeiro. A potência dessas células é de 200 kW/h cada e o que as mantém em funcionamento é o gás natural reformado a hidrogênio (ASSIS et al., 2008). De acordo com Lellis et al. (2010, p.86-87):

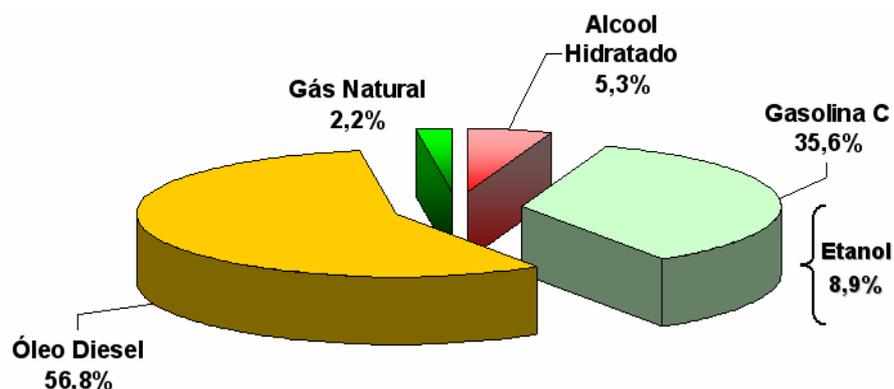
As principais aplicações de células a combustível estão concentradas em transporte (automóveis, ônibus, caminhões, motos, scooters, barcos, veleiros, veículos industriais, bicicletas, cadeiras de rodas, carrinhos de golf, trens e aviões); equipamentos eletrônicos portáteis (laptops; mp3 players;

celulares; palmtops, câmeras, etc.), uso militar; geração de energia elétrica e backup de energia; uso doméstico e aplicações industriais. Em resumo, em relação ao uso, elas se distribuem em quatro segmentos principais: transporte, co-geração e geração distribuída de energia, uso residencial ou doméstico e aplicações portáteis.

Segundo Foster et al. (2011), o processo de produção de células a combustível ainda se encontra na fase inicial, mas existem pesquisas sendo desenvolvidas no que diz respeito a esses sistemas. A tecnologia nacional dispõe de células com poder de geração de energia de 25 W a 5 kW, consideradas de potência baixa, e de 5kW até 75 kW, que estão num estágio de desenvolvimento. Futuramente, o mercado ofertará sistemas de 250 kW. Conforme apresenta Bezerra Filho (2008), em Curitiba (PR), a empresa Brasil H2 *Fuel Cells Energy* está comercializando células a combustível tanto estacionárias quanto móveis, com potência de 12W a 5 kW.

Em relação à matriz energética brasileira, no Gráfico 12, observa-se que, em 2003, a oferta interna de combustíveis veiculares totalizou pouco mais de 1 milhão de barris por dia, cuja distribuição, indicada na matriz de combustíveis veiculares, apresenta participação majoritária do diesel e da gasolina.

Gráfico 12: Diversidade da matriz energética brasileira – combustíveis



Fonte: CGEE (2010).

O hidrogênio é utilizado na melhoria dos combustíveis e, no caso do diesel, ele é usado para retirar o enxofre existente, tornando menor a emissão de poluentes, como os derivados do enxofre. Cruz (2010, p. 22) comenta que

A tecnologia mais empregada na remoção do enxofre do diesel utiliza o hidrogênio como elemento de captura do enxofre. Para atender a essa nova regulamentação muitas refinarias estão ampliando sua produção de

hidrogênio visando garantir a disponibilidade deste elemento e o atendimento à nova regulamentação.

Em outro momento, o autor afirma que:

O limite de enxofre no diesel brasileiro é consideravelmente mais alto que os apresentados nos países desenvolvidos. Além dos problemas inerentes à aplicação destes limites, ligados principalmente a questões de saúde pública e danos ambientais, a falta de uma regulamentação mais restritiva alinhada aos limites existentes no primeiro mundo impõe uma barreira importante para as exportações do diesel produzido no mercado nacional (CRUZ, 2010, p.23).

No ano de 1996, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) implantou o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) com a finalidade de diminuir as emissões oriundas dos automóveis no Brasil. Esta instrução foi uma das causas para que o catalisador se tornasse imprescindível na produção de veículos. O Proconve tem duas hierarquias, uma voltada para automóveis leves, chamados de passeio, e outra voltada para automóveis pesados (CRUZ, 2008).

