



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICA CIENTÍFICA E
TECNOLÓGICA**

SANDRA SIMM ROHRICH

**DESCARBONIZAÇÃO DO REGIME ENERGÉTICO DOMINANTE: PERSPECTIVAS
PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Doutora em Política Científica e Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Newton Müller Pereira

**CAMPINAS – SÃO PAULO
AGOSTO – 2008**

FICHA CATALOGRÁFICA

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL DA UNICAMP

Bibliotecário: Helena Joana Flipsen – CRB-8ª / 5283

Rohrich, Sandra Simm

R636d Descarbonização do regime energético dominante :
perspectivas para a economia do hidrogênio no Brasil /
Sandra Simm Rohrich. -- Campinas, SP : [s.n.], 2008.

Orientador: Newton Müller Pereira.

**Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Geociências.**

1. Hidrogênio. 2. Carbonização. 3. Política energética -
Aspectos econômicos. I. Pereira, Newton Müller.
II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de
Geociências. III. Título.

Título e subtítulo em inglês: Descarbonization of dominant energetic regime :
perspectives on economy of hydrogen in Brazil.

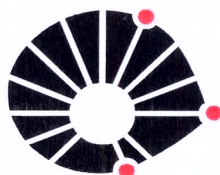
Palavras-chave em inglês (Keywords): Hydrogen, Carbonization, Energy
policy - Economic aspects.

Titulação: Doutor em Política Científica e Tecnológica.

Banca examinadora: André Tosi Furtado, Ennio Peres da Silva, Newton Pimenta,
Mauricio Pereira Cantão.

Data da Defesa: 11-08-2008.

Programa de Pós-Graduação em Política Científica e Tecnológica.



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM
POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

AUTORA: SANDRA SIMM ROHRICH

DESCARBONIZAÇÃO DO REGIME ENERGÉTICO DOMINANTE:
PERSPECTIVAS PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL

ORIENTADOR: Prof. Dr. Newton Müller Pereira

Aprovada em: ____/____/____

EXAMINADORES:

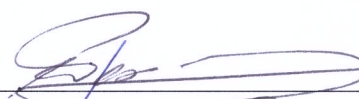
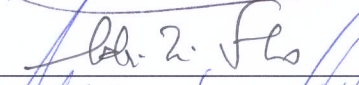
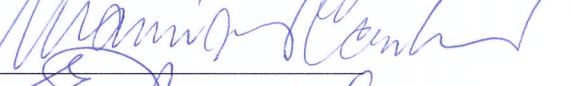
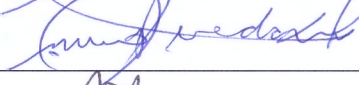
Prof. Dr. Newton Müller Pereira

Prof. Dr. André Tosi Furtado

Prof. Dr. Maurício Pereira Cantão

Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

Prof. Dr. Newton Pimenta Neves Junior

 - Presidente





Campinas, 11 de agosto de 2008

Às minhas filhas, Sofia e Julia, e ao meu amor, Rafael.

AGRADECIMENTOS

Enfim chegou um dos momentos mais esperados desde a entrada do doutorado, agradecer àqueles que contribuíram para a realização de um sonho.

Começo pelo meu orientador, Professor Doutor Newton Müller Pereira, por ter acreditado no meu potencial e aceitado o desafio de me orientar em um tema o qual eu não dominava em aspecto algum. Agradeço a sua dedicação e dezenas de leituras minuciosas, principalmente as palavras de apoio que me ajudaram a enfrentar essa dura jornada.

Agradeço o apoio oferecido pela secretaria do departamento, principalmente a Adriana, Edinalva e Valdinere, que sempre foram muito prestativas e eficientes.

Agradeço aos demais professores do departamento que me proporcionaram o aprendizado e crescimento pessoal.

Agradeço aos professores membros da banca, pelo tempo despendido na leitura e contribuições para a finalização desta tese.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de doutorado com a qual pude me manter durante parte do curso.

Agradeço aos entrevistados por cederem informações sem as quais seria impossível concluir esta Tese, haja vista a limitação de publicações pertinentes ao tema. Principalmente por disporem de seu tempo para dividir o conhecimento e experiência.

Agradeço aos colegas professores da Escola Técnica da Universidade Federal do Paraná que me ajudaram a suprir minhas aulas sempre que precisei estar com meu orientador ou em atividades do doutorado.

Agradeço aos meus pais, Walton e Irma, por terem me apoiado em mais esta jornada e vibrado em cada uma das minhas conquistas. O carinho e a compreensão, entendendo o meu nervosismo ou ansiedade em terminar, apoiando as minhas decisões profissionais, as trocas de emprego e de cidade, mas, sobretudo, acreditando no meu potencial.

Agradeço especialmente ao meu marido, Rafael, que tem sido um grande companheiro. Acompanhou a minha trajetória final do mestrado e no doutorado aceitou abrir mão dos poucos momentos que tínhamos juntos para que eu pudesse estudar. Sem falar nas minhas viagens semanais para Campinas, quando ele sempre me buscou de madrugada na rodoviária, sem nunca reclamar, apenas me dando força. Obrigada Rafael, sem você eu não conseguiria.

Agradeço a todos os meus amigos e familiares por terem compreendido a minha ausência em uma série de eventos ou por ter carregado a Tese comigo em grande parte deles.

Agradeço a todos aqueles que, por um momento, pararam para ouvir um pouco sobre este trabalho, se interessam, questionaram e pediram para receber uma cópia assim que eu terminasse.

Agradeço pela força divina que me fez persistir e finalizar o que até agora foi o maior projeto da minha vida.

“Os problemas ecológicos e as demandas de sustentabilidade levam a concluir que as metas prioritárias da ciência deixaram de ser a conquista da natureza. As prioridades são hoje muito mais humildes e também muito mais complexas: estabelecer uma relação harmoniosa entre a sociedade e a natureza. Enquanto as antigas metas podiam perfeitamente prescindir de qualquer um que não fosse técnico ou cientista, as atuais não podem ser cumpridas apenas com esses atores”.

(Héctor Ricardo Leis, 1999, p. 162).

Talvez o trabalho com célula a combustível seja um dos mais apaixonantes que eu já fiz na vida, porque dificilmente você tem oportunidade de trabalhar com tecnologia de ponta, aquilo que não foi inventado ainda. Se você pensar no automóvel, é uma tecnologia madura que você aprende na escola. O petróleo é tecnologia madura, você também aprende, tem muita fronteira, mas você aprende porque tem milhares de pessoas no mundo que sabem o assunto. Essa área é muito restrita então eu pude comprovar aquela teoria que fala que tecnologia de ponta tem poucas pessoas, ninguém sabe nada, o conhecimento é restrito, conhece nominalmente quem sabe. É uma área rara de trabalhar, onde você tem pouco conhecimento e eu acho que existe um grau de risco maior. Você pode estar andando por aqui e de repente muda tudo e tudo o que você fez de repente não vale nada. É sempre um grau de risco trabalhar com tecnologia de ponta (Adriano Duarte Filho – MCT, 2006.)

SUMÁRIO

SUMÁRIO	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE QUADROS	X
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV

INTRODUÇÃO	1
-------------------------	---

CAPÍTULO 1: A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO COMO PROPOSTA PARA A DESCARBONIZAÇÃO DO REGIME ENERGÉTICO DOMINANTE..... 7

1.1 O Regime Energético Dominante.....	8
1.2 A Descarbonização do Regime Energético Dominante	15
1.3 A Economia do Hidrogênio: o hidrogênio como vetor energético e a célula como sistema de conversão	20
1.3.1 <i>Conceituando a Economia do Hidrogênio</i>	21
1.3.2 <i>Conceito e tipos de célula a combustível</i>	29
1.3.2.1 <i>Histórico sobre as células a combustível</i>	29
1.3.2.2 <i>Tipos de células a combustível</i>	32
1.3.3 <i>Aplicações para o hidrogênio e para a célula a combustível em desenvolvimento</i> ..	39
1.4 O hidrogênio e a célula a combustível como propostas para a descarbonização: o contexto internacional.....	44
1.4.1 <i>Iniciativas da IPHE</i>	47
1.4.2 <i>Iniciativas da IEA</i>	50
1.5 Considerações sobre o capítulo	60

CAPÍTULO 2: A TRANSIÇÃO PARA UM NOVO REGIME ENERGÉTICO..... 63

2.1 Trajetórias tecnológicas	64
2.2 Possibilidades de transição para um novo regime energético	73
2.2.1 <i>Estudos prospectivos para o setor energético</i>	73
2.2.2 <i>As alternativas para o regime energético</i>	79
2.3 Obstáculos para substituição do atual regime energético por um novo regime, fundamentado no hidrogênio e na célula a combustível.....	85
2.4 Considerações sobre o capítulo	94

CAPÍTULO 3: A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL..... 97

3.1 As Instituições que coordenaram a elaboração do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil	98
3.1.1 <i>Ministério de Minas e Energia – MME</i>	98
3.1.2 <i>Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT</i>	100
3.1.3 <i>Centro Nacional de Referência em Hidrogênio – CENEH</i>	100

3.1.4 Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC	101
3.1.5 Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ – LABH2/COPPE.....	102
3.1.6 Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO.....	103
3.2 A participação do Brasil nas instituições internacionais	104
3.3 As iniciativas nacionais para a Economia do Hidrogênio	105
3.3.1 O Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio	108
3.3.1.1 A elaboração do PROCAC/PROH2	110
3.3.2. O Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil	111
3.3.2.1 A elaboração do Roteiro.....	115
3.3.3 Os Projetos Estruturantes	118
3.3.3.1 A elaboração dos projetos estruturantes.....	119
3.3.4 As Redes.....	121
3.4 Perspectivas para a Economia do Hidrogênio no Brasil.....	126
3.4.1 Como a Economia do Hidrogênio poderá representar uma ruptura no regime energético brasileiro.....	128
3.4.2 Os obstáculos e as oportunidades para a Economia do Hidrogênio no Brasil	130
3.4.3 Tipos de infra-estrutura e de células a combustível mais adequados para o país.	135
3.4.4 Período em que o Brasil poderá adotar o hidrogênio e a célula a combustível como um regime energético	137
3.5 Considerações sobre o capítulo	140
CONCLUSÕES.....	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
APÊNDICES	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Matriz Energética Mundial.....	08
Figura 1.2: Matriz Energética Brasileira.....	09
Figura 1.3: Substituição energética mundial.....	18
Figura 1.4: Um sistema de energia para o hidrogênio.....	24
Figura 1.5: Sistema de energia para o hidrogênio e para a célula a combustível.....	25
Figura 1.6: O conceito de Célula a Combustível.....	33
Figura 1.7: Célula estacionária PC-25.....	43
Figura 2.1: Evolução da participação das células a combustível no mercado.....	75
Figura 2.2: Participação global do hidrogênio nos setores de transporte, residencial/comercial e industrial.....	75
Figura 2.3: Três cenários exploratórios.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1: Experimentos com o hidrogênio e com as células a combustível.....	31
Quadro 1.2: Tecnologias de sistemas célula a combustível, temperaturas de operação e aplicações potenciais.....	35
Quadro 1.3: Aplicações móveis para as células a combustível.....	42
Quadro 1.4: Eventos e experiências com o hidrogênio.....	47
Quadro 1.5: <i>Scoping Papers</i>	49
Quadro 1.6: Esforços de pesquisas por parte dos países pertencentes ao HCG.....	59
Quadro 2.1: Obstáculos para o hidrogênio e para a célula a combustível.....	91
Quadro 3.1: Coordenadores das Redes.....	121
Quadro 3.2: Estrutura das Redes.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Oferta interna de energia.....	10
Tabela 1.2: Disponibilidade de combustíveis fósseis	12
Tabela 1.3: A Evolução da eficiência das diversas tecnologias de motores.....	40
Tabela 1.4: Investimentos públicos e privados em P&D para o hidrogênio e para a célula a combustível.....	46
Tabela 3.1: Redes, previsões para aporte de recursos	123
Tabela 3.2: Redes, recursos liberados	124
Tabela 3.3: Aporte de recursos para outros temas relevantes.....	125

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA - Agência Nacional de Águas
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP - Agência Nacional do Petróleo
ANTT- Agência Nacional de Transportes Terrestres
BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento
CENEH - Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
CO₂ - Dióxido de carbono
CTPETRO - Fundo Setorial de Petróleo e Gás Natural
INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
HCG - *Hydrogen Co-ordination Group*
IEA - *International Energy Agency*
IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
INT - Instituto Nacional de Tecnologia
IPHE - *International Partnership for the Hydrogen Economy*
MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia
MME- Ministério de Minas e Energia
OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PROCAC - Programa Brasileiro de Sistemas de Células a Combustível
PROH2 - Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA
Descarbonização do regime energético dominante: perspectivas para a
economia do hidrogênio no Brasil

RESUMO

Tese de Doutorado

Sandra Simm Rohrich

Nas últimas décadas o desenvolvimento tecnológico do setor energético tem evoluído em relação às preocupações ambientais, sendo que estas também têm influenciado as opções por determinadas tecnologias energéticas. No contexto atual, os combustíveis fósseis e o motor de combustão caracterizam o regime energético dominante, realidade que apresenta constante crescimento no consumo de energia e leva a debates relacionados à segurança energética, ao esgotamento das fontes fósseis e à necessidade de descarbonizá-las. Por conseguinte, a necessidade de diminuir as emissões de CO₂ justifica a transição para opções energéticas mais amenas para o meio ambiente e que também possam fornecer energia para aplicações estacionárias e veiculares. A opção analisada nesta Tese é o hidrogênio como vetor energético e a célula a combustível como sistema de conversão, pressupondo que, se a inserção dessas tecnologias se efetivar, poderá influenciar toda a estrutura da sociedade e levar ao estabelecimento da Economia do Hidrogênio. Para tanto, as ações internacionais apresentam iniciativas oriundas da *International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE) e da *International Energy Agency* (IEA). Ambas influenciam as orientações brasileiras provenientes das instituições de pesquisa e o desenvolvimento de políticas públicas. No Brasil existem dois documentos formais que tratam da Economia do Hidrogênio, o Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (PROH2), e o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. O objetivo desta Tese é analisar em que condições o atual regime energético brasileiro, para o fornecimento de energia estacionária e veicular, poderá incorporar as tecnologias do hidrogênio, produzido a partir de fontes renováveis, e das células a combustível. Os conceitos de paradigmas e trajetórias tecnológicas são emprestados da teoria evolucionista para subsidiar esta discussão. Para descrever as ações e propostas internacionais para a Economia do Hidrogênio são descritos estudos prospectivos que tratam essa possibilidade como uma ruptura tecnológica, isto é, uma descontinuidade em relação ao regime vigente. Para compreender o contexto nacional foram realizadas entrevistas semi-estruturadas com os coordenadores de área de trabalho do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio, documento que foi considerado o maior avanço brasileiro em busca de uma Política Nacional para a Economia do Hidrogênio e de um Programa Nacional para a Produção e Uso do Hidrogênio. As entrevistas contribuíram para o levantamento das perspectivas para o Brasil, detalhadas na forma de obstáculos e oportunidades, os quais em grande parte corresponderam ao levantamento bibliográfico. Dentre os obstáculos nacionais destaca-se, além da necessidade de políticas públicas, a dificuldade em fazer a transferência dos projetos científicos para a bancada pré-comercial, bem como a necessidade de uma infra-estrutura para a produção, armazenagem e distribuição do hidrogênio, questão esta que também foi amplamente discutida no panorama internacional. Dentre as oportunidades para o país está o aprendizado já alcançado na produção e no uso das fontes renováveis, principalmente as hídricas e a biomassa. Quanto às condições para as mudanças no regime energético brasileiro, tem-se o fato de o Brasil ser um país periférico que tende a acompanhar o desenvolvimento tecnológico observado no ambiente internacional, bem como a predominância da geração distribuída, do hidrogênio obtido das fontes renováveis e das células a combustível estacionárias.

Palavras chave: Economia do hidrogênio; célula a combustível; descarbonização; regime energético; fontes renováveis; paradigma tecnológico; trajetória tecnológica.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA
Decarbonization of dominant energetic regime: perspectives on economy
of hydrogen in Brazil

ABSTRACT

Doctorate Thesis

Sandra Simm Rohrich

In the last decades technological development of energy sector has evolved in connection with environmental worries, inasmuch as these ones have also influenced options for some specific energetic technologies. Current context is characterized by fossil fuel and internal-combustion engine, such reality presents steady increase of energy consume and brings debates related to energy security, fossil sources breakdown and necessity of decarbonization. Accordingly, necessary decrease of CO₂ emissions justify a switch to environmentally less aggressive energetic options that can also supply energy to stationary and vehicular applications. The option analyzed in this thesis is hydrogen as energetic vector and fuel cell as conversion system; supposing effective insertion of such technologies, it would influence all over society structure as well as result on Hydrogen Economy establishment. In this way, international actions reveal initiatives originally from IPHE (*International Partnership for the Hydrogen Economy*) and IEA (*International Energy Agency*). Both them influence Brazilian guidelines produced by research institutions and public policy development. In Brazil there are two official documents about Hydrogen Economy: PROH2 (Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio) and Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. This thesis intends to analyze terms for incorporate of current Brazilian energetic regime, which supplies stationary and vehicular energy, by Hydrogen, produced from renewable sources, and by fuel cells. As subsidy to this analysis, we borrowed concepts of technological paradigm and trajectories from evolutionist theory. In order to analyze international actions and proposals for Hydrogen Economy we described prospective researches on such possibility of technological rupture, i. e., a current regime breaking. In order to understand the national context we employed under-structured interviews with area coordinators of Guideline for Organization of Hydrogen Economy in Brazil, document that have been considered a major Brazilian advance for a National Policy to Hydrogen Economy and a National Program for Hydrogen Production and Use. These interviews were useful to Brazil perspectives surveying, detailed here as obstacles and opportunities, which had largely correspondence with our bibliographic review. Among the national obstacles, besides the necessity of public policies, it shows up difficult transference of scientific projects to a pre-commercial level, as well as necessity of an infrastructure for production, storage and distribution of Hydrogen, problems widely debated around the world. Among the opportunities to the country it shows up the already developed knowledge in production and use of renewable sources, mainly hydric and biomass. About the conditions for changes in the Brazilian energetic regime, has been the fact that Brazil is a country peripheral that tends to follow the technological development observed in the international environment, and the predominance of distributed generation, of hydrogen derived from renewable sources, and of the fuel cell stationary.

Key words: Hydrogen economy; fuel cell; decarbonization; energetic regime; renewable sources; technological paradigm; technological trajectories.

INTRODUÇÃO

O suprimento de energia para atender às necessidades de consumo determinadas pelo atual estilo de vida da sociedade é um tema que interessa à academia, ao setor privado e ao público em geral. Esta Tese em especial destaca a interação dos aspectos técnicos, especificamente as fontes de energia e os sistemas de conversão energética, com os aspectos institucionais e econômicos. Em se tratando do desenvolvimento dos aspectos técnicos, os especialistas buscam melhorar a eficiência energética e atender às especificações definidas pelo poder público. Os aspectos institucionais e econômicos, por sua vez, influenciam nas escolhas técnicas ou se adaptam a elas. Nesse sentido, podem estar relacionados com as políticas públicas, bem como com os incentivos para a indústria energética. É nessa perspectiva que se inspiram as discussões apresentadas no transcorrer desta Tese.

Considera-se que o atual regime energético fundamenta-se, em sua maioria, nos combustíveis fósseis para a geração de energia estacionária e veicular. No contexto observado, o Brasil apresenta peculiaridades já estabelecidas, observadas nas hidrelétricas para a geração estacionária e no etanol como combustível ou complemento na geração veicular. Todavia, apesar do uso destes renováveis, o Brasil, assim como outros países, emprega o carvão, o petróleo e o gás natural em grandes volumes e procura aumentar a oferta dessas fontes para acompanhar o crescimento da demanda energética.

Para apoiar a análise quanto às possibilidades para o regime energético, os conceitos de paradigma e trajetória tecnológica foram emprestados da teoria evolucionista. Estes termos são constantemente utilizados quando se intenciona compreender como a tecnologia muda e por que muda. Para tanto, parte-se da afirmação que uma nova tecnologia em dado contexto socioeconômico pode levar a um novo paradigma tecno-econômico. Isso porque diferentes trajetórias tecnológicas competem entre si até que se sustente um novo paradigma (DOSI, 1982; FREEMAN, 1984, 1987; FREEMAN e PEREZ, 1988; NELSON e WINTER, 1982). Nesta Tese, o hidrogênio e as possíveis fontes para a sua geração, bem como as células a combustível para aplicações estacionárias ou veiculares, caracterizam as diversas trajetórias tecnológicas que poderão, ou não, levar a uma ruptura em relação ao regime energético vigente. Para efeitos deste

estudo, o hidrogênio e a célula a combustível são considerados com a mesma importância atribuída a algumas tecnologias inventadas no passado, respectivamente a máquina a vapor e o motor de combustão, que, após o seu estabelecimento, foram tratadas como rupturas tecnológicas para as épocas em que surgiram.

As rupturas tecnológicas são historicamente percebidas como a causa de algumas revoluções, tal como a Revolução Industrial, que no século XVIII também ficou conhecida pelas mudanças tecnológicas introduzidas no sistema energético. Naquela época, o carvão mineral e a máquina a vapor substituíram a lenha, promovendo grandes transformações no modelo de vida e no sistema de transportes. Posteriormente, no início do século XX, a evolução tecnológica promoveu a utilização do petróleo no motor de combustão, levando ao surgimento da indústria automobilística. Do mesmo modo, a eletricidade proporcionou maior conforto para os lares e o aumento da capacidade produtiva das indústrias. Ambos foram considerados agentes transformadores do estilo de vida moderno, representado por inovações que significaram, cada qual em sua época, rupturas tecnológicas que resultaram em um novo regime energético.

Na atualidade, embora as tecnologias para aplicação das fontes fósseis passem por constantes melhorias de eficiência e causem cada vez menos impactos ambientais, a crescente demanda energética ocasiona mais poluição e requer cada vez mais eficiência. Por conseguinte, são apontados três problemas decorrentes das escolhas energéticas que vêm sendo analisados pela comunidade científica desde a década de 1970: as emissões de CO₂, a segurança energética e a redução da oferta das fontes fósseis.

O problema norteador desta Tese consiste nas emissões de CO₂, que por sua vez remete a um importante conceito delineador desta problemática: a descarbonização.¹ Esta demonstra que a inserção de fontes de energia menos impactantes para o meio ambiente tem permitido reduzir as emissões de CO₂ por unidade de energia gerada. Logo, esta substituição energética por fontes que contenham menos carbono vem ocorrendo desde que o carvão mineral como fonte energética substituiu grande parte da madeira. Em seguida, o carvão teve parte de seu uso transferido para o petróleo e derivados, o que também significou o início da utilização dos combustíveis líquidos. A mais recente fonte energética fóssil introduzida na matriz global e que leva a fontes com menos carbono é o gás natural, iniciando o uso dos combustíveis gasosos. Verifica-se, portanto, que do

¹ A descarbonização ocorre com a gradual substituição de fontes ricas em carbono por fontes de energia pobres em carbono (Nakicenovic, 1999).

carvão ao gás natural, isto é, com a evolução tecnológica dos combustíveis sólidos aos gasosos, ocorreu uma redução das emissões de CO₂. Esta questão foi exemplificada por Kemp (1992) ao se referir ao final do século XIX, quando a cidade de Londres sofria com os problemas ambientais decorrentes do uso dos cavalos² como meio de transporte, que os automóveis gerariam menos poluição. Entretanto, isso não ocorre de fato, porque, concomitantemente com as tecnologias mais modernas e menos poluentes, a industrialização aumenta e o consumo energético se eleva.

A descarbonização entra nesta Tese ao se advogar que uma das possibilidades para diminuir as emissões de CO₂ reside na Economia do Hidrogênio. A Economia do Hidrogênio consiste no uso do hidrogênio³ como vetor energético e a célula a combustível como a tecnologia que transformará o hidrogênio em eletricidade, tanto para a geração estacionária quanto veicular. O hidrogênio e a célula são abordados como potenciais substitutos ao uso direto das fontes fósseis e do motor de combustão, alternativas aqui consideradas como uma possível ruptura no atual regime energético. Mas há várias incertezas que permeiam o conceito. Uma delas é representada pelas fontes para o hidrogênio. Considera-se que no início será produzido a partir dos combustíveis fósseis, essencialmente do gás natural e do carvão. Mas, no futuro, se as fontes renováveis forem empregadas para produzir o hidrogênio, poderão representar uma ruptura tecnológica, aproximando-se, então, de um novo regime energético. Não obstante, essa provável ruptura não ocorrerá de modo uniforme em todos os países, pois a escolha das fontes de energia para a geração do hidrogênio ainda dependerá das diversidades relativas à geologia e ao clima. Observa-se, ainda, que as vantagens oriundas da mudança inicialmente não abrangerão os custos, que só se tornarão competitivos em relação ao atual regime quando o hidrogênio e a célula a combustível tiverem evoluído em seu aprendizado e alcançarem economia de escala.

Ressalta-se que, para o desenvolvimento da Economia do Hidrogênio, é necessário mais que a introdução das fontes renováveis para produzir o hidrogênio e desenvolver as células a combustível. Faz-se necessário disponibilizar a infra-estrutura para transportar, armazenar e distribuir esse hidrogênio, requerendo o envolvimento das esferas pública e privada. Além disso,

² Considerando que cada cavalo produzia não menos que 15 quilos de estrume por dia, o autor concluiu que os carros teriam um nível 200 vezes menor de emissão de poluentes (KEMP, 1992).

³ O uso do hidrogênio em si não é uma inovação, pois este é um gás industrial conhecido e utilizado em muitas aplicações, tais como refinarias, indústrias química e metalúrgica. A mudança está no fato de utilizar o hidrogênio como vetor energético, tornando-o uma fonte de energia flexível e potencialmente limpa.

é preciso avançar na definição de regulamentações e outras questões que estão em desenvolvimento no mundo todo, como a redução das emissões. Portanto, são muitas as expectativas a respeito da próxima transição energética e dessa nova perspectiva emergem duas questões principais. A primeira é se as fontes renováveis passarão a representar a maior parte da matriz energética no mercado mundial e, a segunda, se o hidrogênio será um importante vetor energético nessa transição.

Além dos avanços tecnológicos e institucionais já citados, há ainda muitas incertezas em torno da possibilidade de a Economia do Hidrogênio levar a um novo regime energético. Logo, cabe a estudos acadêmicos como a presente Tese levantar a questão e tentar compreender quais as possibilidades de transição para um novo regime energético, podendo assim gerar contribuições para o desenvolvimento do setor. Para tanto, o objetivo geral proposto para esta Tese foi **analisar em que condições o atual regime energético brasileiro, para o fornecimento de energia estacionária e veicular, poderá incorporar as tecnologias do hidrogênio, produzido a partir de fontes renováveis, e das células a combustível.**

Para compreender a questão citada, considerou-se a hipótese de que a realidade energética do Brasil difere do contexto internacional, principalmente em relação aos países desenvolvidos. Esse fato se deve às características naturais e às prioridades potencializadas em cada país, tais como o volume de investimentos destinado ao desenvolvimento tecnológico do hidrogênio e das células a combustível, bem como o meio ambiente ou a segurança energética como impulsionadores da mudança.

A fim de buscar informações partiu-se de uma revisão teórica sobre as estratégias nacionais e internacionais para a Economia do Hidrogênio. No âmbito internacional foram consultados os documentos elaborados pela *International Energy Agency* (IEA) e pela *International Partnership for Hydrogen Economy* (IPHE), além de estudos prospectivos para o futuro regime energético. Para compreender a realidade brasileira foram realizadas entrevistas semi-estruturadas com os coordenadores que atuaram na elaboração do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. No âmbito nacional os documentos consultados foram o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil e o Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio.

Em paralelo ao objetivo maior foram delineados outros específicos para a pesquisa, que mostraram consistência a partir da revisão bibliográfica, análise dos documentos e entrevistas

com os coordenadores do Roteiro. Estes objetivos tratam das esferas internacional e nacional. Internacionalmente a proposta foi **descrever as principais ações e perspectivas internacionais para o hidrogênio e para a célula a combustível**. Nacionalmente o objetivo foi **relatar os avanços obtidos na construção da política nacional para o hidrogênio no Brasil, detalhando os obstáculos e as oportunidades, bem como as possibilidades de uso do hidrogênio na célula a combustível**.

A estrutura desta Tese segue um roteiro que está organizado em capítulos para melhor classificar os temas pertinentes ao assunto. O primeiro capítulo descreve o regime energético dominante e os fatores condicionantes de transição para um novo regime que atenderia à descarbonização. A Economia do Hidrogênio é conceituada e as células a combustível são tratadas como a tecnologia que possibilitará o uso do hidrogênio como vetor energético. São apontadas as possibilidades de infra-estrutura para a geração, o transporte, a distribuição, a armazenagem e o uso do hidrogênio. São abordados ainda o histórico do desenvolvimento desta tecnologia, os tipos de células e as aplicações em desenvolvimento para o hidrogênio e para a célula a combustível. No panorama internacional o hidrogênio e a célula a combustível são abordados como propostas para a descarbonização.

No segundo capítulo os escritos de autores Neoshumpeterianos ou Evolucionistas são empregados como instrumental para conceituar e contextualizar termos como paradigmas tecnológicos, trajetórias tecnológicas, regimes tecnológicos e ambiente de seleção. O capítulo trata das possibilidades de transição para um novo regime energético, no qual as fontes renováveis terão um papel importante. Neste mesmo capítulo são descritos estudos prospectivos que evidenciam as expectativas da comunidade científica internacional para o futuro regime energético. O capítulo é finalizado com a apresentação dos obstáculos para a substituição do atual regime energético por um novo, fundamentado no hidrogênio e na célula a combustível.

O terceiro capítulo ilustra as principais ações nacionais que estão sendo empregadas para promover o desenvolvimento da Economia do Hidrogênio. Primeiramente, é feita a apresentação das instituições, em seguida são descritas a participação do Brasil nas organizações internacionais e as iniciativas nacionais, nas quais são empreendidos esforços de várias instituições para o desenvolvimento da produção do hidrogênio e da célula a combustível. Este capítulo traz informações obtidas em entrevistas realizadas com os coordenadores de área de trabalho que

participaram da elaboração do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. No final, são descritas as condições nacionais para entrada na Economia do Hidrogênio.

Nas Conclusões desta Tese são retomados os principais elementos discutidos durante o estudo e respondidos os objetivos inicialmente propostos.

CAPÍTULO 1: A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO COMO PROPOSTA PARA A DESCARBONIZAÇÃO DO REGIME ENERGÉTICO DOMINANTE

Este capítulo inicia-se discorrendo sobre o regime energético dominante, fundamentado nos combustíveis fósseis. São abordadas as fontes que compõem o regime energético, bem como as perspectivas para a continuidade do seu fornecimento, o que aparentemente não será uma decisão dependente apenas da oferta de recursos, mas também dos objetivos em longo prazo para a sustentabilidade.

O segundo tema abordado é a descarbonização, um conceito fundamental no estudo das trajetórias tecnológicas para o regime energético. A história da utilização das fontes energéticas mostra que à medida que novas fontes foram sendo introduzidas, a partir do carvão mineral, em seguida o petróleo e depois o gás natural, houve queda nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) por unidade de energia gerada. Isso ocorreu porque as fontes inseridas apresentaram menos carbono na sua composição, condição que na época não teve por foco o meio ambiente, mas sim a disponibilidade das respectivas fontes energéticas. Foi somente a partir do final do século XX que as questões ambientais começaram a ser associadas aos problemas energéticos. Sendo assim, o histórico processo de descarbonização se torna também no futuro um tema relevante para as decisões energéticas que poderão acarretar na transição para um novo regime.

Dando continuidade à possibilidade de descarbonização, o hidrogênio e a célula a combustível são descritos, respectivamente, como o vetor energético e o sistema de conversão que levam à constituição da Economia do Hidrogênio. É apresentada a cadeia produtiva para a Economia do Hidrogênio, são descritos os tipos de células, e os estágios de desenvolvimento tecnológico das tecnologias para a produção do hidrogênio e para a célula a combustível.

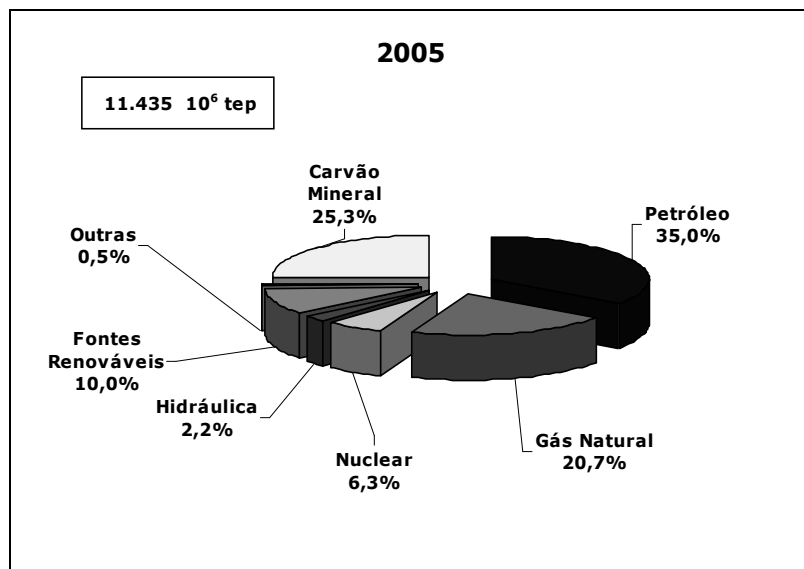
Por fim, a Economia do Hidrogênio é tratada como uma opção para o próximo regime energético e torna-se um eixo condutor da Tese, conjuntamente com a idéia da descarbonização. Para contextualizar a questão são levantadas as principais iniciativas internacionais para o hidrogênio e para a célula a combustível, provenientes da IPHE *International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE) e da *International Energy Agency* (IEA).

1.1 O Regime Energético Dominante

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 a 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 (ODELL, 2004). 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,

No contexto citado os combustíveis fósseis constituem o regime energético dominante, uma vez que suprem 80% do total da matriz energética mundial. O petróleo tem sido a fonte mais empregada, seguido pelo carvão mineral e pelo gás natural (figura 1.1).

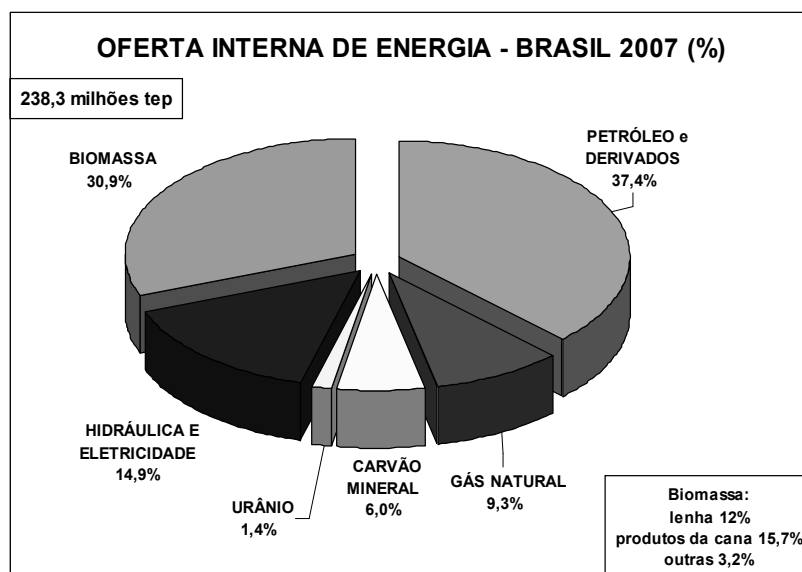
FIGURA 1.1: Matriz Energética mundial



FONTE: MME- Ministério de Minas e Energia (2008), BEN (2007).

No Brasil (figura 1.2) o regime energético possui características próprias em relação ao uso de fontes renováveis, que representam 45% da matriz. Porém, mesmo com essa significativa participação das fontes renováveis, os combustíveis fósseis também constituem o regime dominante no país.

FIGURA 1.2: Matriz energética brasileira



FONTE: MME- Ministério de Minas e Energia (2008), BEN (2007)

Não obstante a existência de um regime energético dominante, as configurações da matriz energética no Brasil e no mundo apresentaram significativas alterações estruturais nos últimos 30 anos, podendo-se destacar a redução percentual no uso de petróleo e derivados. Mas, apesar dessa aparente redução no uso de petróleo e derivados, observam-se incrementos na utilização do gás natural e também do carvão, o que contribuiu para a manutenção da predominância dos combustíveis fósseis nas três matrizes dispostas na tabela 1.1. O Brasil, de maneira mais específica, aumentou substancialmente o uso da energia hidráulica para a produção de hidreletricidade, do carvão mineral e do gás natural, como pode ser constatado na tabela 1.1. Nos países da OCDE houve um incremento significativo na utilização do urânio e do gás natural, que se refletiu na média mundial. Nestes mesmos 30 anos, a diminuição percentual no uso do petróleo e derivados se deve, em parte, aos esforços econômicos, busca de eficiência e substituições decorrentes do choque nos preços de petróleo em 1973 (de US\$ 3 o barril para US\$ 12) e em 1979 (de US\$ 12 para US\$ 40) (MME, 2006).

TABELA 1.1: Oferta interna de energia (%)

IDENTIFICAÇÃO	BRASIL		OCDE		MUNDO	
	1973	2006	1973	2004	1973	2004
Petróleo e derivados	45,6	37,9	53,1	40,7	45,0	34,3
Gás natural	0,4	9,6	18,8	22,1	16,2	20,9
Carvão mineral e derivados	3,1	6,0	22,4	20,4	24,9	25,1
Urânio (U308) e derivados	0,0	1,6	1,3	10,6	0,9	6,5
Hidráulica e eletricidade	6,1	14,8	2,1	2,0	1,8	2,2
Biomassa	44,8	30,1	2,3	4,2	11,2	11,0
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

FONTE: MME, 2006

O atual regime energético mundial vem apresentando alguns problemas, dentre os quais se destacam a possibilidade de exaustão do petróleo e sua reverberação na segurança energética de determinadas regiões e países. Mais recentemente, as emissões de CO₂ têm sido apontadas como potencializadoras da poluição e do aquecimento global, uma vez que a combustão das fontes fósseis (carvão, petróleo e gás) produz mais dióxido de carbono que qualquer outra atividade humana. Além disso, os sistemas energéticos são a principal fonte das emissões de dióxido de enxofre (82% do total emitido), óxidos de nitrogênio (76% do total emitido) e compostos orgânicos não metálicos (56% do total emitido), além de terem uma significativa participação (46% do total emitido) na emissão de monóxido de carbono (HOLDREN e SMITH, 2000; GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003, p. 77).

Apesar da consciência a respeito dos problemas causados pelo uso dos combustíveis fósseis, existem algumas condições que são empregadas como justificativas para a continuidade e até mesmo para o aumento de seu uso. Isso ocorre na medida em que muitos países possuem reservas consideráveis de carvão mineral empregado na geração de energia elétrica e informam que os custos de mudança para outra fonte seriam muito altos. Outrossim, perspectivas para o futuro demonstram, em análises de longo prazo, uma visão otimista, que sustenta que o petróleo e o gás teriam reservas para os próximos 50 a 100 anos e, possivelmente, mais ainda com as aplicações dos constantes avanços tecnológicos. Nessa perspectiva, acredita-se que o progresso tecnológico possa elevar a eficiência da utilização dos recursos e reduzir as emissões de poluentes (ROGNER, 2000).

Rifkin (2003) é contrário à idéia de que existam grandes reservas de petróleo para os próximos 100 anos. Alertou que, em contraste com a crise do petróleo dos anos 1970, que foi

induzida politicamente, uma nova crise ocorrerá em função de uma escassez real. Para o autor, a redução do petróleo bruto econômica e tecnicamente viável e o aumento da população humana (sobretudo no mundo em desenvolvimento) acarretarão uma nova e perigosa dinâmica. Mas, para Pereira (2003), a escassez não é tão proeminente, o autor acredita que, se o consumo do petróleo mantiver o patamar atual, ainda teremos petróleo para usar por mais 50 anos e, num cenário de grande otimismo, até o ano 2030 já estaremos adquirindo células a combustível para abastecer os veículos e suprir as necessidades energéticas domésticas, mudando radicalmente o perfil da matriz energética mundial.

Dando continuidade à discussão sobre o esgotamento ou não dos combustíveis fósseis, Odell (2004) questiona as previsões feitas na década de 1970. Segundo o autor, naquela época foi previsto um consumo cumulativo de petróleo, para o período de 1971 a 2000, de 1.750 bilhões de barris, mas a realidade consumida foi menor que 700 bilhões de barris. O autor complementa que a situação é similar para o carvão e mencionou que na década de 1980 foi apontado que o consumo anual aumentaria de 3.000 milhões de toneladas observado na época para 10.000 milhões no ano 2000. Contudo, o que ocorreu foi um crescimento de apenas 10%, chegando a 3.300 milhões de toneladas.

Odell também relata que devido à ampla disponibilidade do carvão, sua indústria poderá vir a ter o dobro do tamanho entre até 2100. Mesmo assim, para o autor, a participação do carvão no fornecimento total de energia cairá dos atuais 25% para 20% em 2050 e para 17% em 2100. Essa diminuição deve-se a razões ambientais, destacando-se a poluição atmosférica e o aquecimento global decorrente das emissões de CO₂, que poderão levar a mudanças de mercado para os combustíveis que contenham carbono.

Quanto ao gás natural, Odell sustenta que, diferentemente do petróleo e do carvão, a produção e o transporte do gás não têm liderado os problemas ambientais em termos de efeitos adversos em paisagens ou condições marinhas. Ademais, as baixas emissões de CO₂ por unidade de energia suprida pelo gás natural, comparada com o carvão e o petróleo, fazem do gás o combustível de carbono preferido, podendo assim reprimir a taxa de crescimento das emissões de CO₂ antropogenicamente criadas em aproximadamente 15%. Odell ressalta que essa porcentagem de redução nas emissões de CO₂ será fortemente realçada pela expectativa crescente de sucesso no processo de sequestro de CO₂.