Nos anos 1990, as fábricas de veículos já produziam motores com coeficientes de emissão abaixo daqueles solicitados em 1993, ano em que se começou a controlar a emissão para veículos deste tipo, com a adoção de diferentes etapas. Nessa ocasião, a definição para emissão de gases (fase 1) e de partículas (fase 2) não foi estabelecida por lei. A fim de acolher os limites estabelecidos pela fase 3, que entrou em vigor a partir de 1994, foram criados modelos inovadores de motores com o objetivo de reduzir o gasto de combustível, elevar a força e mitigar as emissões de gases de óxido de nitrogênio com inovações tecnológicas (CRUZ, 2008).

No ano de 1998, vigorou a fase 4, reduzindo ainda mais os limites instituídos na etapa anterior. Durante a inserção dessa fase, os produtos de diesel brasileiro tiveram seus níveis de enxofre reduzidos para os presentes 500 ppm para serem utilizados em cidades e 2.000 ppm para serem utilizados no interior (CRUZ, 2008).

No ano de 2002, o Conama anunciou a Resolução 315/2002, regulamentando as novas fases do Proconve, fases 5 e 6. A grande parte deste documento impunha

ônus aos poluentes emitidos por motores do ciclo Otto²¹ e Diesel, distinguindo experimentos e aplicando normas direcionadas na sua maior parte para a indústria de veículos. Este documento menciona no Artigo 18, Parágrafo 2, que os combustíveis vendidos terão a obrigação de ter peculiaridades adaptadas e ajustadas com as técnicas a serem tomadas e serem disponíveis nos prazos previstos na Resolução (CRUZ, 2008).

Dessa forma, mesmo a resolução não especificando declaradamente os graus de enxofre no diesel, ela vincula o combustível aos níveis de emissão permitidos para os motores de combustão. Ainda que a Resolução 315 não recomende os índices de enxofre no óleo, os fabricantes de combustíveis debateram a legitimidade jurídica do regulamento, tendo em vista que o regulamento sobre os ingredientes que compõem os combustíveis é de envergadura apenas e exclusivamente da Agência Nacional do Petróleo (ANP) (CRUZ, 2008).

Mesmo com a contenda a propósito do tema, a etapa 5 do Proconve iniciou em janeiro do ano de 2006 sem maiores agravos, tendo em vista que o incremento da técnica dedicada para os novos automóveis admitia o uso do diesel com no máximo 500ppm, não ultrapassando os limites de emissão estabelecidos. No entanto, a indústria de veículos noticiou que para atender a etapa 6 daquele programa, antevisto para o mês de janeiro do ano de 2009, o diesel não poderia apresentar um nível maior do que 50ppm de enxofre. No ano de 2007 acabou a discussão, momento em que a ANP anunciou a Resolução ANP 32, de dia 16 de outubro de 2007, que regulamentava os coeficientes máximos de enxofre, recomendando limites para que os fabricantes atendessem a Resolução. Este limite seria combinado com o começo da etapa 6 do Proconve (CRUZ, 2008).

Cruz (2010, p. 26) afirma que

Além dos investimentos atuais, novos montantes devem ser investidos na redução dos níveis de enxofre no diesel, uma vez que o Conama aprovou no final de 2008 uma nova resolução limitando o enxofre presente no diesel em 10ppm, introduzindo uma nova fase no Proconve (P-7). Esta nova fase entraria em vigor a partir de 2012.

²¹ Nikolaus August Otto (1832-1891) foi engenheiro, inventou e construiu o primeiro motor de combustão interna de quatro tempos, determinando o ciclo teórico sob o qual trabalha o motor de explosão (1876), o conhecido ciclo Otto.

Nesse sentido, segundo MME (2012), em fevereiro de 2012 completou um mês que o denominado Diesel S50 está sendo ofertado Brasil²². O objetivo da adoção desta tecnologia é reduzir a emissão dos gases que poluem o meio ambiente e ao mesmo tempo dar mais eficiência aos veículos. Essa ação atende as Fases P-7 e L-6 contidas do Proconve, normatizada pela Resolução do Conama. O Proncove é um empreendimento do Conama, sendo que o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) é responsável por sua coordenação, tendo por meta a redução dos limites de emissões de gases poluentes, a maior eficiência aos veículos.