Baseando-se nas vantagens do gás natural em relação ao petróleo e ao carvão, Odell conclui que o gás será o combustível do século XXI, assim como o carvão o foi no século XIX e o petróleo no século XX. No entanto, o autor lembra que devido às tecnologias já estabelecidas, bem como à oferta das fontes fósseis, o uso global de energia no século XXI ainda permanecerá fortemente orientado em uma combinação de carvão, petróleo e gás natural, o regime energético dominante.

Jaccard (2005) também é contrário à hipótese de esgotamento das fontes fósseis e, para firmar sua posição, o autor faz uso de dados disponibilizados pelo World Energy Assessment. Na tabela 1.2 foram resumidas algumas informações colocadas por Jaccard a respeito das reservas e recursos de combustíveis fósseis.⁴

TABELA 1.2: Disponibilidade de combustíveis fósseis

Combustível Fóssil	Taxa global de consumo por ano	Reserva	Estimativa para a reserva em anos	Recurso	Estimativa para o recurso em anos
Carvão	100 EJ	21.000 EJ	210 anos	200.000 EJ	2000 anos
Petróleo convencional	163 EJ	6.000 EJ	67 anos	12.000 EJ	200 anos
Petróleo não convencional		5.000 EJ		20.000 EJ	
Gás natural convencional	95 EJ	5.500 EJ	160 anos	16.500 EJ	520 anos
Gás natural não convencional		9.500 EJ		33.000 EJ	

FONTE: JACCARD (2005), adaptado pela autora.

De acordo com Tabela 1.2, as reservas mundiais de carvão estão estimadas em 1 trilhão de toneladas ou 21.000 EJ.⁵ Já os recursos mundiais de carvão estão estimados em 7 trilhões de toneladas ou 200.000 EJ. Com uma taxa anual de consumo de 100 EJ, presume-se que, se as reservas serão suficientes para os próximos 210 anos e os recursos estimados para os próximos

⁴ Reservas são recursos cuja exploração é viável nas condições técnicas e econômicas correntes, enquanto recursos são apenas expectativas.

⁵ 1 GJ = 1 gigajoule = 10^9 joules

1 EJ = 1 exajoule = 10^{18} joules

1 barril de óleo (equiv) (1 bep) = $5,71 \cdot 10^9$ J (indústria do petróleo)

1 t carvão (equiv) (1 tce) = $29,31 \cdot 10^9$ J (indústria do carvão) (MACEDO, 2003)

2000 anos. Todavia, se a taxa de exploração aumentar ou se os recursos não se tornarem tecnologicamente ou economicamente acessíveis, esses prazos poderão mudar.

Quanto ao petróleo, as estatísticas que tratam de suas reservas e de seus recursos fazem distinção entre o petróleo convencional⁶ e o não-convencional.⁷ As reservas de petróleo convencional são estimadas em 6.000 EJ, e as estimativas de recursos para o petróleo convencional estão em 12.000 EJ. Por outro lado, as reservas de petróleo não-convencional estão estimadas em 5.000 EJ e os recursos em 20.000 EJ. Por fim, a taxa global de consumo de petróleo (convencional e não convencional) ao ano é de 163 EJ; dessa forma, as reservas atuais poderão atender os próximos 67 anos e os recursos estimados, os próximos 200 anos.

Assim como para o petróleo, os analistas distinguem o gás natural convencional⁸ do não convencional.⁹ As reservas globais de gás convencional são de 5500 EJ e os recursos da ordem de 16500 EJ. As reservas de gás não-convencional são de 9500 EJ e os recursos de 33000 EJ. Com uma taxa anual de consumo global de 95 EJ, as reservas seriam suficientes para os próximos 160 anos e os recursos para os próximos 520 anos.

Segundo Nakicenov (1999), a percepção da abundância das fontes fósseis pode ser vista como uma ameaça e uma oportunidade. Uma ameaça, pois o crescimento no seu uso pode liderar um desastre ambiental global. Uma oportunidade sob o ponto de vista de o gás natural reduzir as emissões de CO₂, pois a quantidade de dióxido de carbono emitida após a combustão é significativamente menor em comparação com outras fontes fósseis de energia.

No Brasil, o petróleo representa 37,9% da demanda energética (MME, 2007) e é utilizado predominantemente nos transportes. A esse respeito, no início desta década foi observado que, apesar de o setor brasileiro de petróleo e gás ter alcançado melhorias substanciais no desenvolvimento de tecnologias de exploração, principalmente para o caso de águas profundas e ultra profundas, a produção interna não supriria totalmente a necessidade de consumo (CTPETRO, 2002; BAJAY e BADANHAN, 2002). Informações essas que em 2002 também foram confirmadas pelo MME quando foi considerado que a oferta de petróleo no mercado brasileiro se compõe da produção nacional e também da importação. Por outro lado, a produção

⁶ O óleo convencional é aquele cuja expectativa de exploração e de refino pode ser considerada nas condições tecnológicas atuais.

⁷ O óleo não-convencional requer avanços tecnológicos e novas condições tecno-econômicas para ser extraído e(ou) refinado.

⁸ O gás convencional é encontrado em estruturas sedimentares pressurizadas, em associação com o óleo ou sozinho.

⁹ O gás não-convencional é aquele que não pode ser explorado por técnicas convencionais.

interna aumentaria nas últimas duas décadas, ao passo que as importações decresceriam. Destaca-se que em 2006 a importação de petróleo teve uma queda de 4,7% e as exportações um crescimento de 34% (BEN, 2007). Entretanto, em 2007, mesmo com uma produção nacional elevada de 638.018.383 barris, e com uma exportação de 153.812.509 barris, ainda foi necessário importar 160.330.423 barris de petróleo (ANP, 2008). Nesse caso as importações acontecem devido à inadequação entre o perfil médio da produção em derivados de petróleo nas refinarias e a composição do consumo.

Para o gás natural, em 2007 a produção nacional atingiu 114.990.713 bep; e a importação do gás atingiu 65.461.692 bep (ANP, 2008). A participação do gás natural ainda é modesta em decorrência de diversos fatores, tais como a condição de subproduto na produção de petróleo, os baixos preços dos derivados líquidos concorrentes e a ausência de infra-estrutura para disponibilizar o combustível.

Observando a extensão das reservas e dos recursos para os combustíveis fósseis, conclui-se que estes não se esgotarão em breve. A esse respeito Jaccard (2005) observou que é possível usar os combustíveis fósseis de maneira limpa, reduzindo os impactos ambientais, alternativa que parece a mais viável em termos de continuidade para o atual regime energético, caracterizado por ser não-renovável e poluente. Entretanto, a simples minimização das emissões atuais poderá atrasar ainda mais a efetiva transição para um regime estritamente diferente, o qual teria na sua base as fontes renováveis de energia. Quanto à inserção dos renováveis na matriz energética global, Odell citou que essas alternativas aos combustíveis de carbono não excederão 25% do total de fornecimento de energia até o final de 2060 e até o final do século XXI as fontes renováveis alcançarão no máximo 40% do fornecimento.

O levantamento de informações realizado nesta seção demonstra que o regime energético vigente está fundamentado nos combustíveis fósseis. A construção histórica deste regime teve seu início a partir da utilização do carvão na máquina a vapor no século XVIII, posteriormente, mediante a evolução tecnológica, novas descobertas impulsionaram o desenvolvimento econômico sob o ponto de vista energético, mormente a eletricidade e o motor de combustão. Essas soluções pareceram adequadas na época em que surgiram, até mesmo porque os impactos ambientais não recebiam a mesma atenção de hoje, apesar de os níveis de poluição serem proporcionalmente muito mais elevados do que agora. Nesse sentido, acredita-se que, mediante a evolução tecnológica e eficiência energética, atualmente é possível gerar mais energia, com

menos recursos naturais e menores impactos ao meio ambiente. Mesmo assim, pelos motivos citados, o regime energético que começou a ser construído nos séculos XVIII e XIX e se consolidou no século XX se mostra inadequado aos olhos da problemática ambiental, sendo este, portanto, o foco desta Tese. Na próxima seção é empregado o termo descarbonização para inspirar o debate a respeito de quais seriam as possibilidades para um regime energético que reduzisse as emissões de CO₂ na atmosfera, melhorando assim a qualidade do ar e livrando a humanidade do espectro do aquecimento global.

1.2 A Descarbonização do Regime Energético Dominante

A descarbonização é um conceito que se fundamenta na inserção de novas fontes energéticas que se tornaram predominantes em diferentes períodos da história. Fontes essas que tiveram por característica uma quantidade decrescente de carbono em sua composição e, conseqüentemente, seguiram uma tendência de redução das emissões de CO₂ quando de sua queima. Foi o que aconteceu na passagem da madeira para o carvão mineral, depois do carvão para o petróleo e, mais recentemente, com a captura de parte do mercado do petróleo pelo gás natural. A questão atual é saber em que medida essa tendência terá continuidade e, no caso afirmativo, se esse processo acontecerá naturalmente ou se serão necessárias intervenções externas para forçar a mudança. Intervenções oriundas tanto de organizações privadas quanto de órgãos públicos, institutos de pesquisa, universidades, organizações internacionais e cidadãos.

De acordo com Nakicenovic (1999), a percepção sobre o futuro energético tem mudado dramaticamente durante as últimas décadas. Em aproximações mais sofisticadas o autor argumenta que pode envolver a emergência de novos paradigmas. Nakicenovic citou que a busca pela eficiência energética tem sido constante, para isso, os automóveis modernos estão consumindo menos combustível e gerando menos poluição. Do mesmo modo, as regulamentações também contribuem exigindo maior eficiência energética das indústrias. Esses tipos de ações foram denominadas “descarbonização energética”. Para esse autor, descarbonização significa diminuir os impactos ambientais por unidade de energia consumida, independente de qualquer atividade política especificamente designada para proteger o ambiente. Ocorre com a gradual substituição de fontes ricas em carbono por fontes de energia pobres em

carbono, ou melhor, a gradual substituição de fontes pobres em hidrogênio por fontes ricas em hidrogênio (NAKICENOVIC 1999; CALABI et al., 1983).

A respeito da história da descarbonização, os objetivos para a entrada de novas fontes energéticas não estiveram relacionados às preocupações com a qualidade do ar ou à emissão de poluentes. Até porque, nos primórdios da civilização, o esterco animal e a madeira poderiam ter sido considerados energias sustentáveis, pois tanto os animais como as florestas eram abundantes e a população relativamente pequena. Com o passar do tempo, a inovação tecnológica elevou a demanda por ferro e outras tecnologias industriais aumentaram o uso da madeira, levando ao desaparecimento das florestas e à elevação do seu preço. No mesmo período, a humanidade foi descobrindo as potencialidades do uso do carvão, e no final do século XIX começaram a ser construídas locomotivas e a ser produzida uma infra-estrutura mais eficiente usando este novo combustível (HEFNER III, 1995).

Dunn (2002) explicou que, até meados do século XIX, havia confiança na madeira como fonte de energia na maior parte do mundo. Mas na Inglaterra, onde a densidade populacional e o uso de energia cresceram rapidamente, a madeira começou a perder lugar para o carvão, uma fonte de energia abundante e mais concentrada.

É a partir da utilização do carvão que a teoria da descarbonização começa a ser aplicada (CALABI et al., 1983; HEFNER III, 1995; DUNN, 2002). Portanto, a tendência de descarbonização começou por volta de 1850 com a mudança na taxa média das emissões de dióxido de carbono por unidade de energia consumida. De acordo com Nakicenovic, a madeira é o combustível que tem a maior relação carbono/hidrogênio, cerca de 10 átomos de carbono para 1 átomo de hidrogênio. Entre os combustíveis fósseis, o carvão tem a mais alta taxa de carbono-hidrogênio, próximo de 1 para 1, o petróleo tem 1 átomo de carbono para 2 átomos de hidrogênio, e o gás natural tem 1 átomo de carbono para 4 átomos de hidrogênio, configurando-se assim uma dinâmica de descarbonização que acompanhou a inserção de novos energéticos.

O carvão ainda permaneceu como principal fonte energética mundial até o final do século XIX e início do século XX. Mas, por volta de 1900, as vantagens do sistema de energia baseado em líquidos ao invés de sólidos começam a emergir no sistema de transportes. Essa mudança criou problemas para o carvão, que é pesado e volumoso, e, ao mesmo tempo, gerou oportunidades para o petróleo, que é uma energia de alta densidade e que pode ser armazenada em tanques.

A possibilidade de utilização do petróleo levou à substituição dos combustíveis sólidos pelos líquidos. Mesmo durante a era do carvão, os cientistas estavam procurando novas soluções. Assim, um novo e melhor combustível foi desenvolvido e a tecnologia do petróleo começou a traçar o caminho da dominação econômica (CALABI et al., 1983).

Em 1983 Calabi et al. citaram que a adoção do motor de combustão foi favorecida pela oferta das fontes fósseis e representou um impulso para a produção de petróleo. Destaca-se a seguinte citação feita pelos autores:

“Voltado a princípio para a demanda industrial, surge em 1893, na Alemanha, o motor de combustão interna (...), mas as suas primeiras aplicações industriais, em 1900, ocorreram nos EUA e Rússia, países que eram então os maiores produtores mundiais de petróleo (CALABI et al., 1983, p. 19)”.

Mowery e ROSENBERG (2005) compartilham do mesmo ponto de vista que Calabi et al., afirmando que a adoção do motor de combustão interna nos Estados Unidos foi impulsionada pela abundância local de combustíveis à base de petróleo de baixo custo e pela demanda por transporte automotivo e aéreo de baixo custo.

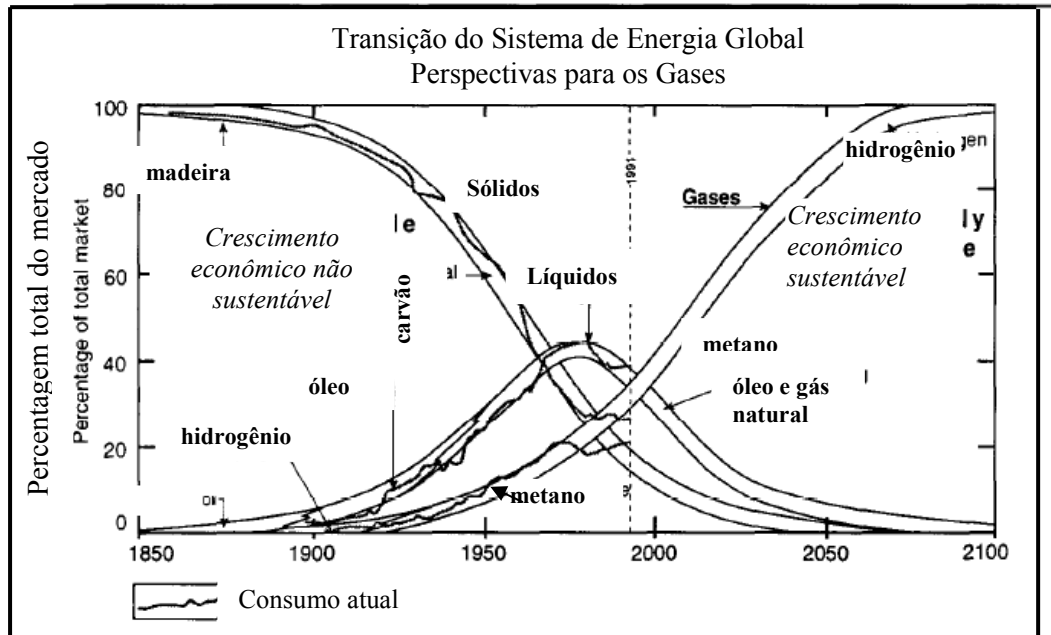
A partir da metade do século XX o petróleo tornou-se a fonte energética líder. Mas, no final do século XX, o estado da arte dos sistemas energéticos entrou em transição, passando da utilização do petróleo líquido para também utilizar o gás natural, iniciando a “*Age of Energy Gases*”, uma era que está começando com o gás natural como principal combustível, mas que poderá levar ao hidrogênio totalmente limpo (HEFNER III, 1995).

Assim como Hefner III (1995), Dunn (2002) ilustrou que a descarbonização fica mais evidente quando se observa a história da energia. Para o autor, desde meados do século XIX o mundo está lentamente migrando de uma forma de energia para outra, dos sólidos para os líquidos e, finalmente, para os gasosos, dentre esses o hidrogênio. Esse gás, especificamente, é uma das possibilidades para o futuro que está sendo observada e que apresenta dois motivos principais para a sua adoção. O primeiro é por possibilitar reduzir as emissões de carbono e o segundo, por reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.

As questões relacionadas à substituição energética, considerando fatores históricos e possibilidades de mudanças até o ano 2100, foram ilustradas por Hefner III (1995) na Figura 1.3. O autor mostrou a progressão fundamental dos combustíveis sólidos para os combustíveis líquidos em um período relativamente curto de transição. Além disso, o estudioso aponta que agora estaria em curso a substituição dos combustíveis líquidos pelos gasosos, uma transição que

começaria com o gás natural até que gradativamente se alcançaria o hidrogênio. No entanto, ressalta-se que o gás natural não substituirá o petróleo, mas é uma opção de fonte energética que terá o seu uso aumentando. Para o hidrogênio destaca-se que este não é uma fonte de energia como as citadas anteriormente, mas um vetor energético que será obtido de outras fontes.

FIGURA 1.3: Substituição energética mundial



FONTE: HEFNER III (1995), adaptada pela autora.

A figura 1.3 evidencia que desde o século XIX, até as perspectivas para o final do século XXI, a população mundial teve significativa elevação nos padrões econômicos e melhoria na qualidade de vida. Com o tempo, o uso de energia pela civilização se tornou cada vez mais essencial, pois a energia representa todas as atividades econômicas. A figura mostra, para a década atual e para todo o século XXI, a diminuição no uso dos combustíveis líquidos concomitantemente ao aumento na adoção dos combustíveis gasosos, os quais poderão atender à demanda energética e também contribuir para que o crescimento econômico se torne mais sustentável.

Um dos problemas observados é que o crescimento contínuo do consumo energético pode limitar o desenvolvimento econômico devido à escassez de energia, bem como limitar a qualidade de vida da população mundial em função dos níveis insustentáveis das emissões. (HEFNER III, 1995). Esses limites foram chamados por Hefner III de Limites “Econergénics”. A origem dos limites está no crescimento populacional e nas constantes inovações tecnológicas

disponíveis para a sociedade, que demandam cada vez mais energia para os mais variados fins, tais como transporte, comunicação, iluminação, segurança e outros. Assim, embora as tecnologias alcancem níveis de eficiência cada vez maiores, o aumento na quantidade utilizada gera sérios impactos ambientais derivados das emissões. Hefner III concluiu que todos esses problemas “*econergemics*” relacionados ao petróleo contribuíram para a introdução de novas fontes que culminaram no presente com a transição energética para o gás natural, considerado por ele uma fonte mais limpa, quimicamente simples, mais eficiente e mais abundante.

De acordo com Dunn (2002), a maior parte do crescimento no consumo de energia é previsto para o setor de transportes. Neste contexto, acrescenta-se que o contínuo crescimento no uso do carvão e do petróleo poderá exacerbar os problemas de poluição no ar das grandes cidades industrializadas. O autor citou que o uso dos combustíveis fósseis pode aumentar a emissão anual de carbono no mundo de 6,1 para 9,8 bilhões de toneladas até 2020, acelerando as mudanças climáticas e os impactos associados à elevação do nível do mar, eventos climáticos extremos, redução da produtividade na agricultura e disponibilidade de água, bem como a perda de biodiversidade.

Com a adoção gradativa do gás natural e também das fontes renováveis de energia, grande parte dos problemas decorrentes das emissões de CO₂ poderá ser minimizada. Fato que não depende somente da inserção de novas fontes energéticas, mas, principalmente, dos incrementos tecnológicos que têm aumentado a eficiência energética. Outro ponto a ser destacado é que as escolhas energéticas feitas até o momento, ou seja, a madeira, o carvão, depois o petróleo e por último o gás, foram motivadas por condições políticas e econômicas, tais como a disponibilidade das fontes e vantagens relativas a custos. O meio ambiente não representou uma variável importante nas escolhas energéticas históricas. Mas, para o século XXI, essas escolhas tendem a incorporar o meio ambiente como variável fundamental ao optar por determinada fonte energética, visto que as preocupações com as mudanças climáticas e os altos níveis de poluição transcendem o ambiente científico ou dos ambientalistas radicais.

Considerando as questões citadas até o momento a respeito das possibilidades de um novo regime energético, tem-se na descarbonização o conceito delineador das próximas explanações deste estudo, fundamentado essencialmente na necessidade de minimizar as emissões de CO₂, contribuindo assim para frear o aquecimento global (REDDY, 2000). Para tanto, considera-se a descarbonização do sistema energético um processo histórico e contínuo.

Nesse aspecto nenhum dos autores citados definiu uma última forma de energia como a mais adequada para a humanidade. Sendo assim, a descarbonização é o alicerce e a justificativa para as transições que virão a seguir.

Uma das alternativas para estes problemas complexos derivados da utilização dos combustíveis fósseis que será discutida nesta Tese é o hidrogênio como vetor energético e a célula a combustível como sistema de conversão para substituir o motor de combustão interna, questões abordadas na próxima seção. De acordo com Dunn (2002), a fim de promover um seguro e abundante fornecimento doméstico de combustível, a utilização do hidrogênio como vetor energético poderá reduzir significativamente a utilização de petróleo, levando à independência energética e à segurança que muitas nações desejam.

1.3 A Economia do Hidrogênio: o hidrogênio como vetor energético e a célula como sistema de conversão

Os elevados índices de poluição decorrentes do uso das fontes fósseis têm sido uma das maiores preocupações da sociedade moderna em relação à sustentabilidade ambiental. Por conseguinte, são estudadas diversas opções relativas às fontes energéticas, bem como tecnologias que levem à maior eficiência dos sistemas energéticos.

Acredita-se que, no futuro, o hidrogênio obtido de fontes renováveis e o seu uso nas células a combustível poderão contribuir para resolver grande parte dos problemas das emissões derivadas das fontes fósseis, sendo esta a principal justificativa para sua adoção.

Entretanto, devido à ampla disponibilidade dos combustíveis fósseis, estes provavelmente serão a principal fonte para a produção do hidrogênio nas próximas décadas, de modo que ainda estão sendo realizadas pesquisas para identificar os ganhos em torno da minimização dos poluentes ao substituir o uso direto das fontes fósseis por sua transformação em hidrogênio.

Colaboram para essa possibilidade a crescente preocupação internacional com o crescimento das emissões de poluentes e a concordância de muitas nações a respeito da necessidade de mudança.

As informações relatadas a seguir auxiliarão na investigação quanto às perspectivas para inserir o uso do hidrogênio e da célula a combustível, internacionalmente e também no regime energético brasileiro. No transcorrer do texto são descritos os tipos de células a combustível e suas bases de funcionamento. Considerando que a tecnologia das células a combustível é antiga,

são relatadas experiências históricas pioneiras, e, para caracterizar o estágio atual de desenvolvimento tecnológico, são apresentadas aplicações industriais em andamento. Ainda como aspecto relevante para a Economia de Hidrogênio está a infra-estrutura para o abastecimento das células com o hidrogênio, podendo ser centralizada ou distribuída.

1.3.1 Conceituando a Economia do Hidrogênio

Economia do Hidrogênio é o termo empregado para caracterizar o regime energético que estaria fundamentado no hidrogênio e na célula a combustível.¹⁰

O termo Economia do Hidrogênio é proveniente dos Estados Unidos, mais especificamente cunhado pela General Motors, na década de 1970, quando aumentou o interesse científico sobre a utilização do hidrogênio como vetor energético. É uma expressão que se refere a um sistema de energia baseado no hidrogênio, para armazenamento, distribuição e uso de energia. Desde essa época, a Economia do Hidrogênio é citada como uma opção de mudança em relação ao regime energético dominante (PROCAC, 2002).

Sob o ponto de vista do meio ambiente, reflete um arranjo específico para o setor energético, compreendido como uma alternativa em potencial para ajudar na redução das emissões de CO₂. Outras justificativas tratam da provável contribuição para solucionar os problemas de segurança energética, que têm como uma de suas principais consequências os conflitos geopolíticos de interesse internacional entre as nações fornecedoras e consumidoras do petróleo. Ademais, segundo muitos especialistas, as possibilidades de esgotamento dos combustíveis fósseis também são argumentos para a entrada na Economia do Hidrogênio. (VERIZOGLU, 1987; DANTE, 2002; CHERRY, 2004; IEA, 2004; THOMAS, JAMES, LOMAX, 1998).

Operacionalmente a Economia do Hidrogênio abrange a geração do hidrogênio a partir de fontes renováveis e não-renováveis e a sua utilização por meio da tecnologia das células a combustível. Tendo em vista a potencial utilidade do hidrogênio como vetor energético, faz-se necessário esclarecer o que este elemento químico representa. O hidrogênio é um elemento

¹⁰ A origem desse interesse remonta à crise do petróleo no início dos anos 1970, quando o preço do óleo cru subiu acentuadamente, aumentando a preocupação com a garantia das reservas de petróleo e a potencial falta de uma fonte de energia segura, fazendo com que, na América do Norte e em outros países da Europa, governo e indústria, em conjunto, desenvolvessem planos e estratégias de implementação para a introdução do hidrogênio em um sistema de energia mundial (PROCAC, 2002, p. 7).

amplamente disponível na natureza, mas sempre associado a outros elementos químicos, ou seja, é um vetor energético que precisa ser obtido de outras fontes. Quanto às suas aplicações, o hidrogênio já é utilizado como matéria-prima química na fabricação de produtos como fertilizantes derivados de amônia, na hidrogenação de óleos orgânicos comestíveis feitos de sementes de soja, peixes, amendoim e milho. Também é usado para converter óleo líquido em margarina, no processo de fabricação de polipropileno, bem como para resfriar geradores e motores (RIFKIN, 2003).

Para a geração de energia destaca-se a seguinte citação feita pelo MME 2005, p.7:

“O hidrogênio assim produzido contém grande parte da energia química, térmica e(ou) elétrica empregada em sua geração, a qual poderá ser recuperada quase em sua totalidade por meio de processos adequados. Uma vez que este hidrogênio pode ser armazenado, transportado e reconvertido em energia, este gás caracteriza-se por ser um transportador de energia, sendo, portanto, denominado vetor”.

Para muitos especialistas do setor energético o hidrogênio poderá ser a solução para o setor de transportes. Dessa forma, presume-se que as vantagens no uso do hidrogênio estão, sobretudo, na possibilidade de ser um combustível limpo e de poder ser convertido em outras formas de energia mais facilmente que outros combustíveis, além de ser extraído de diversas fontes, renováveis ou não. Em se tratando das fontes renováveis, são consideradas a biomassa, a radiação solar, a energia eólica e a energia térmica dos oceanos. Essas fontes renováveis possibilitarão a obtenção do hidrogênio a partir da eletrólise da água, tecnologia que separa o hidrogênio do oxigênio. Além disso, o hidrogênio também pode armazenar a energia excedente produzida nas hidrelétricas para posterior consumo (BACON, 1985; DINGA, 1989; VERIZOGLU, 1987; NICOLLETI, 1995; THOMAS, JAMES, LOMAX, 1998; GOLTSOV e VEZIROGLU, 2001; DANTE, 2002; CHERRY, 2004; IEA, 2004; LARSEN, FEIDENHANS'I e PETERSEN, 2004).

Apesar das vantagens para o meio ambiente ao produzir o hidrogênio a partir das fontes renováveis, atualmente a maior parte do hidrogênio é produzida desde fontes de energia convencionais e poluentes, tais como: o gás de carvão gaseificado (90 bilhões de m³); o gás natural (240 bilhões de m³); e a reforma de petróleo (150 bilhões de m³) (BICELLI, 1986; LARSEN, FEIDENHANS'I e PETERSEN, 2004; RIFKIN, 2003). Ademais, para alguns pesquisadores as fontes não-renováveis são consideradas uma solução intermediária até a efetiva

inserção dos renováveis, sendo que a mais utilizada tem sido o gás natural (VERIZOGLU, 1987; THOMAS, JAMES, LOMAX, 1998; DANTE, 2002; CHERRY, 2004; IEA, 2004).

De acordo com a IEA (2004), o caminho dominante e mais barato para a produção do hidrogênio é através do gás natural, em um processo chamado de “reforma a vapor”. Todavia, esse processo gera CO₂ e não promove a descarbonização, exceto se o CO₂ for capturado e seqüestrado. Seguindo essa tendência, a economia baseada no hidrogênio como vetor energético, obtido das fontes renováveis, representaria o fim da era do carbono como fonte de energia (SILVA et al., 2003).

Quanto às perspectivas para o hidrogênio, já na década de 1980, em um estudo realizado pela Agência Internacional de Energia, foi investigada a demanda do hidrogênio até aproximadamente o ano 2020. Na época foram identificadas três principais demandas para o setor (DONITZ, 1984, p.817). A primeira possibilidade é a demanda não-energética, na qual se mantém o mercado clássico de hidrogênio, como matéria-prima para a indústria química e metalúrgica. A segunda possibilidade é o hidrogênio como energia indireta, isto é, o uso do hidrogênio para refinar hidrocarbonetos, ou para conversão do carvão em combustíveis sintéticos. A terceira possibilidade foi denominada energia direta, quando ocorre o uso direto do hidrogênio como uma energia e combustível.

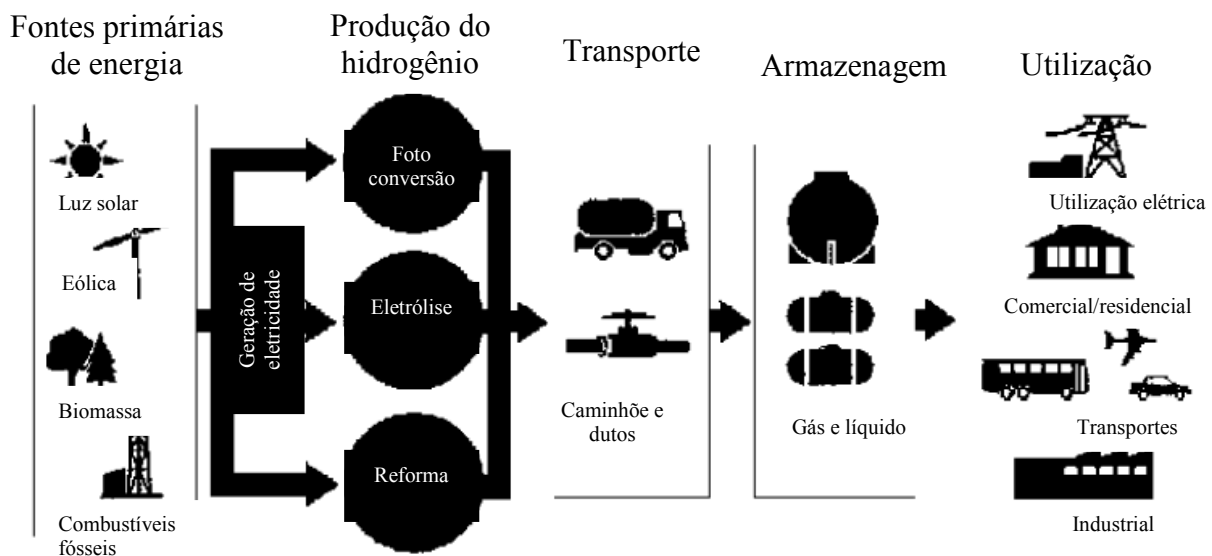
A Economia do Hidrogênio fundamenta-se na terceira possibilidade citada por Donitz, ou seja, o uso do hidrogênio como energia direta, o que é percebido como um novo regime energético. Um novo regime que poderá abranger mudanças complexas no sistema energético vigente e que se justifica devido aos diversos problemas decorrentes da utilização dos combustíveis fósseis, principalmente os impactos derivados das emissões de CO₂ provenientes dos sistemas de transportes, como também da geração estacionária de energia e de calor.

A mudança de regime citada envolveria ainda alterações na estrutura da sociedade, na qual seriam necessárias regulamentações, códigos e padrões específicos. Além da diversidade de fontes para a produção do hidrogênio e a dificuldade para disponibilizar essas fontes, outro ponto que caracteriza a Economia do Hidrogênio como um novo regime é a fraca compatibilidade com o regime energético das fontes fósseis, necessitando de amplas mudanças na infra-estrutura da indústria, nos atuais sistemas de transporte, armazenagem e utilização.

Em se tratando da cadeia produtiva para a Economia do Hidrogênio, esta pode ser dividida em três etapas: a produção, a entrega e o uso (figura 1.4). A produção inicia-se com o

uso de um recurso energético primário, renovável ou não-renovável, capaz de produzir o hidrogênio. Após a escolha de uma fonte para o hidrogênio, o processo de produção pode acontecer por meio de três processos: foto-conversão; eletrólise; e por um reformador para os combustíveis fósseis. Na entrega estão os meios de transporte, atualmente caminhões ou dutos, e os sistemas de armazenagem do hidrogênio, gás ou líquido. Quanto às principais utilizações tem-se a geração de eletricidade, a energização residencial e comercial, os transportes e as aplicações industriais (ESCHER, 1983; DUNN, 2002).

FIGURA 1.4: Um sistema de energia para o hidrogênio

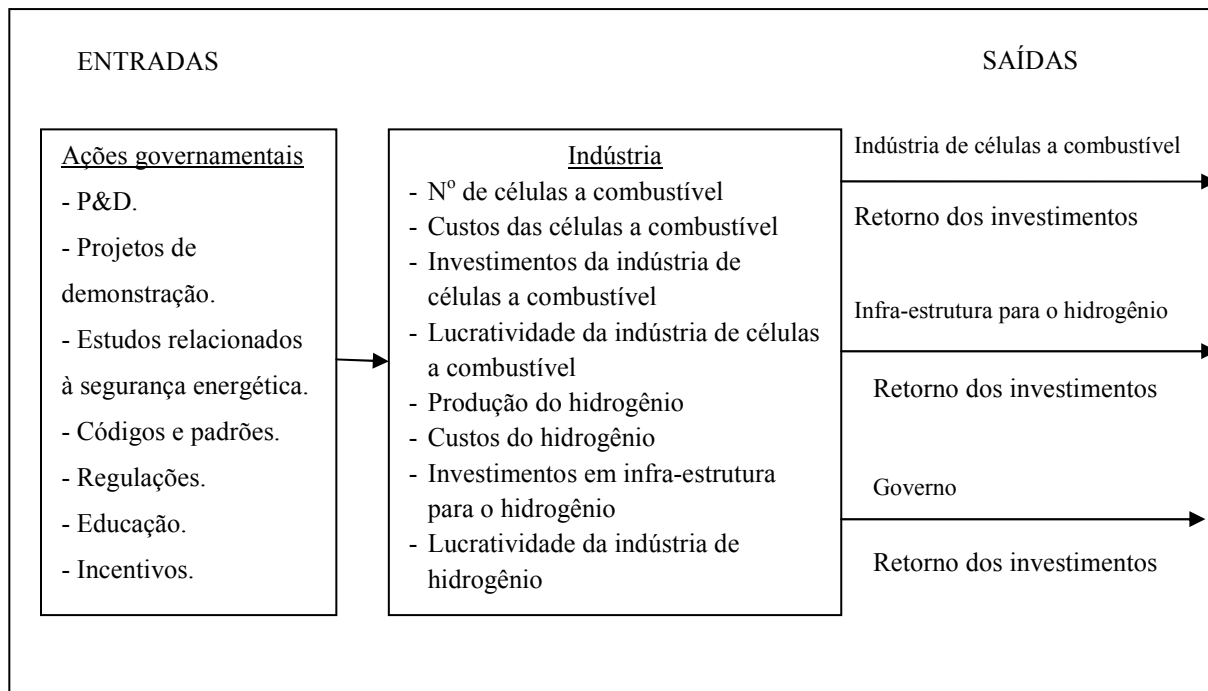


FONTE: Dunn (2002) adaptada pela autora.

Complementando a cadeia produtiva, na figura 1.5 são apresentadas as inter-relações entre as diversas variáveis que compõem um sistema de energia fundamentado no hidrogênio. Inicia-se pelo suporte governamental necessário para as atividades de P&D, bem como o apoio aos projetos de demonstração. Ainda competem ao governo os estudos relativos à segurança energética, ao estabelecimento de códigos e padrões e às regulações. As diretrizes para a educação e incentivos para as pesquisas concluem as iniciativas governamentais. Observa-se na figura 1.5, que os investimentos realizados pelas indústrias são muitas vezes dependentes das

ações públicas, que acabam incentivando pesquisas nas áreas de maior interesse para o governo. Logo, os incentivos governamentais podem estimular os investimentos da indústria, tanto para o hidrogênio quanto para a célula a combustível. Nesse sistema, o governo e a indústria podem ser beneficiados e obter o retorno dos seus investimentos, o que pode ocorrer mediante o progresso tecnológico e ganhos financeiros.

FIGURA 1.5: Sistema de Energia para o Hidrogênio e para a Célula a Combustível



FONTE: Thomas, James, Lomax (1998), adaptado pela autora.

É possível concluir que a Economia do Hidrogênio é um conceito que se refere ao hidrogênio como energia ecológica e limpa. Uma promessa de sistema energético que começou a tornar-se popular na década de 1970 em resposta à consciência da comunidade científica para impedir desastres ambientais. A principal vantagem apresentada é o fato de o hidrogênio puro ajudar a resolver os problemas do efeito estufa.

Destaca-se que alguns eventos apontam para a evolução da Economia do Hidrogênio, aqui se podendo citar que empresas já começaram a comercializar as tecnologias do hidrogênio e das células a combustível; bem como se intensificaram as pesquisas para automóveis movidos a hidrogênio, equipamentos portáteis, aperfeiçoamento de eletrolisadores e baterias de hidrogênio. Ademais, certas indústrias já mostram que podem optar pelo hidrogênio para substituir o gás

natural. Aponta-se ainda o fato de as pesquisas na área estarem promovendo a formação de uma comunidade científica estável que estuda as possibilidades da Economia do Hidrogênio para os anos 2020, 2050 e até o ano 2100 (GOLTSOV e VEZIROGLU, 2001; LARSEN, FEIDENHANS'I e PETERSEN, 2004).

Há ainda alguns autores que estão trabalhando com outro conceito que se encontraria um passo à frente da Economia do Hidrogênio, a Civilização do Hidrogênio (HyCi). Do ponto de vista ambiental-industrial, a HyCi é uma evolução que seguiria a seguinte sequência: 1) Energia do Hidrogênio; 2) Economia do Hidrogênio e 3) Civilização do Hidrogênio. No século XXI, de acordo com a concepção da HyCi, a humanidade aceitará um novo paradigma de qualidade de vida que será refletida no compromisso de ter o meio ambiente à disposição e utilizá-lo de maneira correta (GOLTSOV, VEZIROGLU e GOLTSOVA, 2006).

Por fim, há muita polêmica em torno da Economia do Hidrogênio, principalmente em relação às questões acadêmicas, políticas, econômicas e estruturais que podem ir de encontro a essa proposta. É ressaltada a necessidade de grandes avanços em P&D, bem como o seu uso não estar amplamente justificado como alternativa para as fontes fósseis, principalmente porque em muitos países a geração do hidrogênio está sendo desenvolvida a partir dessas fontes. Soma-se o fato de o setor ainda não estar regulamentado, bem como o custo elevado da mudança e a necessidade de grandes modificações na atual infra-estrutura para tornar possível a armazenagem, o transporte e a distribuição do hidrogênio.

No que diz respeito à infra-estrutura, para que no futuro o hidrogênio possa vir a ser empregado como vetor energético e, assim, abastecer as células a combustível, a infra-estrutura para a produção, a armazenagem e a distribuição do hidrogênio transita por duas possibilidades, ou seja, a distribuída (descentralizada) e a centralizada (IEA, 2004). Nesse sentido, para alguns pesquisadores da área energética será possível aproveitar parte das infra-estruturas existentes para a eletricidade, para o gás e para a água, tanto para a geração centralizada quanto para a geração distribuída do hidrogênio (BUCHNER, 1983).

A infra-estrutura distribuída (descentralizada) se caracteriza pela produção do hidrogênio em pequena escala, baseada na eletrólise ou reforma a vapor. Já a infra-estrutura centralizada se caracteriza pela produção do hidrogênio em larga escala, incluindo dutos e(ou) transporte rodoviário.

Como aspecto positivo para a infra-estrutura distribuída, especialistas concordam que os combustíveis ricos em hidrogênio poderão ser economicamente reformados no local de uso. O aspecto negativo está nas maiores dificuldades para capturar e armazenar CO₂, mas, apesar disso, a produção distribuída é considerada a melhor escolha para produzir o hidrogênio na fase de introdução no mercado (IEA, 2004; IEA, 2005).

Como fontes em potencial para o hidrogênio na produção distribuída são citados o metanol e o gás natural, ambos pelo processo de reforma. As tecnologias essenciais serão os eletrolisadores localizados no ponto de uso, geradores baseados em biomassa, energia solar concentrada, sistemas fotovoltaicos, células a combustível, turbinas eólicas, postos de reabastecimentos e locais para geração de energia estacionária (EKDUNGE e RABERG 1998, IEA, 2004; EG&G Technical Services, 2002).

O mercado potencial da geração distribuída é formado por consumidores dependentes da confiabilidade da energia, tais como hospitais e plantas industriais. Nesses casos, uma oportunidade pode ser a cogeração, na qual a energia térmica é gerada enquanto o combustível é convertido em eletricidade. Para usuários isolados, o propósito é fornecer aplicações remotas e unidades móveis para fornecer eletricidade quando necessário (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002).

Acrescenta-se que o sistema de geração distribuída oferece benefícios em vários níveis, tanto para os consumidores quanto para os fornecedores. Para o consumidor, os benefícios incluem energia de alta qualidade, confiabilidade e flexibilidade. Para os fornecedores, os benefícios incluem realizar investimentos em transmissão e distribuição somente nos lugares onde é mais necessário e abrindo novos mercados em áreas remotas. (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002).