A produção nacional de diesel não está pronta para abastecer o mercado com combustíveis deste tipo pela PETROBRAS, companhia que detém o monopólio da fabricação do diesel brasileiro. A PETROBRAS empenhou-se em importar esse combustível com nível de 50ppm de enxofre, denominado diesel S-50. A medida adotada abrangeria somente automóveis fabricados de janeiro de 2009 em diante, tendo em vista que, de acordo com a companhia, para os veículos produzidos anteriormente, a adoção da medida não traria benefícios pelo fato de não possuírem tecnologia compatível com o novo combustível.

Anualmente, em torno de 120 mil novos caminhões ingressam nas rodovias e estradas do país. Esse fato faz com que haja pressão para a importação do diesel com menor teor de enxofre, o S-50. A PETROBRAS tem trabalhado na atualização 14 refinarias (US\$ 6,5 bilhões), especialmente, para a edificação de unidades de hidrodessulfurização do diesel (HDT) e de unidades de geração de hidrogênio (UGH). Assim, será possível suprir o consumo demanda de diesel S-50, não necessitando a sua importação.

Novas legislações na Europa e nos EUA e novas regras para os graus de enxofre no diesel do Brasil elevam a precisão por procedimentos de hidrotreamento.

²² O Diesel S50 é menos poluente, pois em sua composição há 50 ppm (partes por milhão) de enxofre. Este diesel é designado para veículos do ciclo diesel, como caminhões, ônibus e comerciais leves fabricados a partir de janeiro deste ano. Conforme o MME (2012), o Diesel S50 será ofertado somente até 31 de dezembro de 2012, já que, no ano seguinte, ele será trocado por um combustível com um teor ainda menor de enxofre em sua composição, denominado Diesel S10.

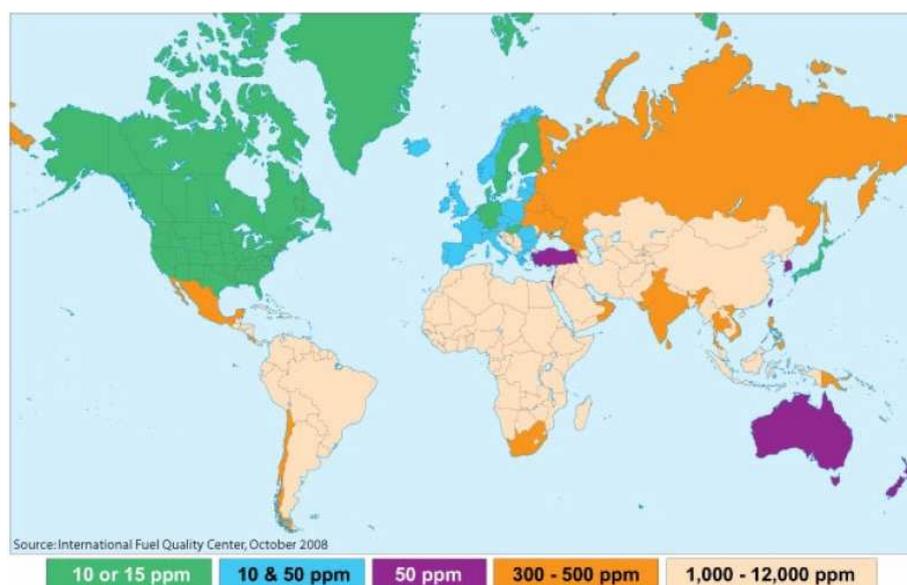
Muitas refinarias ao redor do mundo se empenharam em tornar suas unidades de hidrotratamento mais modernas ou construir novas. A quantidade de hidrogênio demandado para atuar nestas unidades se amplia em grandeza ascendente. No processo de hidrotratamento, cada um dos átomos de enxofre retirado esgota dois átomos de hidrogênio, derivando na constituição de H₂S e, depois de novo tratamento, resultando em vapor de água e sulfeto de zinco (ZnS) (CRUZ, 2010).

Cruz (2010, p. 26) afirma que

Diante deste cenário, o balanço de hidrogênio dentro das refinarias passou a ser crucial para a produção de combustíveis, sendo que no curto prazo existe a necessidade de construir unidades de produção de H₂, para manter este balanço, enquanto estudos de novos processos, matérias primas, produtividade e análise econômica da produção do hidrogênio passam a ter enorme importância a médio e longo prazo.