A geração distribuída foi citada pela IEA (2004) como uma das mais viáveis e que necessita de menos capital para o investimento em pequenos volumes de hidrogênio. Assim, enquanto a produção centralizada traz benefícios para a economia de escala, a distribuída reduz os custos de entrega do hidrogênio. Em longo prazo, a produção centralizada terá vantagens de custos, mas a distribuída ainda terá um papel importante, principalmente em relação à flexibilidade (IEA, 2004).

Apesar das vantagens observadas para a geração distribuída, a infra-estrutura atual para o hidrogênio é centralizada. No entanto, está limitada a mercados industriais, como as indústrias

químicas. Logo, para atender o setor energético seriam necessárias adaptações para entregar o hidrogênio (BUCHNER, 1983). Nesse caso, como aspecto negativo, devido à baixa densidade do gás e à natureza altamente permeável do hidrogênio, os dutos para hidrogênio acabam sendo duas vezes mais caros e requerem cinco vezes mais energia para sua operacionalização, se comparado com os dutos para o gás natural. (IEA, 2004; IEA, 2005).

A IEA (2004) apontou áreas-chave de P&D para melhorar a infra-estrutura de produção, transporte e distribuição centralizada do hidrogênio, tais como: dutos de hidrogênio baseados na tecnologia de dutos para o gás natural; sistemas para armazenagem do hidrogênio e grandes terminais de despacho; e postos de combustível e tecnologias de suporte.

Conclui-se que a produção distribuída do hidrogênio energético é a alternativa mais adequada para a implantação da tecnologia, pois os custos de entrega são reduzidos quando o hidrogênio é produzido no local de uso. Já a produção centralizada poderá ser implementada no futuro, quando a Economia do Hidrogênio sair da etapa embrionária e estiver em crescimento. Entretanto, para as duas possibilidades há obstáculos a serem transpostos, desde questões técnicas até questões políticas, econômicas, ambientais e sociais. Destaca-se que muitas das tecnologias propostas ainda não entraram no mercado, para isso precisam melhorar seu desempenho e preço (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002).

Enfim é possível constatar que a Economia do Hidrogênio está fundamentada no conceito de descarbonização. Ademais, é um termo que vem se desenvolvendo de acordo com as perspectivas tecnológicas, regulatórias e econômicas para a sua aplicação, principalmente quando estudada a possibilidade de sua geração a partir de fontes renováveis, tais como a energia solar, a energia eólica e a biomassa. Entretanto, no início, a geração do hidrogênio será a partir dos combustíveis fósseis, entendido como um período de transição até que as fontes renováveis se estabeleçam. A infra-estrutura para a Economia do Hidrogênio inicialmente será distribuída, mas no futuro a infra-estrutura centralizada poderá trazer ganhos de escala para os produtores e consumidores de energia. Sendo assim, o propósito da disponibilização do hidrogênio está na possibilidade do seu uso final para o transporte e para a geração estacionária de energia. Para tanto, será necessário o desenvolvimento das células a combustível, isto é, o sistema de conversão que será empregado para prover energia a partir do hidrogênio como vetor energético. Portanto, para a efetivação da Economia do Hidrogênio será necessário investir também nas tecnologias

para o uso do combustível, ou seja, as células a combustível. O próximo item desta seção descreve as principais tecnologias das células a combustível.

1.3.2 Conceito e tipos de célula a combustível

A Economia do Hidrogênio se organiza em torno de duas tecnologias, a do hidrogênio e a da célula a combustível. As informações a seguir tratam das tecnologias existentes para as células a combustível, tecnologias que estão sendo desenvolvidas para receber o hidrogênio e transformá-lo em energia disponível para o consumo.

A célula a combustível tem sido percebida como a trajetória do futuro. Nesse aspecto, apesar de ser uma invenção antiga, antecedendo o motor de combustão, não representou interesse comercial até os anos 60, quando a NASA passou a usá-la para prover energia elétrica para as espaçonaves. Atualmente, considera-se que as células começam a alcançar a comercialização mediante o nicho de reserva energética. Nesse sentido, mesmo o tema estando cada vez mais presente nos debates que tratam da configuração energética para o futuro, não são apenas as estruturas da indústria, da economia e da política que precisam contribuir para o seu desenvolvimento. A célula ainda precisa avançar em pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

A seguir são apresentados um breve histórico sobre a trajetória do desenvolvimento das células a combustível e os principais aspectos relativos ao seu funcionamento. Ainda nesta seção cada modelo da célula é abordado, destacando-se as aplicações, o status do desenvolvimento tecnológico e as características de operação. Quanto ao histórico, serão destacadas as principais conquistas da comunidade científica desde o século XIX, época na qual foram evidenciados os primeiros registros de pesquisas, até os dias atuais.

1.3.2.1 Histórico sobre as células a combustível

As células a combustível são estudadas pela ciência há mais de 150 anos. Foram consideradas uma curiosidade no início do século XIX e se tornaram foco de pesquisa e desenvolvimento no século XX. Como um dos primeiros marcos, consta que em 1800 os cientistas britânicos William Nicholson e Anthony Carlisle descreveram o processo de utilização da eletricidade a partir da decomposição da água em hidrogênio e oxigênio. Pouco tempo depois, em 1838, William Robert Grove (1811-1896) tornou-se conhecido pelo desenvolvimento de uma

bateria, originando o primeiro registro de ácido sulfúrico utilizado como eletrólito. Em 1842 ele criou a bateria a gás empregando ácido sulfúrico, a primeira célula a combustível. (COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006).

De acordo com Cameron (1990), Grove diluiu ácido sulfúrico entre eletrodos e descobriu que este processo era reversível. O hidrogênio e o oxigênio recombinados formaram água e geraram corrente elétrica. Grove mencionou isso com entusiasmo em muitos artigos e também construiu células com propósitos experimentais.

No final do século XIX, por volta de 1880, *designs* para baterias a gás surgiram dos laboratórios na Europa e nos EUA. Naquela época muitos pesquisadores começaram a considerar a possibilidade de converter carvão e gás diretamente em eletricidade. Nos cem anos seguintes, cientistas tentaram construir células a combustível maiores e mais práticas, a exemplo do apresentado no quadro 1.1 (CAMERON, 1990; COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006):

QUADRO 1.1: Experimentos com o hidrogênio e com a célula a combustível

Cientistas	Experimentos
Christian Schönbein (1799 -1868) e Johann Poggendorff (1796 -1877)	Ocuparam-se em esclarecer como era exatamente o material que Grove trabalhava.
Friedrich Wilhelm Ostwald (1853 -1932)	Um dos fundadores da físico-química, contribuiu para o entendimento teórico a respeito do funcionamento da célula a combustível. Em 1893 determinou as regras de interconexão de vários componentes da célula a combustível: eletrodos, eletrólito, agentes oxidantes e redutores, ânodos e cátodos. Em um de seus trabalhos pioneiros desvendou as propriedades físicas e reações químicas envolvidas na baterias a gás de Grove.
Ludwig Mond (1839-1909)	Gastou grande parte de sua carreira desenvolvendo tecnologia química industrial para a manufatura do níquel refinado. Em 1889, junto com seu assistente Carl Langer, descreveu seus experimentos com a célula a combustível utilizando derivados do carvão. Eles encontraram dificuldades em utilizar eletrólitos líquidos, mas obtiveram êxito utilizando eletrólito em estado quase-sólido.
Charles R. Alder Wright (1844–1894) e C. Thompson	Concluíram que a produção econômica de correntes de energia para propósitos comerciais pela oxidação direta de gases combustíveis não seria um problema resolvido com rapidez.
Louis Paul Cailletet (1832-1913) e Louis Joseph Colardeau	Tentando melhorar a célula de Grove notaram que “somente metais preciosos” poderiam ser utilizados, o que tornaria o processo impraticável.
William W. Jacques (1855 -1932)	Construiu uma bateria a carvão, de modo que o ar passava a ser injetado dentro de um eletrólito alcalino para reagir com um eletrodo de carbono. Contudo, ao invés de uma ação eletroquímica com uma eficiência de 82%, ele obteve uma ação termoelétrica com uma eficiência de cerca de 8%.
Francis Thomas Bacon (1904 -1992)	Começou a pesquisar o eletrólito alcalino no final da década de 1930. Em 1939 construiu uma célula que utilizava eletrodos de níquel. Após a Segunda Guerra, Bacon foi para Cambridge e nos 20 anos seguintes seu progresso com as células alcalinas resultou em demonstrações em larga escala. Embora com custos elevados, as células de Bacon provaram ser confiáveis o suficiente para atrair a atenção da Pratt & Whitney. A companhia autorizou Bacon a desenvolver uma célula a combustível para a Nave Espacial APOLLO.
Emil Baur e H. Preis	Nos anos 1930, experimentaram eletrólitos de óxido sólido em altas temperaturas. Eles encontraram problemas com a condutividade elétrica e reações químicas inesperadas entre os eletrólitos e vários gases (incluindo monóxido de carbono).
U.S. Army's Mobility Equipment Research and Development Center (MERDC)	Em meados da década de 1960 testaram várias células de carbonato fundido fabricadas pela Texas Instruments, variando em tamanho de 100 até 1000 Watts. Utilizaram pela primeira vez um reformador para extrair o hidrogênio da gasolina.
Los Alamos National Laboratory	Nos anos 1970 desenvolveram um carro de golfe energizado com uma célula a combustível de ácido fosfórico.

FONTE: Cameron, 1990; Collecting the history of fuel cells, 2006, adaptado pela autora.

Desde a década de 1970 os maiores investimentos nas células a combustível têm sido provenientes do setor automotivo. Um dos propósitos é alcançar o uso comercial dos veículos a hidrogênio em uma rede consistindo de larga capacidade de armazenagem e com a distribuição do combustível sendo feita por um sistema similar ao atual. Por conseguinte, desde aquela época, os autores acreditavam que o uso do hidrogênio em veículos dependeria da natureza do conversor

de energia instalado e das facilidades de armazenagem, e já recomendavam como conversor a célula a combustível, substituindo o motor de combustão (BREELLE et al., 1979).

Outros autores acrescentaram que os avanços no desenvolvimento das células a combustível têm sido mais rigorosamente documentados a partir da década de 1980. Desse modo, a maior influência para este desenvolvimento foi a necessidade de carros, caminhões e ônibus eficientes, que possam operar com combustíveis alternativos e renováveis (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002).

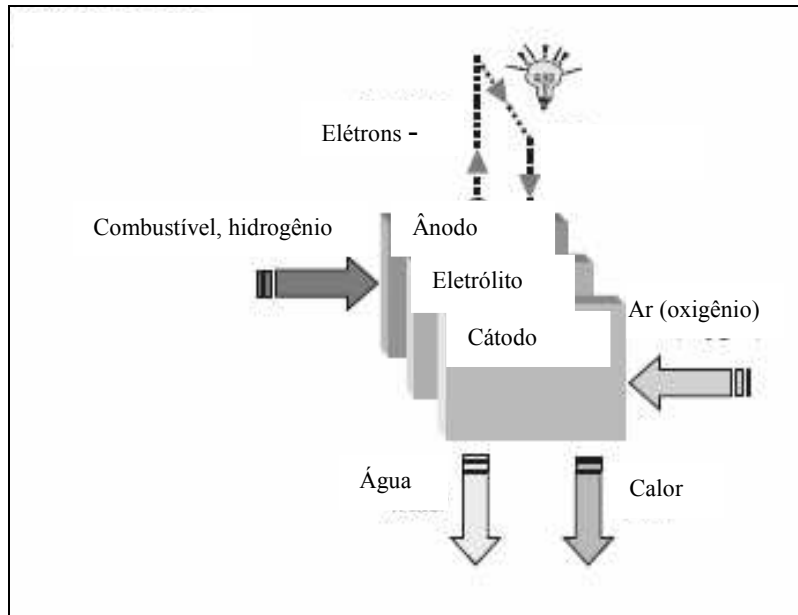
Nos últimos 20 anos as pesquisas em torno da célula a combustível estão cada vez mais estabelecidas e passaram a ser delimitadas de acordo com o interesse de uso, estacionário ou veicular. Existem alguns modelos diferentes de células que variam de acordo com a sua aplicação, combustível e eletrólito empregado. Essas diferentes células são tratadas a seguir.

1.3.2.2 Tipos de células a combustível

As células são como baterias, entretanto, não armazenam energia química. Convertem a energia química em eletricidade a partir de um combustível com o qual são abastecidas, ou seja, fundamentam-se em um processo eletroquímico. As células necessitam de um combustível externo, o hidrogênio, e um oxidante, o oxigênio. O hidrogênio gasoso tem sido o combustível escolhido para muitas aplicações devido à sua alta reação quando catalisadores convenientes são utilizados. O oxidante mais comum é o oxigênio obtido do ar nas aplicações terrestres e facilmente armazenável em ambientes fechados. Como principais características da célula a combustível podem ser destacadas as seguintes: modularidade, pouco ruído e quase nenhuma emissão. (BREELLE et al., 1979; LARSEN, FEIDENHANS'I e PETERSEN, 2004; IEA, 2004; EG&G Technical Services, 2002).

A célula a combustível é basicamente formada por dois eletrodos, um suprido com oxigênio e outro com hidrogênio. Estes eletrodos são separados por um eletrólito que pode ser sólido ou líquido, ácido ou básico (BREELLE et al., 1979). Os eletrodos que formam a célula são negativo (ânodo) e positivo (cátodo), estes formam uma disposição semelhante a um sanduíche em torno do eletrólito. Os átomos de hidrogênio são ionizados e carregam uma carga elétrica positiva. A carga negativa de elétrons gera a corrente. O funcionamento da célula a combustível está ilustrado na figura 1.6. (COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006; IEA, 2004).

FIGURA 1.6: O conceito de Célula a Combustível



FONTE: IEA (2004), adaptada pela autora.

A maioria das aplicações para as células a combustível está na geração estacionária de energia elétrica, incluindo unidades de cogeração¹¹ e na geração de eletricidade para veículos. Nos veículos, opera como um gerador associado a um motor elétrico. No setor de transportes as células competirão com outros veículos alternativos, incluindo o gás natural e outros veículos híbridos elétricos, todas alternativas que se propõem a reduzir as emissões, bem como as importações de petróleo (THOMAS, JAMES, LOMAX, 1998; EG&G Technical Services, 2002; IEA, 2004).

Na geração estacionária, o propósito da célula é produzir uma corrente elétrica que possa ser imediatamente utilizada para energizar motores elétricos, acender uma lâmpada ou iluminar uma cidade. A reação química produzida por esta corrente é o conceito central da célula a combustível (COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006).

Na atualidade a célula tem sido estudada por muitos institutos de pesquisas, universidades e empresas privadas como uma das melhores alternativas para substituir o motor de combustão. Todavia, na célula não ocorre a combustão, pois há uma conversão direta da energia. Além disso, é mais silenciosa e tem flexibilidade com relação aos combustíveis a serem utilizados. As células

¹¹ Utiliza o calor excedente na geração de vapor para diversos fins, tais como aquecimento, processamento industrial e turbinas a vapor para gerar mais eletricidade (Collecting the History of fuel cells, 2006)

de baixa temperatura são mais confiáveis e resistentes. Apesar das vantagens, os custos de entrada muito elevados dificultam a inserção dessa tecnologia no mercado. Outro problema é a falta de uma infra-estrutura estabelecida para receber a célula (*EG&G Technical Services*, 2002).

As células são de vários tipos, sendo que a célula a base de membrana de troca de prótons tem sido mostrada como a mais adequada para os automóveis, devido ao seu baixo custo, tamanho, projeto simples e operação em baixa temperatura (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

Em busca de maior eficiência, grande parte das escolhas para as células a combustível está em torno do eletrólito a ser utilizado. Os principais tipos de eletrólitos são o alcalino, de carbonato fundido, ácido fosfórico, membrana de troca de prótons e óxido sólido. Os três primeiros são eletrólitos líquidos; os outros dois são sólidos. O tipo de combustível também depende do eletrólito. Algumas células precisam do hidrogênio puro e para isso demandam equipamentos extras, como reformadores. Certas células podem tolerar algumas impurezas, mas precisam de altas temperaturas para trabalhar com eficiência (COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006)

Há ainda outros tipos de células que estão em desenvolvimento: DMFC (Célula a combustível de metanol direto) e DEFC (Célula a combustível de Etanol Direto). Ambas têm por eletrólito a membrana de troca de prótons (GOMES NETO, 2005).

O quadro 1.2 ilustra as principais características dos tipos de células a combustível mais conhecidos, considerando a descrição e aplicações para cada célula. Para melhor compreender essa tecnologia, a seguir é feita uma breve explanação dos modelos de células a combustível em desenvolvimento.

QUADRO 1.2: Tecnologias de sistemas célula a combustível,¹² temperaturas de operação e aplicações potenciais

Tecnologias			Descrição e Aplicações		
Célula a Combustível	Denominação em inglês	Siglas em inglês	Eletrólito	Temp. (°C)	Aplicações Potenciais
Alcalina	<i>Alkaline</i>	<i>AFC</i>	Alcalino	50-200	Transporte, Espaço
Eletrólito Polimérico	<i>Polymer Electrolyte</i>	<i>PEFC</i>	Polímero	50-80	Transporte, Geração Distribuída
Metanol Direto	<i>Direct Methanol</i>	<i>DMFC</i>	Polímero (metanol direto)	60-130	Transporte, Geração Distribuída
Ácido Fosfórico	<i>Phosphoric Acid</i>	<i>PAFC</i>	Ácido Fosfórico	190-210	Cogeração, Geração Distribuída
Carbonato Fundido	<i>Molten Carbonate</i>	<i>MCFC</i>	Carbonato Fundido	630-650	Cogeração, Geração Distribuída ou Centralizada
Óxido Sólido	<i>Solid Oxide</i>	<i>SOFC</i>	Óxido Sólido	700-1000	Cogeração, Geração Distribuída ou Centralizada

FONTE: MCT, 2005.

a) Membrana de troca de prótons (Polymer Electrolyte Membrane PEM)

A tecnologia da célula PEMFC foi desenvolvida pela *General Electric* nos anos 1950 e utilizada pela NASA em seus projetos espaciais Gemini e Apollo.

Como características atuais da célula PEM estão a utilização do hidrogênio, do oxigênio do ar e da água, e a não-utilização de fluidos corrosivos, como acontece em outras células. São normalmente abastecidas com hidrogênio puro, fornecido a partir de tanques de armazenagem ou reformadores (EKDUNGE e RABERG, 1998; IEA, 2004, p. 24)

A temperatura de operação é relativamente baixa, por volta de 80°C, e a eficiência está em torno de 40% a 50%, fatores que possibilitam um início de funcionamento mais rápido. Não tornam possível a cogeração ou energia adicional, mas pode-se aproveitar o calor rejeitado para aquecimento da água, por exemplo. Essa célula requer um catalisador feito de um metal nobre como a platina, que é empregada para acelerar as reações químicas, pois, em baixas temperaturas,

¹² “A nomenclatura utilizada para designar os diferentes tipos de células a combustível baseou-se nas siglas em inglês (ver abreviações), pois essas abreviações são internacionalmente utilizadas. Essa nomenclatura também pode variar de acordo com o tipo de célula, por exemplo, as células de eletrólito polimérico (PEFC) também são conhecidas como PEMFC (do inglês *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) (MCT, 2005)”.

as reações são muito lentas. (IEA, 2004; COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006)

No setor automotivo a célula a combustível PEM combina as vantagens de um veículo elétrico (emissão próxima de zero, alta eficiência e operação silenciosa) com as vantagens do motor de combustão (longa autonomia e tempo curto para reabastecimento) (EKDUNGE e RABERG, 1998).

b) Célula a combustível de ácido fosfórico (Phosphoric Acid - PAFC)

Como o nome sugere, a célula PAFC utiliza o ácido fosfórico como eletrólito. A sua eficiência está entre 40% e 50%, é mais flexível para a utilização de combustíveis como o gás natural ou o biogás e opera em temperaturas entre 150 e 200 °C. As altas temperaturas de operação permitem que a célula tolere mais impurezas do que a célula PEM, como o CO₂ e o enxofre. Assim, quanto mais alta a temperatura de operação da célula, mais impurezas são suportadas (IEA, 2004; COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006).

No entanto, apesar de a temperatura citada para operação ser mais alta que a temperatura da PEMFC, ainda é considerada baixa. Embora a performance desta célula seja inferior à da célula alcalina, sua eficiência é maior devido a uma conversão mais simples do combustível. O calor eliminado pela célula é quente o suficiente para aquecer a água ou o ar. Por este aspecto se diferencia da PEMFC e pode ser utilizada na cogeração (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002)

É considerada a primeira geração moderna das células a combustível. Além disso, é o modelo mais maduro e a primeira a ser usada comercialmente. Esta célula é tipicamente usada para geração de energia estacionária, mas também está sendo usada em ônibus (IEA, 2004, p. 24). Tal qual a PEMFC, a PAFC utiliza a platina como catalisador.

c) Célula a combustível de metanol direto (Direct Methanol -DMFC)

A célula a combustível DMFC é relativamente nova se comparada com as células a hidrogênio puro. Apesar disso, parece ser a maior promessa em termos suprimento de energia para aplicações portáteis, tais como telefones celulares, *laptops*, MP3 *players*, câmeras digitais e geração de energia portátil de até 1 a 2 kW. A principal diferença em relação à PEMFC é que

esta tecnologia utiliza o metanol (C_3OH), conseqüentemente, no final do processo, ao invés do hidrogênio puro, ocorre a formação de água e dióxido de carbono (CO_2) (IEA, 2004, p. 25; GOMES NETO; 2005).

Apesar de ser tóxico, o metanol costuma ser diluído em água em baixas concentrações, até 30%, diminuindo os riscos de contaminação. O metanol fica armazenado em cartuchos que podem ser trocados ou reabastecidos com este combustível. Se utilizado em *laptops* poderá funcionar por um tempo 3 a 10 vezes maior que com o uso de uma bateria tradicional (GOMES NETO, 2005).

d) Célula a combustível alcalina (Alkaline - AFC)

A célula a combustível AFC opera com hidrogênio comprimido e oxigênio. Geralmente utiliza uma solução de hidróxido de potássio em água como eletrólito. A sua eficiência é de cerca de 70% e opera em temperaturas de 50 a 200°C. (COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006).

Foi uma das primeiras tecnologias de célula a combustível e a primeira a ser utilizada pelo programa espacial americano para gerar energia elétrica e água no espaço, pois é capaz de produzir água potável além da eletricidade. A maior desvantagem está no fato de ser sensível ao dióxido de carbono, o que está limitando o interesse em sua comercialização. Precisa de um hidrogênio muito puro, caso contrário forma-se um carbonato sólido que interfere nas reações químicas dentro da célula. Ou seja, uma pequena quantidade de CO_2 no ar pode afetar a operação da célula, sendo necessário purificar o hidrogênio e o oxigênio utilizados (IEA, 2004; EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002).

e) Célula a combustível de carbonato fundido (Molten Carbonate - MCFC)

Atualmente a célula MCFC está sendo desenvolvida para centrais elétricas que utilizam o carvão e o gás natural para gerar eletricidade em indústrias e aplicações militares. Opera em temperaturas mais altas, acima de 650°C. Por isso metais menos nobres podem ser utilizados como catalisadores e seu uso limita-se às células de grande porte e estacionárias. As altas temperaturas possibilitam a cogeração. A principal desvantagem está na pouca durabilidade; as

altas temperaturas e os eletrólitos corrosivos utilizados podem reduzir a vida útil da célula. Além disso, o trabalho com um eletrólito líquido é mais complexo em relação a um eletrólito sólido (IEA, 2004; COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006).

Muitas das desvantagens das células de baixa temperatura podem ser minimizadas com as altas temperaturas operacionais da MCFC, estas células podem ser fabricadas com chapas metálicas comuns que acarretam em custos menores de fabricação. Outra vantagem é que opera eficientemente com combustíveis que contenham CO₂, como os gases derivados biocombustíveis (EG&G Technical Services, 2002).

A eficiência desta célula está em torno de 60 a 80%, pois as temperaturas elevadas de funcionamento permitem extrair o hidrogênio de uma variedade de combustíveis, utilizando reformadores internos ou externos.

f) Célula a combustível de óxido sólido (Solid Oxide - SOFC)

As células SOFC operam em temperaturas muito altas, próximas a 1.000°C, permitindo a cogeração, e apresentam uma eficiência em torno de 60%. As altas temperaturas de operação eliminam a necessidade de catalisadores nobres, reduzindo os custos. Isto também permite que estas células reformem combustíveis internamente. Mas as altas temperaturas apresentam como desvantagens um lento *start-up* (início) e requerem uma significativa proteção térmica para reter o calor e proteger as pessoas. Podem ser úteis em grandes plantas estacionárias, mas não para transportes e aplicações portáteis (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002; IEA, 2004; COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS, 2006).

A célula de óxido sólido utiliza um eletrólito de cerâmica no lugar do eletrólito líquido. Esta é a célula a combustível que tem o mais longo período de desenvolvimento, iniciado no fim dos anos 1950. Por utilizar um eletrólito sólido, a célula pode ter formas flexíveis, como tubular ou plana (Collecting the History of fuel cells, 2006).

Os requerimentos para células móveis ou estacionárias diferem significativamente, particularmente no número de horas de operação, propriedades de resfriamento, resposta a mudanças de carga e limitações de armazenagem. Isso porque, operando em altas temperaturas, a célula estacionária não precisa de um compressor, requer gás natural ou outros óleos sem processar os combustíveis em um reformador externo. Assim, o sistema SOFC promete um *design* mais simples e pode alcançar alta eficiência com temperaturas elevadas. Um atrativo é a

possibilidade de ser empregada em pequena escala e assim alcançar menor custo. Constatase que enquanto a célula a combustível PEMFC é uma forte candidata para aplicações em automóveis, a célula SOFC deve ser mais atrativa para aplicações no mercado doméstico. No entanto essas não são condições exclusivas que impeçam o uso das células a combustível PEMFC para aplicações estacionárias e das SOFC em aplicações móveis (ERDMANN, 2003).

g) Célula a combustível de etanol direto (DEFC)

Apesar das vantagens conhecidas quando são empregados biocombustíveis nos processos de geração de energia, o interesse no desenvolvimento das células a combustível de etanol direto (DEFCs) tem diminuído nos últimos anos. Em parte, isso se deve ao fato de os resultados incluírem voltagens muito altas e baixa eficiência na conversão. As voltagens excessivas também são causadas pela utilização da platina como catalisador. O recente desenvolvimento de um catalisador que não contém platina reduz esses problemas e as indicações preliminares sugerem que será atingida uma eficiência próxima de 42% a 45%. Se estes resultados forem confirmados, o interesse nas células DEFCs deverá aumentar significativamente, pois estas células poderão ser fortes candidatas para utilização em veículos. (IEA, 2005)

1.3.3 Aplicações para o hidrogênio e para a célula a combustível em desenvolvimento

Embora o conceito básico de célula a combustível seja conhecido desde o século XIX, ainda há poucas aplicações comerciais consolidadas para essa tecnologia, destacam-se as aplicações para reserva de energia. No entanto, as expectativas são grandes em alguns setores, principalmente na indústria automobilística, que está anunciando o desenvolvimento de veículos elétricos para o mercado de massa com utilização da tecnologia PEMFC (ERDMANN, 2003).

O fato de as indústrias automobilísticas prestigiarem a tecnologia das células a combustível se deve à possibilidade de as células PEMFC emergirem como um substituto potencial para os motores de combustão. Em feiras automotivas no mundo todo estão sendo expostos automóveis de diversas montadoras com essa tecnologia, vários exemplos foram citados pela IEA 2004 e são resumidos a seguir.

Um dos modelos que já faz parte de um projeto de demonstração é da Honda, o FCX. Outro caso ocorre na Daimler-Chrysler, que está testando 60 Mercedes-Benz “F-Cell” Classe A.

A Toyota planeja oferecer cerca de 20 células a combustível híbridas baseadas na plataforma do carro Highlander. A Nissan anunciou que planeja comercializar automóveis com célula a combustível e a Ford informou que pretende oferecer uma versão do Focus com célula a combustível em uma escala de produção de pequeno volume. Outras células incluem o GM Opel HydroGen 3, o Hyundai Santa Fe FCEV, e o Nissan Xterra FCV, o DaimlerChrysler Ncar 5, e o Daihatsu's Move FCV-K-2.

A Daimler-Chrysler e a Ford contam com as células a combustível da BALLARD FUEL CELLS, enquanto a General Motors, a Honda e a Toyota estão desenvolvendo suas próprias células a combustível. A GM desenvolveu um conceito de chassi para a célula a combustível denominado *skateboard*. A Daimler-Chrysler está investindo não só em veículos com célula a combustível, mas também em frotas de ônibus para testes. A Honda está realizando *leasing* de veículos com célula a combustível para consumidores privados com propósitos de demonstração. A Ford e a Mazda Motor Co estão trabalhando simultaneamente com veículos a combustão interna, abastecidos com hidrogênio. A BMW está empregando a célula a combustível como unidade de força auxiliar para a engenharia de combustão interna. A Toyota está próxima de ser a primeira a comercializar esses veículos híbridos.

Na indústria automobilística a eficiência é um importante ponto de discussão. Nesse setor, “a adesão das células a combustível para o uso nos automóveis se justifica porque as células são duas a três vezes mais eficientes que os motores de combustão interna e, como o combustível é eletroquimicamente convertido, não emite gases poluentes (VEZIROGLU, 1995; GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003, p. 142)”.

Na tabela 1.3 é possível comparar as eficiências obtidas pelas diferentes tecnologias de veículos.

TABELA 1.3: A evolução da eficiência das diversas tecnologias de motores

	Ciclo motor Otto melhorado Eficiência 35%	Turbina a gás Eficiência 40%	Diesel melhorado Eficiência 40%	Célula a combustível Eficiência 50%	Célula a combustível Eficiência 55%
Ano	Milhas por galão				
1996	35				
1998	51	60	72	75	
2000	57	65	80	85	94
2003	63	72	90	94	100

FONTE: GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003, p. 143.

Apesar das vantagens em relação à eficiência, as células a combustível para os automóveis ainda não estão prontas para a comercialização. Além da redução nos custos, são necessárias melhorias na durabilidade e confiabilidade; conseqüentemente, a engenharia elétrica e os sistemas de armazenagem do hidrogênio afetarão os custos das células a combustível veiculares. (IEA, 2005, p. 23).

Complementando a questão da eficiência, em estudos comparando veículos movidos à célula a combustível e veículos movidos à combustão interna, os veículos movidos à célula a combustível têm um menor índice de emissões. Dessa forma, no futuro a célula poderá atender às necessidades de redução das emissões tóxicas e do dióxido de carbono, contribuindo assim para a descarbonização (EKDUNGE e RABERG, 1998).

Um ponto importante é que os fabricantes de automóveis com células a combustível dependem da disponibilidade de hidrogênio para abastecer esses veículos, ou seja, a eficiência dos veículos com célula a combustível poderá ser alcançada desde que haja hidrogênio prontamente disponível para o abastecimento. A esse respeito, Dante (2002) comentou que atualmente a célula a combustível está em um estágio avançado de desenvolvimento, enquanto as tecnologias utilizadas para extrair o hidrogênio ainda não atingiram o mesmo nível de eficiência e disponibilidade. O autor acredita que trabalhos futuros poderão diminuir a lacuna do desenvolvimento tecnológico entre a célula a combustível e a extração limpa do hidrogênio, antes que o uso da célula a combustível se torne maior. Para Dante, essa situação teria sido causada pelo interesse histórico nas células a combustível.

Além dos automóveis, há outras possibilidades de inserção das células a combustível, uma delas é mediante os ônibus. Ademais, no futuro as células a combustível também poderão fornecer energia auxiliar para aviões, trens e navios (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002). No quadro 1.3 constam algumas aplicações móveis para as células a combustível em desenvolvimento:

QUADRO 1.3: Aplicações móveis para as células a combustível

Aplicação	Descrição
Navios cargueiros	Engenheiros da Universidade de Southampton reduziram o tamanho dos navios de 335 para 175 metros, com uma capacidade para 600 containeres, a capacidade padrão é de 8500 containeres. A vantagem é que esses navios podem atingir uma velocidade de 120 km/h, muito superior à velocidade atual de 46 km/h. Esse novo navio foi batizado de <i>Hydrogen Oceanjet</i> 600 e ainda está na fase de projeto e deverá ser alimentado por hidrogênio líquido, tendo como propulsoras quatro turbinas iguais às utilizadas no Boeing 747.
Submarino	A SIEMENS da Alemanha está desenvolvendo a primeira célula a combustível para gerar energia elétrica e movimentar um submarino. Para gerar energia serão utilizadas quatro células PEMFC com uma capacidade de geração de 40 kW cada uma. Esse submarino equipado com célula a combustível poderá ficar submerso cinco vezes mais tempo do que um submarino convencional.
Transporte aéreo	A empresa Boeing anunciou que fará, até o final de 2007, o primeiro teste com uma aeronave híbrida, tripulada, alimentada por células a combustível. A célula utilizada será a PEMFC com um banco de baterias de lítio para alimentar um motor elétrico, que será acoplado a um motor convencional.

FONTE: Inovação Tecnológica (2004; 2007; 2007a).

Há ainda as aplicações estacionárias. Estas têm por característica o fato de sua eficiência não ser afetada pelo tamanho. Isso significa que plantas pequenas e com eficiência elevada podem ser desenvolvidas. Um dos casos mais comentados na literatura é uma célula PAFC de 200 kW, a PC-25 (figura 1.7), a primeira a entrar comercialmente no mercado. Esta planta foi desenvolvida pela *United Technologies Fuel Cells*, uma divisão da United Technologies Corporation (UTC). Como parceiros, a UTC possui a Toshiba Corporation, do Japão, e a Ansaldo SpA, da Itália.

Sendo a PC-25 a primeira unidade disponível comercialmente, serve de modelo para as aplicações com a célula a combustível. Devido a estes atributos, a PC-25 está sendo instalada em vários lugares ao redor do mundo, tais como hospitais, hotéis, grandes prédios comerciais, indústrias de transformação, estações de tratamento de água, e outras instituições (EG&G Technical Services, 2002).

FIGURA 1.7: Célula Estacionária PC-25



FONTE: EG&G Technical Services, 2002.

Outro exemplo de aplicação estacionária está sendo realizado pela Siemens Westinghouse Power Corporation (SWPC). A SWPC selecionou uma área em Pittsburgh, na Pensilvânia, para expansão dos negócios de células a combustível estacionárias. A SWPC tem três sistemas SOFC empregando tecnologia para a célula tubular. As capacidades destes sistemas são: 220 kilowatts, 100 kilowatts e 25 kilowatts (EG&G TECHNICAL SERVICES, 2002).

Por fim, esta seção descreveu os elementos que estruturam a Economia do Hidrogênio como um novo regime energético, caracterizado pelo hidrogênio como vetor energético e a célula como sistema de conversão. Foi abordada a Economia do Hidrogênio, bem como as possibilidades para a geração do hidrogênio, que poderá ser obtido de fontes renováveis e não renováveis, mas que terá como premissa a descarbonização do regime energético. Para ilustrar como as pesquisas em torno do tema não são recentes, foi abordado um histórico em torno dos estudos com as células a combustível, no qual foram evidenciados registros desde o século XVIII. Para a célula a combustível foram descritos, além das características básicas de funcionamento, os tipos de célula. Estas variam em torno do eletrólito e possibilidades de aplicação. Algumas células estão em estágios mais avançados de desenvolvimento, como é o caso da célula de ácido fosfórico que tem várias aplicações em teste no mundo. Também são consideradas um dos modelos mais antigos de células. A célula PEM está recebendo muitos investimentos em P&D e no futuro poderá ser a mais encontrada nas aplicações veiculares e equipamentos portáteis. Para as aplicações estacionárias, as células de óxido sólido têm sido a tecnologia mais escolhida.

Foi apresentado que as condições de mudança vão além da tecnologia, pois as políticas públicas e as opções em torno da atual estrutura energética exercerão poderosa influência na possibilidade de um novo regime energético. Em relação à infra-estrutura, a geração distribuída, de menor porte e gradativa, é o modelo mais adequado para a fase de introdução no mercado.

Na próxima seção é apresentado o contexto internacional a respeito da possibilidade de continuar a promover a descarbonização, o que pode ocorrer mediante rupturas tecnológicas em relação ao regime energético dos combustíveis fósseis. São mudanças que estão sendo pesquisadas há décadas e que propõem o hidrogênio e a célula a combustível como alternativas para o futuro.

1.4 O hidrogênio e a célula a combustível como propostas para a descarbonização: o contexto internacional

Internacionalmente cresce o interesse pela pesquisa e pelo desenvolvimento de fontes de energia e sistemas de conversão que possam substituir o regime energético dominante, fundamentado nos combustíveis fósseis. Nesse contexto, esta seção se propõe a descrever o panorama internacional quanto ao desenvolvimento tecnológico, econômico e institucional para a Economia do Hidrogênio. A descarbonização sustenta favoravelmente a Economia do Hidrogênio, mas não impede que alguns países como os Estados Unidos, a China, a Nova Zelândia e o Japão invistam na possibilidade de obter o hidrogênio a partir do carvão. Alternativa considerada polêmica, pois pode não contribuir para reduzir as emissões de CO₂. Tendo em foco as vantagens para o meio ambiente, a produção do hidrogênio a partir de fontes renováveis é a opção mais adequada, contribuindo de fato para a descarbonização, opção escolhida pela Alemanha, Dinamarca, Suíça, Suécia e Brasil. Contudo, mesmo nesses países provavelmente o gás natural será um combustível de transição para gerar o hidrogênio, assim como o carvão poderá continuar a ser empregado na geração de energia elétrica. Pelo menos enquanto houver disponibilidade deste gás e até que as pesquisas com as fontes renováveis evoluam.

A organização de programas oficiais de pesquisa para o hidrogênio e para a célula a combustível começou a aparecer principalmente após a década de 1970 com a crise do petróleo. No entanto, as células a combustível têm sido alvo de pesquisa e desenvolvimento desde a década de 1950, quando a corrida aeroespacial entre os Estados Unidos e a extinta União Soviética impulsionou os projetos de P&D. Atualmente, os investimentos mundiais concentram-se na

América do Norte (EUA e Canadá), Europa (representada por cerca de 20 países) e Ásia (Japão, China e Coréia), em tecnologias ligadas ao hidrogênio e às células a combustível (PROCAC, 2002).

No âmbito internacional destacam-se três iniciativas recentes de cooperação nas quais se observa o envolvimento de vários países interessados no hidrogênio e na célula a combustível:

1ª) Em abril de 2003, países¹³ membros da IEA aceitaram o convite do diretor executivo desta instituição para estabelecer um grupo de coordenação do hidrogênio para programas de P&D nacionais e estratégias políticas, o *Hydrogen Coordination Group* (HCG). Nesse caso foram incluídos projetos relevantes de P&D, tais como: *IEA Implementing Agreements on Hydrogen, Advanced Fuel Cell; e The Greenhouse Gas R&D Program*.

2ª) Em novembro de 2003, dezesseis países¹⁴ criaram uma parceria internacional para a Economia do Hidrogênio, a *International Partnership for Hydrogen Economy (IPHE)*. Esta fundamenta-se em uma interação política global proposta pelos Estados Unidos para encorajar a cooperação pública e privada para o hidrogênio e para célula a combustível. Mediante essa parceria foi possível constatar que o interesse no hidrogênio não está limitado aos países da OCDE. Brasil, China, Índia e Rússia também estão comprometidos com o desenvolvimento do hidrogênio e da célula a combustível. Como exemplo, a China planeja introduzir os ônibus com célula a combustível em um projeto de demonstração nos jogos olímpicos de Beijing, em 2008, e iniciar a produção em massa de veículos com célula a combustível a partir de 2010 (IEA, 2005, p. 38).

3ª) Em janeiro de 2004, a Comissão Européia estabeleceu a Plataforma Tecnológica Européia para o Hidrogênio e Células a Combustível. Essa Plataforma tem por regra promover uma efetiva mobilização dos *stakeholders* (indústria, comunidade científica, autoridades públicas, usuários e a sociedade civil) em busca de metas comuns, bem como estimular e coordenar a pesquisa européia em nível local, regional e nacional. Foi estabelecido um projeto de coordenação para a Plataforma Européia denominado HY-CO - *A hydrogen and fuel cell ERA-Net hydrogen coordination*. Dentre os principais objetivos do HY-CO estão: oferecer uma plataforma comum para informação e coordenação dos programas e atividades de P&D; e

¹³ Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Tcheca, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Irlanda, Itália, Japão, República da Coréia, Luxemburgo, Países Baixos, Nova Zelândia, Noruega, Portugal, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos.

¹⁴ Austrália, Brasil, Canadá, China, Comissão Européia, França, Alemanha, Islândia, Índia, Itália, Japão, República da Coréia, Nova Zelândia, Noruega, Rússia, Reino Unido e Estados Unidos.

estabelecer uma base comum de conhecimento para a elaboração de uma política europeia para a Economia do Hidrogênio (COMISSÃO EUROPEIA, 2006).

Complementando as informações a respeito de iniciativas para a Economia do Hidrogênio, na tabela 1.4 há exemplos de investimentos na tecnologia de sistemas célula a combustível e hidrogênio realizados por instituições públicas e privadas.

TABELA 1.4: Investimentos públicos e privados em P&D para o hidrogênio e para a célula a combustível

Investidor	Áreas beneficiadas	Total de investimentos US\$ milhões	Período
U.S. DOE ¹⁵ - Análise do investimento do governo americano federal pelo Hydrogen Technical Advisory Panel	Programas de P&D e demonstração para sistemas de hidrogênio e células a combustível	150	1999
DOE – FreedomCAR	Novo programa do <i>Office of Energy Efficiency and Renewable Energy</i>	162	2002
DOE – SOFC e MCFC	Dentro do <i>Office of Fossil Energy</i>	49,5	2002
Estado de Ohio – EUA	P&D, demonstração, capacitação profissional, empréstimos (juros abaixo do mercado)	103	2002 -2005
Governo do Canada & empresas	Programas de P&D e demonstração	19,5	2001-2002
Governos de países europeus & União Europeia (EU) – Associação Francesa de Hidrogênio	Alemanha, França, UE, Itália, Suécia, Islândia, Holanda, Noruega, Espanha, Reino Unido, Suíça, Finlândia, Áustria, Portugal, Grécia, Dinamarca	EU - 190 Alemanha - 90 França - 35	2000
Daimler Chrysler Empresarial	investimento privado	1.500	2001-2004

FONTE: USDOE¹⁵ NREL apud PROH2

Soma-se às informações explanadas o quadro 1.4, no qual constam eventos internacionais que tiveram por foco temas correlatos ao hidrogênio e às células a combustível.