Em relação aos teores de enxofre no diesel, na Figura 1 são apresentadas as regiões do mundo e a porcentagem ppm de enxofre no combustível. Observa-se que na América do Sul, na África e em parte da Ásia, os níveis de enxofre contidos no petróleo estão entre 1.000 e 12.000 ppm. Contudo, na maior parte da América do Norte, esta porcentagem está entre 10 e 15 ppm. A Austrália aparece com 50ppm e o Japão com 10 a 50 ppm.

Figura 1: Mapa global com os teores de enxofre no combustível (diesel)



Fonte: Cruz (2010, p.23).

Por fim, no Brasil, o MCT tem investido em pesquisas em hidrogênio e em células a combustível com o objetivo de reduzir os gases que provocam o efeito estufa e também com o intuito de garantir a segurança energética.

5 CONCLUSÕES

As células a combustível e os avanços tecnológicos para geração de hidrogênio se encontram em estágio avançado em alguns países. No Brasil, existem diversos estudos, como Moreira (2005), Santos (2008), Rohrich (2008), Bernardi Junior (2009), Braga (2009), Matos (2009), Cruz (2010) e D'Alessandro (2011), entre outros, que destacam a intenção de tornar a tecnologia do emprego direto do hidrogênio em células a combustível e, com isso, permitir a conversão de hidrogênio em energia para utilização em veículos e na geração de energia elétrica em estações estacionárias. Também tem sido realizados investimentos em hidrogênio para a diminuição dos níveis de enxofre no diesel. A indústria automobilística vem atendendo às Resoluções, criadas desde 2002, com novos motores e tecnologias. Segundo Carvalho

O hidrogênio surge, dessa forma, como uma alternativa energética, podendo ser gerado do excedente de força das usinas hidrelétricas para, posteriormente, gerar energia elétrica em localidades distantes das linhas de transmissão, já que pode ser acondicionado e transportado até as distantes unidades geradoras. O hidrogênio é utilizado cada vez mais para tornar o diesel menos poluente e aceitável nos grandes centros urbanos. Ele também entra na composição de componentes eletrônicos, farmacêuticos, entre outros, destacando-se na forma de promover a geração de energia limpa, células a combustível ou melhoria de combustíveis (diesel). O hidrogênio também entra na composição de adubos e de fertilizantes utilizados, por exemplo, na cana de açúcar, que, por sua vez, gera açúcar e álcool.

No mundo, recursos públicos e privados vêm sendo aplicados nessa tecnologia, que permite um aproveitamento do hidrogênio na forma de energia elétrica gerada a partir do mesmo quando em contato com as células a combustão. Para isso, vários modelos de células, com diferentes procedimentos para geração de energia e matérias para a sua construção, têm sido produzidos e pesquisados.

Como ocorreu na transição do carvão para o petróleo, está sendo desencadeada a era do hidrogênio, que entra na matriz energética mundial para

consolidar ainda mais as nações na geração de energia, principalmente, em povoados distantes e em órgãos que não podem sofrer interrupção de fornecimento energético, como hospitais. O principal limitante para uma economia do hidrogênio sustentável e economicamente viável ainda se encontra no custo das células a combustível, necessárias para que o hidrogênio, vetor energético, seja utilizado como energia elétrica. Existe, ainda, a questão política que envolve grandes empresas e países com suas economias alicerçadas em combustíveis fósseis.

Os investimentos estatais brasileiros em hidrogênio estão direcionados para dois segmentos: sua utilização direta em células a combustível, por exemplo, em computadores e em veículos (ônibus) e para tornar os combustíveis menos poluentes (diesel). Por fim, a preocupação com o meio ambiente tem suscitado a procura por combustíveis mais eficientes e menos poluentes. Neste sentido, os investimentos estatais brasileiros em hidrogênio estão buscando a redução dos impactos ambientais ocasionados por combustíveis fósseis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA A. T. de. **O hidrogênio como combustível**. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005. Disponível em: <<http://www.eq.uc.pt/innovar/hidrogenio.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

ARAÚJO, S. C. de S. **A energia de hidrogênio: desafios**. Brasília: MME, 2009. Disponível em: < <http://www.emtu.sp.gov.br/EMTU/pdf/p14mme.pdf> >. Acesso em: 15 fev. 2012

ASSIS, Adilson J. et al. Produção de hidrogênio a partir da fermentação de compostos orgânicos. In: SEMINÁRIO DE IC, 12, 2008, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2008.