¹⁵ USDOE – Departamento de Energia dos Estados Unidos.

QUADRO 1.4: Eventos e experiências com o hidrogênio

1970: A General Motors foi a primeira a usar a expressão “Economia do Hidrogênio”, quando engenheiros começaram a perceber o hidrogênio como o possível combustível energético do futuro.
1988: União Soviética – Adaptação de um avião de passageiros para funcionar parcialmente com hidrogênio líquido.
1992: Alemanha – O Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energia Solar criou a primeira residência solar empregando o hidrogênio para armazenar energia durante longos períodos.
1993: Japão – destinou dois bilhões de dólares a um plano de 30 anos para promover a energia do hidrogênio pelo mundo.
1994: Bélgica –ônibus abastecidos com hidrogênio.
1999: Islândia- lançamento de um plano de longo prazo para se tornar a primeira Economia do Hidrogênio no mundo. A meta é rodar toda a economia islandesa com hidrogênio dentro de 20 anos, praticamente eliminando do país a energia de combustíveis fósseis.
2001: Havái – criação de parceria público-privada destinada a explorar a energia do hidrogênio. O estado que importa grande parte do petróleo por meio de petroleiros vindos da Ásia e do Alasca pretende produzir mais hidrogênio do que o necessário para remeter o excedente à Califórnia.
2003: Lançada a parceria internacional para a economia do hidrogênio, <i>Partnership for Hydrogen Economy</i> (IPHE).

FONTE: Rifkin, 2003; Larsen, Feidenhans'i e Petersen, 2004. (adaptado pela autora)

Esta seção terá continuidade descrevendo as iniciativas para o desenvolvimento tecnológico e para a construção de políticas que consideram o hidrogênio e a célula a combustível como alternativas energéticas para os países membros da IPHE e da IEA. Posteriormente, essas informações foram empregadas para contextualizar a situação do Brasil em razão do panorama internacional. Nesta análise, primeiramente foram utilizados os *Scoping Papers*, documentos provenientes da *International Partnership for Hydrogen Economy* (IPHE), que resumem o estado atual da tecnologia, barreiras e prioridades. Na sequência foram consideradas as iniciativas provenientes da IEA, mais precisamente de países que pertencem ao *Hydrogen Coordination Group* (HCG), quando então são descritos os programas em andamento.

1.4.1 Iniciativas da IPHE

A IPHE (*International Partnership for the Hydrogen Economy*) é um mecanismo internacional criado para organizar e implementar a pesquisa, o desenvolvimento, a demonstração e a utilização comercial de atividades relacionadas ao hidrogênio e à célula a combustível. A IPHE é liderada pelos Estados Unidos e foi estabelecida em 2003 como uma instituição internacional para acelerar a transição para a Economia do Hidrogênio, bem como para estabelecer os critérios e procedimentos a serem cumpridos pelos países membros

A IPHE é orientada por um termo de referência que estabeleceu dois comitês, o *Steering Committee* (Comitê Diretor) _ responsável por definir as políticas e procedimentos para a IPHE_ e

o *Implementation-Liaison Committee* (Comitê de Implementação), que se reporta ao primeiro e tem como funções revisar o progresso de projetos colaborativos; identificar direcionamentos de pesquisa promovendo o desenvolvimento e a demonstração; fornecer avaliação técnica para as decisões políticas; e buscar códigos, padrões internacionais e protocolos de segurança. Outra função do comitê de implementação é promover a interface entre os *stakeholders* internacionais.

Em novembro de 2003, em um encontro do Comitê de Implementação, na época liderado pela Islândia e pela Alemanha, foram identificadas áreas prioritárias para pesquisa e desenvolvimento entre os países parceiros. Essas áreas se tornaram referência para o estabelecimento dos programas nacionais para Economia do Hidrogênio no mundo, são as seguintes: produção do hidrogênio; armazenagem do hidrogênio; P&D para a célula a combustível; regulação, códigos e padrões para o hidrogênio e para a célula a combustível; e questões socioeconômicas para o hidrogênio. O comitê organizou essas áreas em forças tarefas, tendo como participantes um autor líder e *experts* dos países da IPHE. O resultado foi a elaboração de cinco documentos denominados *Scoping Papers*.

Os *Scoping Papers* são considerados documentos em formação que serão continuamente atualizados pelo Comitê, para demonstrar as prioridades em relação a cada uma das áreas. Os documentos foram resumidos no quadro 1.5.

As cinco áreas de trabalho descritas nos *Scoping Papers* visam dar suporte às atividades da IPHE para o desenvolvimento do hidrogênio e da célula a combustível. Contudo, esses documentos não são definitivos. Por conseguinte, o aparecimento de *breakthroughs* nas tecnologias do hidrogênio e da célula a combustível poderá promover mudanças e, conseqüentemente, levar a uma revisão nos *scoping papers* produzidos.

Quanto ao Brasil, o país está participando de todos os *Scoping Papers*, logo, o aprendizado adquirido durante a participação em projetos internacionais como esse também direciona as ações brasileiras. Portanto, aponta-se que as áreas escolhidas pelo Brasil para atuar na Economia do Hidrogênio são condizentes com o panorama internacional.

QUADRO 1.5: *Scoping Papers*

a) Produção do Hidrogênio Países envolvidos: Austrália, Brasil, Canadá, Alemanha, Islândia, Itália, Japão, Noruega, Coreia e Estados Unidos. País Líder: França Quatro fases para a transição dos atuais combustíveis líquidos para a Economia do Hidrogênio: Fases 1 e 2: produção do hidrogênio a partir do óleo e do gás natural. Em curto prazo unidades pequenas para a produção distribuída do hidrogênio. Em alguns casos regionais, produção renovável ou através de energia nuclear. Fases 3 e 4: os renováveis, a energia nuclear e o carvão com reservas para longo prazo poderão substituir o gás natural para a produção do hidrogênio. Em locais onde os renováveis são facilmente obtidos, as soluções distribuídas poderão prover a energia necessária para aplicações primárias. Nos países em que a energia nuclear está desenvolvida ou os recursos renováveis estão centralizados, provavelmente a produção centralizada do hidrogênio predominará.
b) Armazenagem do Hidrogênio Países envolvidos: Austrália, Brasil, Canadá, Alemanha, Itália, Islândia, Japão, Noruega, Coreia, Estados Unidos e Comissão Europeia País Líder: Rússia Barreiras técnicas para a armazenagem do hidrogênio: - custo elevado dos sistemas de armazenagem, muito maior que para os derivados de petróleo; - o peso e volume para armazenagem do hidrogênio <i>on-board</i> (nos veículos) atualmente são muito elevados, o que pode resultar em veículos muito maiores que os convencionais; - a eficiência energética foi considerada um desafio para qualquer forma de armazenagem do hidrogênio; - a durabilidade, a necessidade de sistemas com o ciclo de vida longo para reduzir os custos de substituição; - o tempo de reabastecimento precisa ser inferior a três minutos. - falta de critérios formais para a segurança, tais como a ausência de códigos e padrões; - reduzido número de estudos a respeito do ciclo de vida de itens armazenados, bem como os seus impactos ao meio ambiente e a perda de eficiência após a armazenagem.
c) P&D colaborativo para a célula a combustível Países envolvidos: Austrália, Brasil, Canadá, Alemanha, Itália, Japão, Noruega, Coreia, Estados Unidos e Comissão Europeia País líder: Estados Unidos Parcerias para P&D pré competitivo nas seguintes áreas: Células a combustível de membrana de eletrólito Polimérico; Células a combustível alcalinas; Células a combustível de alta temperatura; padronização de testes e protocolos para componentes das células a combustível.
d) Regulações, códigos e padrões Países envolvidos: Austrália, Brasil, Canadá, Alemanha, Islândia, Itália, Japão, Noruega, Coreia e Estados Unidos Líder: Comissão europeia Um fórum para análise e desenvolvimento de recomendações políticas, incluindo códigos comuns, padrões e regulações na transição para a Economia do Hidrogênio. As funções da IPHE são muito mais pré-normativas e pré-regulatórias.
e) Questões socioeconômicas Países envolvidos: Austrália, Brasil, Canadá, Alemanha, Islândia, Itália, Japão, Noruega, Coreia e Estados Unidos. País líder: França Trata dos dilemas sociológicos, definindo quais seriam as questões, bem como o relacionamento entre as questões técnicas e não técnicas. Para alcançar tais informações incluem a análise do comportamento dos <i>stakeholders</i>. Alguns critérios são sugeridos: eficiência; custos (diretos e indiretos); segurança no fornecimento; emissão de gases causadores do efeito estufa; impactos ambientais locais; critérios econômicos como emprego e comércio internacional; segurança; aceitação pública e confiança.

FONTE: elaborado pela autora a partir de IPHE (2006).

Após concluídos, os *Scoping Papers* passaram a ser empregados como diretrizes para o desenvolvimento dos programas nacionais para a Economia do Hidrogênio. A IEA destacou aqueles considerados mais desenvolvidos, que estão relatados a seguir.

1.4.2 Iniciativas da IEA

A *International Energy Agency* (IEA) também tem contribuído para o desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio e à célula a combustível. Os países membros diferem em relação ao objetivo dos seus projetos, mas, de modo geral, estão comprometidos com as fontes renováveis de energia.

Para esses países, a célula a combustível promete um aumento significativo na eficiência do sistema energético, nas aplicações estacionárias e nos transportes, e também pode influenciar positivamente na redução das emissões. Entretanto, o desenvolvimento do hidrogênio, da célula a combustível e da infra-estrutura para essas tecnologias a um custo competitivo requer tempo, investimentos dos setores público e privado e *breakthroughs* tecnológicos para alcançar maturidade tecnológica e entrar no mercado (IEA, 2004).

A IEA publicou um livro¹⁶ com o objetivo de mapear, em seus países membros, as atividades de pesquisa governamentais e as políticas para o hidrogênio e para a célula a combustível (IEA, 2004). Nessa obra foi identificado que os investimentos governamentais em P&D têm aumentado, alcançando a soma de US\$ 1 bilhão de dólares por ano. Foi observado, também, que mais da metade dos esforços são investidos na célula a combustível e o restante em tecnologias para produzir, armazenar, transportar e usar o hidrogênio.

Visando compreender o que cada país está desenvolvendo, o livro da IEA abrangeu uma revisão dos programas nacionais de P&D, assim foi possível entender o estado da arte da tecnologia e os planos dos governos membros da IEA para pesquisa e desenvolvimento da futura Economia do Hidrogênio. Esta revisão foi possível devido à colaboração dos países membros da

¹⁶ IEA, International Energy Agency. **Hydrogen & Fuel Cells: Review of National R&D Programs**, OECD, 2004

IEA que fazem parte do grupo de pesquisa que estuda as possibilidades para a Economia do Hidrogênio, o *Hydrogen Coordination Group* (HCG).¹⁷

Os países membros do HCG que participam de projetos de desenvolvimento para a célula a combustível ou para o hidrogênio, fazem-no mediante a inserção em algum projeto específico, ou são membros de um programa mais amplo de P&D. Muitos países possuem programas de longo prazo, bem fundamentados, que perpassam por várias tecnologias e incluem projetos de demonstração para as células, para aplicações estacionárias e para os transportes. Os principais programas para as tecnologias da célula a combustível foram apontados no estudo da IEA como sendo os programas pertencentes ao Japão, ao Canadá, à Alemanha, à França, à Itália e aos Estados Unidos, países que também compõem a IPHE. Seus programas são descritos a seguir.

Japão

O Japão é considerado um dos líderes mundiais no desenvolvimento de tecnologias para o hidrogênio e para a célula a combustível. Posição que se deve aos investimentos públicos e privados que têm sido aplicados, desde a década de 1980, no desenvolvimento de células de baixa e alta temperatura. O foco de P&D mudou ao longo dos anos. No início, as pesquisas eram voltadas para as células PAFC e MCFC, mas, atualmente, os esforços estão focados nas células PEMFC para aplicações nos transportes, e nas células MCFC e SOFC, para aplicações estacionárias. O *Japan Hydrogen Fuel Cell (JHFC) Demonstration Project* é um dos mais desenvolvidos entre os membros da IEA. Incluindo as aplicações estacionárias e automotivas, abrange testes em rodovias para demonstrações dos veículos e postos de abastecimento de hidrogênio. Como fontes estudadas para a produção do hidrogênio estão principalmente o carvão e a energia nuclear.

O programa japonês de comercialização possui três fases. A fase 1, de 2002 a 2005, focou na demonstração de células a combustível para automóveis e também estacionárias, em que foram desenvolvidos códigos e padrões e a infra-estrutura inicial. A fase 2, em andamento, abrange o período de 2005 a 2010. Tem seu foco no estágio de introdução com o desenvolvimento de um sistema de fornecimento e aceleração da inserção dos automóveis com

¹⁷ Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Coreia, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, França, Grécia, Itália, Japão, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Portugal, Reino Unido, Suécia, Suíça, Turquia e União Européia.

célula a combustível. A fase 3, compreendendo o período de 2011 a 2020, em diante, foi denominada estágio de difusão; para esta fase está planejada a entrada do setor privado no mercado das células a combustível e no sistema de fornecimento do combustível.

No Japão, muitas empresas estão investindo no desenvolvimento das células estacionárias. Destacam-se: Sanyo Electric Co.; Nippon Oil Co.; Toshiba International Fuel Cell Co.; Toyota Motor Co.; Mitsubishi Heavy Industry Co; entre outras. Do mesmo modo são citadas as empresas que concentram seus esforços de pesquisa nas células a combustível para veículos: Toyota; Honda; Nissan; Daihatsu; Toyota/Hino (Bus); Mitsubishi Motor; Suzuki; entre outras.

Canadá

O Canadá possui um longo envolvimento com as tecnologias para o hidrogênio e para as células a combustível. Os programas de P&D focam na comercialização das células a combustível e no desenvolvimento de padrões que serão necessários para que o hidrogênio se torne um vetor energético seguro e com custos viáveis.

No Canadá, as duas empresas de tecnologias de maior sucesso na década de 1980 foram a *Ballard Pem Fuel Cell* e a *Electrolyser Corp* (agora *Stuart Energy*). Esses esforços iniciais levaram à demonstração, em 1993, do primeiro ônibus no mundo com célula a combustível. Os esforços com P&D continuaram e em 1996 foi demonstrada uma segunda geração de ônibus.

Com o sucesso desses primeiros ônibus com célula a combustível, outra rápida demonstração ocorreu em 1997, integrando diversas tecnologias de hidrogênio e provando que poderiam funcionar como um sistema completo, incluindo a produção de hidrogênio, armazenagem e utilização da célula a combustível.

Atualmente, o Canadá está desenvolvendo e demonstrando várias tecnologias para a PEMFC, concomitantemente com o desenvolvimento da DMFC para aplicações estacionárias portáteis e automotivas. Para a produção do hidrogênio, as fontes mais estudadas são o gás natural e a energia solar para a eletrólise da água. Também estão sendo realizadas pesquisas fundamentais e aplicadas para o desenvolvimento de novos materiais e arquitetura para células de alta temperatura e microcélulas. O programa é gerenciado pelas seguintes instituições: *Natural Resources Canada*; *National Research Council*; *Natural Sciences and Engineering Research Council*; e *Department of National Defence and Environment Canada*.

O orçamento anual é de aproximadamente C\$20 milhões. As atividades de P&D são complementadas por dois programas de demonstração, nos quais serão investidos C\$83 milhões em infra-estrutura para o hidrogênio e demonstração para a célula a combustível.

O Canadá também possui um programa dividido em três fases. A fase 1 abrange o período de 2005 a 2010 e se propõe a oferecer suporte para os esforços pré-comerciais da indústria. Essa primeira fase inclui a redução dos custos, o desenvolvimento da infra-estrutura, o estabelecimento de códigos e padrões, e a conscientização dos usuários. A fase 2 envolve um amplo desenvolvimento para os 5 a 10 anos seguintes. Propõe a adoção de tecnologias emergentes, a expansão da infra-estrutura e a continuidade das atividades de P&D. Para a fase 3, a proposta é de expansão do mercado, dentro de 10 a 20 anos após a fase 1, visa a produção em massa e o desenvolvimento da infra-estrutura nacional (IEA, 2005).

Um fator-chave do sucesso do programa canadense foi a superioridade das tecnologias do hidrogênio e da célula a combustível no setor privado. Isso levou ao desenvolvimento de alguns *clusters* de inovação (destacando-se o de Vancouver), nos quais existe uma massa crítica de *experts* e tecnologias em constante desenvolvimento. As indústrias canadenses são líderes mundiais em tecnologias de P&D para o hidrogênio e para a célula a combustível, destacando-se também na fabricação, demonstração e comercialização. As principais indústrias são a *Ballard Power Systems*, *Dynetek Industries Ltd*, *Fuel Cell Technologies*, *Stuart Energy Systems*, e *Hydrogenics Corporation*.

Alemanha

O programa alemão tem parcerias com centros nacionais de pesquisa, universidades e indústrias. Na Alemanha a célula a combustível tem sido uma opção para aplicações estacionárias e automotivas. O programa alemão de células a combustível inclui o desenvolvimento de células de alta temperatura para aplicações estacionárias (MCFC e SOFC).

A Alemanha é um dos líderes mundiais e o país líder europeu no desenvolvimento e na implementação de tecnologias para o hidrogênio e para a célula a combustível. Na Europa é líder quanto ao número de empresas envolvidas e pessoas empregadas, e pela variedade de projetos de demonstração. Atualmente mais de 70% dos projetos de célula a combustível da Europa estão localizados na Alemanha.

A força da indústria alemã está presente em alguns fatores de destaque, tais como: a manufatura, a disposição das empresas em investir, o governo como patrocinador, a pesquisa estabelecida e a utilização de tecnologia estrangeira em projetos de demonstração.

Há também varias iniciativas federais e regionais e cooperações entre empresas públicas e privadas: por exemplo, o desenvolvimento da tecnologia MCFC para aplicações estacionárias ou a demonstração dos ônibus NEBUS e Citaro pela Daimler-Chrysler. Outro exemplo de parceria para energia limpa, em Berlim, é uma iniciativa do Ministério Federal do Tráfego, construindo, para demonstração, postos de serviços de hidrogênio e veículos movidos a hidrogênio

Na Alemanha, as atividades de P&D intensivas em tecnologias do hidrogênio começaram em 1988 e concentraram-se no desenvolvimento de tecnologias específicas, como a produção de hidrogênio utilizando a eletrólise e a armazenagem do hidrogênio. Naquele país foram desenvolvidos grandes projetos para demonstrar a cadeia de suprimento completa para o hidrogênio solar (*HYSOLAR* e *Solar-Hydrogen-Bavaria Project BAYSOLAR*). Esse trabalho foi concluído entre 1995-1999, tendo como resultado o desenvolvimento dos principais componentes do sistema de energia fundamentado no hidrogênio. Contudo, concluíram que a viabilidade comercial para a Economia do Hidrogênio utilizando energia solar só poderá ser alcançada em um futuro distante.

França

A França conduz o seu programa de células a combustível oferecendo suporte para os institutos de pesquisa em cooperação com várias indústrias francesas. Dentre elas, destacam-se a *Renault*, a *Peugeot* e a *Citroën*.

Assim como em outros países, as atividades estão concentradas em duas áreas principais: tecnologias PEM e SOFC. O principal grupo financiador é a rede PACo, que contribui com atividades relacionadas à célula a combustível para a P&D do setor público. Embora esteja focada na célula a combustível, esta rede também se interessa pela pesquisa do hidrogênio combustível, principalmente com o desenvolvimento de pequenos reformadores e com o desenvolvimento de tecnologias para a armazenagem do hidrogênio. A energia nuclear também é considerada uma fonte para o hidrogênio.

Os principais participantes em termos de esforços financeiros e intelectuais são grupos de pesquisa pública: CEA (*Commissariat à l'Énergie Atomique*), CNRS (*Centre national de la*

recherche scientifique), INERIS (*Institut National de l'Environnement industriel et des Risques*), INRETS (*Institut National de Recherche sur les Transports*), CNRT (*Centre National de Recherche Technologique*) e algumas escolas de engenharia como a *Ecole des Mines* e, *Conservatoire National des Arts et Métiers*).

Itália

Na Itália as atividades de P&D para o desenvolvimento das células a combustível iniciaram na década de 1980. O Programa Nacional para P&D em hidrogênio e célula a combustível é mantido pelo Ministério de Pesquisa e pelo Ministério do Meio Ambiente.