BERNARDI, Junior P. **Alternativas para a produção de hidrogênio nas regiões brasileiras visando a geração de energia elétrica distribuída**. 2009. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

BEZERRA FILHO, J. G. **Células a combustível a hidrogênio: estudo de caso comparativo com um motor a combustão**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Tecnologia Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Fortaleza, CE, 2008.

BRAGA, J. M. F. **Análise da viabilidade econômica da integração de sistemas de célula a combustível, nas plantas de cloro-soda, para utilização do hidrogênio gerado no processo**. 2009. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

CARVALHO, Joaquim Francisco. **O Declínio da era do petróleo e a transição da matriz energética brasileira para um modelo sustentável**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ENERGÉTICOS. CGEE. **Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025; tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

CRUZ, F. E. da. **Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: avaliação energética e custo de produção**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

D’ALESSANDRO M. **Metodologia de gerenciamento de risco do hidrogênio**. 2011. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, PR, 2011.

DEPARTMENT OF ENERGY. DOE. **Energy sources**. Hydrogen. Disponível em: <<http://www.energy.gov/energysources/hydrogen.htm>>. Acesso em: 9 maio 2011.

ESPINDOLA, Juliana da S. **Produção fotocatalítica de hidrogênio a partir de soluções de etanol em água**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

FOSTER, Maria das G. et al. **Estruturação da economia do hidrogênio no Brasil**. Brasília: CGEE, 2011. Disponível em: <<http://cncti3.cgее.org.br/Documentos/Seminariosartigos/Areasintnacional/DraMaria%20das%20Gracas%20Silva%20Foster.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2011.

GATTO, B. B. **Panorama do setor elétrico brasileiro e maior inserção de formas renováveis de geração de energia no país**. 2010. Monografia (Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Universidade de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. ISA. **Almanaque Brasil Socioambiental**. São Paulo: Editora ISA, 2008.

LABORDE, Miguel A. et al. **Potencialidades del hidrogeno como vector de energia em iberoamérica**. Buenos Aires: Ediciones CYTED, 2010.

LELLIS, Vera Lúcia Maia et al. **Relatório final de atividades** – Metas 4 e 5: Projeto UTILH2. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 2010.

MATOS M. B. de. **Investimentos financeiros em projetos de células a combustível e hidrogênio no Brasil**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MME. Disponível em:
<http://www.mme.gov.br/mme/noticias/destaque2/destaque_298.html>. Acesso em:
6 fev. 2012.

MOREIRA, Leila Burgos de Carvalho. **Avaliação dos aspectos ambientais da geração de energia através de termoelétricas a gás natural**. 2005. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005.

PETROBRAS. **Energia e tecnologia**. Outras fontes de energia: hidrogênio combustível. Disponível em: <<http://www.PETROBRAS.com.br/pt/energia-e-tecnologia/fontes-de-energia/outras-fontes-energia/default.asp>>. Acesso em: 19 maio 2011.

PETROBRAS. **Fatos e dados**. Disponível em:
<<http://fatosedados.blogsPETROBRAS.com.br/2010/05/27/onibus-movido-a-hidrogenio-e-lancado-no-rio/>>. Acesso em: 15 fev. 2012.

REFINARIA ALBERTO PASQUALINI. REFAP. **Unidades**. UGH - Unidade de Geração de Hidrogênio. Disponível em:
<http://www.refap.com.br/refap_unidades.asp>. Acesso em: 12 maio 2011.

RIFKIN, Jeremy. **Economia do hidrogênio**. São Paulo: Book do Brasil Editora Ltda., 2003.

RODRIGUES, Glenda Rangel et al. **Fuel quality (and air quality) vs. greenhouse gases emissions** – The Challenge of Oil Refines. Paper 2010-830-AWMA. 2010.

ROHRICH, S. S. **Descarbonização do regime energético dominante: perspectivas para a economia do hidrogênio no Brasil**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

SANTOS, A. M. R. **Tendências tecnológicas das células a combustível para uso do hidrogênio derivado de petróleo e gás natural**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

ANEXO

Anexo1: Ônibus urbano elétrico híbrido de 12 metros



Fonte: PETROBRAS (2012).