Por enquanto, as atividades de P&D estão concentradas no desenvolvimento de tecnologias para a célula a combustível, enquanto um comprometimento moderado está focado na produção de hidrogênio. No início da década de 1990 foram lançados projetos para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, principalmente a energia solar. Nesse contexto, laboratórios têm desenvolvido e integrado plantas para a produção de hidrogênio a partir de fontes fotovoltaicas, para posterior armazenagem e utilização nas células a combustível. Mais recentemente, a indústria tem apresentado crescimento no desenvolvimento de automóveis movidos a hidrogênio. Como exemplo, em fevereiro de 2001 a Fiat introduziu o primeiro protótipo de carro com célula a combustível, o “*Seicento Elettra H2 Fuel Cell*”, e um protótipo mais avançado do mesmo carro foi apresentado em 2003.

As seguintes atividades têm sido identificadas como prioritárias para o hidrogênio como portador de energia sustentável na Itália:

- a) Desenvolvimento de tecnologias, componentes e sistemas inovadores para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis ou combustíveis fósseis;
- b) Desenvolvimento de sistemas para armazenagem do hidrogênio;
- c) Desenvolvimento de tecnologias, componentes e sistemas para o uso de hidrogênio no setor de transportes e para a geração distribuída.

As prioridades de P&D para as tecnologias das células a combustível são:

- a) Melhorias de desempenho e redução de custos mediante o desenvolvimento de materiais alternativos, componentes e *design* da célula;
- b) Desenvolvimento e demonstração do sistema da célula a combustível para os transportes, geração estacionária e unidades portáteis;

c) Plantas para demonstração, monitoramento e verificação do comportamento da célula em operação utilizando diferentes combustíveis.

As atividades de P&D na Itália têm incluído novas rotas para produção do hidrogênio, armazenagem e tecnologias de distribuição. Além disso, estão investindo na infra-estrutura para a cooperação entre institutos públicos de pesquisa e a indústria. Dentre as principais indústrias, destacam-se: *Fiat Research Center, IVECO-Iribus, Pirelli Labs, SAES Getters, SAPIO, SOL, Technip/KTI*.

Estados Unidos

Os Estados Unidos conduzem a grande maioria das atividades de P&D com hidrogênio e células a combustível no mundo, coordenadas pelo “*Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program*”, no qual os fundos para pesquisa, desenvolvimento e atividades de validação possuem parceiros públicos e privados. O programa é liderado pelo Departamento Americano de Energia (USDOE) e integra atividades de várias instituições governamentais, incluindo o Departamento de Defesa, o Departamento de Transporte e a Agência de Proteção Ambiental. As áreas de P&D incluem PEMFC, SOFC, MCFC, infra-estrutura para a produção e armazenagem do hidrogênio, sensores, desenvolvimento de códigos e padrões, segurança e educação. Para a produção do hidrogênio pesquisam a gaseificação do carvão e também a energia nuclear, a biomassa e a energia solar.

A indústria automobilística norte-americana formou uma parceria denominada FreedomCar, cujos participantes são o USDOE e a USCAR (uma organização de pesquisa pré-competitiva formada pela *General Motors, Ford e Daimler-Chrysler*) para o desenvolvimento da PEMFC

O USDOE planejou quatro fases na transição para a Economia do Hidrogênio, são elas:

Fase 1: Nesta fase as organizações privadas e governamentais pesquisarão, desenvolverão e demonstrarão trajetórias tecnológicas críticas e prioridades em segurança para investir em infra-estrutura. A educação pública, os códigos e padrões deverão ser desenvolvidos concomitantemente com P&D. Não há uma data para término, mas suas atividades poderão se estender além de 2015.

Fase 2: É a fase de penetração inicial no mercado, podendo começar em 2010, usando a infraestrutura existente para o gás natural em aplicações portáteis e em algumas aplicações estacionárias e para o transporte.

Fase 3: Seu início é dependente de uma decisão positiva para a comercialização dos veículos com célula a combustível em 2015. Poderá atrair investimentos em infra-estrutura para produzir células a combustível e para produzir e distribuir o hidrogênio. Políticas governamentais ainda podem ser requeridas para nutrir esta fase de expansão da infra-estrutura.

Fase 4: Poderá começar por volta de 2025. Considera-se que nessa fase as necessidades do consumidor serão supridas e os benefícios nacionais, em termos de segurança energética e melhorias na qualidade ambiental, serão alcançados. Ademais, a indústria receberá retorno adequado de seus investimentos e competirá globalmente. A fase 4 leva à transição para a Economia do Hidrogênio em 2040.

Em novembro de 2002 foi lançado nos Estados Unidos um *Roadmap* nacional para o hidrogênio. Este documento descreve os principais desafios e sugere os caminhos para que o país alcance uma visão nacional para o hidrogênio. O *Roadmap* realça a necessidade do desenvolvimento paralelo de códigos e equipamentos padronizados para a integração da tecnologia com o sistema comercial de energia. Ademais, formaliza uma visão para a transição norte-americana para a Economia do Hidrogênio de 2030 em diante.

Destaca-se que, para os Estados Unidos, a partir de 2025 haverá uma aceleração na escolha pelo hidrogênio e pela célula a combustível. Essa afirmação se dá em virtude de os norte-americanos acreditarem que ambos estarão prontos para o mercado e que grande parte dos problemas relativos à definição de códigos, padrões e regulamentação do setor estará resolvida, bem como haverá uma infra-estrutura disponível, e os problemas de eficiência da tecnologia estarão superados. Segundo o programa norte-americano, até 2040 estabelecer-se-á a transição para o que denominam Economia do Hidrogênio.

Quanto aos demais programas desenvolvidos pelos países membros do HCG, estes não foram exaustivamente tratados nesta Tese, mas, no quadro 1.6, são resumidos os principais esforços de pesquisa. A maior parte dos projetos também está voltada às células a combustível PEMFC e SOFC, como é o caso da Austrália, Áustria, Bélgica, Finlândia, Portugal e Turquia. A Coreia destaca-se por possuir um programa coordenado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia para a produção do hidrogênio. A Dinamarca e a Suíça têm atividades de P&D para o hidrogênio e para

a célula. A Espanha e a Suécia priorizam a produção do hidrogênio a partir da eletrólise. A Noruega e os Países Baixos desenvolvem a produção do hidrogênio a partir do gás natural. Na Nova Zelândia a proposta é produzir o hidrogênio do carvão. No Reino Unido há um programa de pesquisa fundamental no campo de ciência de materiais, catalisadores e bioengenharia, com o envolvimento de pelo menos 22 universidades. A Grécia é o único país citado onde foi mencionada a realização de pesquisas para a produção do hidrogênio a partir do etanol, um caminho que o Brasil também está desenvolvendo.

QUADRO 1.6: Esforços de pesquisas por parte dos países pertencentes ao HCG

País	Pesquisas
Austrália	Em junho de 2004 o governo australiano reconheceu que os mais importantes usos em potencial para o hidrogênio no período de 2050 serão: transporte rodoviário, aplicações elétricas portáteis (computadores portáteis e telefones celulares) e geração distribuída.
Áustria	No período de 2001 a 2002 foi formulada uma estratégia para as células a combustível móveis e estacionárias. Dentre as recomendações, destacam-se a participação em programas internacionais semelhantes à IEA; e a criação de um <i>cluster</i> austríaco da célula a combustível formado por iniciativas de P&D públicas e privadas.
Bélgica	Dois estudos políticos estão em andamento: o desenvolvimento de ferramentas para avaliar o potencial do hidrogênio sustentável na Bélgica; e uma iniciativa para o futuro dos sistemas HFC até o ano 2050.
Coréia	Em 2000 o Ministério da Ciência e Tecnologia iniciou um Programa para Produção do Hidrogênio de alta eficiência.
Dinamarca	Tem uma comunidade engajada em atividades de P&D relacionadas ao hidrogênio e à célula a combustível. Em 2003 a Agência Dinamarquesa de energia publicou quatro caminhos prioritários para o setor de energia: (1) energia eólica; (2) biomassa; (3) fotovoltaica; e (4) célula a combustível.
Espanha	Áreas prioritárias: produção do hidrogênio a partir da água e a partir de fontes fósseis, com sequestro de CO ₂ ; armazenagem do hidrogênio no estado comprimido, líquido ou metais híbridos e estruturas de nanotubos de carbono; na distribuição e fornecimento final a utilização da existente e de novas infra-estruturas.
Finlândia	A estratégia para a célula a combustível está um pouco mais desenvolvida, com planos para focar em sistemas, demonstração e aplicação, construindo relacionamentos com a indústria para criar um grupo nacional e uma rede com iniciativas internacionais.
Grécia	A HELBIO, <i>Hydrogen and Energy Production Systems S.A.</i> , é uma indústria grega que planeja comercializar um sistema de processamento do combustível etanol para a produção do hidrogênio a partir da biomassa. O mercado alvo ainda é considerado pequeno, localizado em áreas onde a produção de etanol é mais barata (Brasil, Índia, China e Havaí)
Noruega	Com significativas reservas de gás natural, a produção do hidrogênio a partir do gás natural com a captura e armazenagem de CO ₂ é atualmente a maior prioridade.
Nova Zelândia	Projeto para o Hidrogênio que foi lançado em julho de 2002 por <i>CRL Energy Limited</i> e <i>Industrial Research Limited</i> . Visa demonstrar a produção de eletricidade a partir do carvão mediante o desenvolvimento de uma gaseificação integrada.
Países Baixos	Programas genéricos de energia, os principais programas apontam para o uso sustentável e limpo do gás natural e o uso de fontes renováveis.
Portugal	Atividades abrangem a produção e a armazenagem do hidrogênio, bem como P&D para a célula a combustível nas universidades e centros de pesquisa, alguns com cooperação da indústria.
Reino Unido	Pelo menos 22 universidades têm estado envolvidas em campos de pesquisa associados ao hidrogênio e grande parte dessas tem avançado em pesquisas para armazenagem do hidrogênio físico ou químico.
Suécia	A Agência Nacional de Energia Sueca é o principal ator governamental para os trabalhos com o hidrogênio e com a célula a combustível. O ano 2006 foi o marco para começar a se obter o hidrogênio e o oxigênio a partir da água, utilizando, para isso, a energia solar.
Suíça	O Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Energético considera o hidrogênio como a mais importante fonte secundária de energia para o futuro. As metas suíças, em longo prazo, incluem produzir hidrogênio regionalmente, utilizando hidroenergia/eletrolise ou radiação solar.
Turquia	Recentemente foi anunciada a Pesquisa Nacional e Prospectiva Tecnológica (visão 2023), mas não há um programa nacional dedicado ao desenvolvimento do hidrogênio e da célula a combustível.
União Européia	Planeja que o hidrogênio represente 2% do total de combustível utilizado nos transportes em 2015. Cerca de 2000 células a combustível veiculares são esperadas para circular na Europa entre 2012 e 2015, com a comercialização prevista para o período de 2015 a 2020. A meta também abrange instalar células estacionárias de 5 MW no período de 2005 e 2006; de 30 MW em 2006-2008; e 200 MW em 2009-2010.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de IEA (2004).

1.5 Considerações sobre o capítulo

Este capítulo descreveu o hidrogênio e a célula a combustível como as possibilidades de transição para um novo regime energético que poderá ocorrer com as alterações no regime dominante, atualmente fundamentado nos combustíveis fósseis e no motor de combustão. No novo regime, a produção do hidrogênio poderá ocorrer a partir das fontes renováveis, e também das fontes fósseis. Neste último caso há muitas incertezas quanto às possibilidades de minimizar as emissões de CO₂ e dar continuidade à descarbonização, o principal motivador para a Economia do Hidrogênio.

O atual regime teve seu início no século XVIII com a inserção dos combustíveis fósseis para a geração de energia, quando o carvão foi empregado para movimentar as máquinas a vapor. Foi nessa época que se baseou a teoria da descarbonização, destacando a inserção de fontes energéticas que apresentam menos carbono em sua composição. Após o carvão, o petróleo e o gás natural deram continuidade à descarbonização do regime energético. Em todos os casos ocorreu a redução gradativa das emissões de carbono, justamente porque cada uma das fontes apresenta menos carbono em sua composição. Porém, essa transição histórica não teve por objetivo reduzir as emissões de CO₂, as mudanças que ocorreram se deram em razão da disponibilidade das fontes.

Atualmente, a realidade observada diverge do contexto histórico citado, ou seja, as emissões de CO₂ são preocupações fundamentais nos debates sobre recursos energéticos. Preocupações que ocorrem devido à intensidade e às consequências das emissões de poluentes (mudanças climáticas e aquecimento global) e levam ao crescimento da mobilização internacional para minimizar os impactos oriundos do uso de combustíveis fósseis. Um marco histórico foi a crise do petróleo nos anos 1970, despertando a atenção de pesquisadores e da indústria quanto a alternativas que diminuíssem a dependência dos recursos fósseis, mas ainda sem priorizar o meio ambiente. Posteriormente, desde a década de 1990, cresceu o debate em torno das emissões provenientes dos transportes e da indústria, bem como as suas consequências, intensificando os estudos na área.

Dentre as soluções cabíveis para reduzir os problemas ambientais tem-se na Economia do Hidrogênio uma possibilidade que provavelmente estará associada ao uso das fontes fósseis e renováveis. Conseqüentemente, mesmo havendo dúvidas sobre o alcance do hidrogênio e da célula a combustível, está claro que no futuro a descarbonização norteará as escolhas energéticas.

A utilização das fontes fósseis para gerar hidrogênio é um tema polêmico em relação às emissões obtidas no processo produtivo, pois ainda não é possível provar que a transformação das fontes fósseis em hidrogênio poderá minimizar os impactos ambientais. Por esse motivo, muitos tratam a utilização dos não-renováveis apenas como uma fase transitória para a produção do hidrogênio até que se alcance o nível de desenvolvimento tecnológico necessário para a utilização exclusiva dos renováveis. Ressalta-se que essas fontes dependem também das condições climáticas e geográficas para identificar as propostas mais adequadas em cada país.

Assim, é possível concluir, até este ponto, que a Economia do Hidrogênio é dependente do desenvolvimento tecnológico para a geração e o uso de energia a partir das fontes renováveis, área que também necessita de avanços em P&D. Destaca-se que, para a produção do hidrogênio com base nas fontes fósseis também são necessários avanços em pesquisas, pelo menos até que seja comprovada a viabilidade técnica e econômica em relação à continuidade do uso destas fontes. Por conseguinte, a Economia do Hidrogênio caracteriza-se por diversas fontes para geração do combustível e um sistema de conversão complexo, além de adaptações na infraestrutura para armazenagem e distribuição do hidrogênio e políticas públicas para influenciar a mudança mediante incentivos e taxas para a indústria. As células a combustível são tratadas como o sistema de conversão mais adequado para o uso do hidrogênio, mas que ainda não estão plenamente desenvolvidas. No futuro, se as células virem a substituir os motores de combustão, que caracterizam o atual regime energético, talvez seja possível tratar essa mudança como um novo regime.

No contexto internacional, a IPHE influencia a formação dos conceitos para a Economia do Hidrogênio, isto é, mediante a organização dos comitês de trabalho promove discussões em âmbito internacional que estimulam os países participantes a iniciarem seus projetos. As participações do Brasil, da China e da Índia na IPHE são estratégicas. A China e a Índia representam economias em crescimento e com altos níveis de emissões de CO₂, o que torna importante o comprometimento desses países com as decisões internacionais a respeito do futuro paradigma energético. O carvão tem sido a fonte energética mais utilizada para a geração de energia elétrica nesses países. Já o Brasil tem despertado o interesse internacional porque tem 45% da matriz energética formada por fontes renováveis.

Quanto aos Programas Nacionais apresentados pela IEA, destacaram-se o Japão, o Canadá, a Alemanha, a França, a Itália e os Estados Unidos, que detêm os programas mais bem

estruturados dentre os filiados à IEA. Esses países têm a maior parte dos seus projetos focada em P&D para a célula a combustível, de modo que as mais citadas são a PEMFC, a MCFC e a SOFC. A indústria automobilística tem exercido grande influência na definição dos programas nacionais, pois nos EUA, na Itália, na França e no Japão são essas indústrias as responsáveis pelos maiores investimentos nas células veiculares e, conseqüentemente, são essas células que estão mais evoluídas tecnologicamente. Nesse sentido, o Brasil e outros países poderão desenvolver a infra-estrutura para receber os veículos. A Alemanha e o Canadá destacaram-se pelo investimento em projetos de demonstração de ônibus com células a combustível. Essa também é uma possibilidade para o Brasil, que é o maior fabricante de ônibus do mundo e já possui projetos de demonstração nessa área.

Finalmente, em consideração aos esforços internacionalmente empreendidos para o desenvolvimento tecnológico da célula a combustível, observa-se que já ocorreram muitos avanços em P&D, tanto para o hidrogênio quanto para a célula. Além disso, os países traçam perspectivas para o futuro e grande parte deles visualiza mudanças próximas de 2040. Nesse quadro, não é possível ignorar a importância e repercussão internacional do tema, tampouco não é possível ignorar as limitações do atual regime energético.

O próximo capítulo aborda as trajetórias e os paradigmas tecnológicos com a finalidade de levantar a discussão a respeito de um novo regime energético. As possibilidades de transição são discutidas e estão ilustradas em estudos prospectivos sobre o tema. O capítulo também trata dos obstáculos para a mudança.

CAPÍTULO 2: A TRANSIÇÃO PARA UM NOVO REGIME ENERGÉTICO

O propósito deste capítulo é apresentar as condições para que o hidrogênio e a célula a combustível formem um novo regime energético. Conceito proveniente da teoria evolucionista ou neo-shumpeteriana, que é empregada como ferramental para sustentar a argumentação favorável às mudanças no regime energético. Inicia-se o capítulo descrevendo a teoria do fluxo circular a fim de demonstrar que as mudanças na economia mundial podem apresentar movimentos cíclicos, mas que somente as mudanças descontínuas ocasionam rupturas nesse fluxo e levam ao desenvolvimento tecnológico. Esse conceito de ciclos de mudança, associado à importância dada pela teoria evolucionista ao progresso tecnológico, leva a entender que as mudanças são inerentes ao processo de desenvolvimento e que, no futuro, a configuração do regime energético será diferente da atual, o que poderá, ou não, representar um novo paradigma. Assim, poucas vezes as mudanças tecnológicas levam a um novo paradigma.

A transição para um sistema sustentável de energia é complementada pela apresentação de cenários para o setor energético, desenvolvidos pela Shell, pelo *Hydrogen Co-ordination Group (HCG)* e pela *International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE)*. Além desses, ainda são abordadas duas perspectivas teóricas para o futuro energético, as quais indicam que haverá dois caminhos possíveis. O primeiro é o da continuidade do atual regime e o segundo, o da descontinuidade. Esse último se apóia em estudos exploratórios que consideram o hidrogênio e a célula a combustível como alternativas para o futuro, levando à descarbonização. Porém, destaca-se que existem outras possibilidades para alcançar a descarbonização, como a intensificação do uso das fontes renováveis, a adoção de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), a negociação dos créditos de carbono e o Seqüestro e Armazenamento de Carbono (SAC).¹⁸. Procura-se ainda descrever que no futuro essas possibilidades citadas poderão se estabelecer simultaneamente.

O capítulo é finalizado com um levantamento teórico que trata dos obstáculos para Economia do Hidrogênio, isto é, obstáculos para a constituição da Economia do Hidrogênio.

¹⁸ SAC é um meio de aprisionar o CO₂ de combustíveis fósseis, antes ou depois da queima, e “armazená-lo” (descartando-o efetivamente) no mar ou abaixo da superfície da terra (CORDEIRO, 2007, p. 1).

2.1 Trajetórias tecnológicas

Optou-se por abordar o conceito de trajetórias tecnológicas com o propósito de delimitar as possíveis mudanças tecnológicas que podem alterar a estrutura de um mercado, especialmente no setor energético. As mudanças tecnológicas serão aqui relatadas como modificações complexas introduzidas na tecnologia e nas variáveis relacionadas ao seu uso. Para tanto, inicia-se a revisão descrevendo conceitos-chave relativos à mudança tecnológica, de modo a caracterizar a teoria evolucionista ou neo-schumpeteriana.

A metáfora evolucionista é muito empregada pelos economistas para descrever como a estrutura de uma economia muda ao longo do tempo mediante o aprendizado dos indivíduos e das organizações. O pioneiro nesse conceito foi Kondratieff com a Teoria do Fluxo Circular,¹⁹ que pressupunha que em períodos de crescimento econômico os preços das matérias-primas subiam rapidamente e o inverso acontecia em períodos de crise.

Ainda a respeito da Teoria do Fluxo Circular,²⁰ Schumpeter (1912) argumentou que ocorreria uma repetição contínua do processo produtivo com adaptações às mudanças externas. Para este autor, o capitalismo somente aconteceria de acordo com o fluxo circular se não existissem as inovações. Complementou que as mudanças econômicas não podem ser compreendidas mediante a análise do fluxo circular, pois, para ele, o fluxo circular busca o equilíbrio econômico. No desenvolvimento, a idéia central é de descontinuidade, abrangendo questões complexas no seu entorno, que não poderiam ser alcançadas mediante a incorporação de mudanças sucessivas.

O conceito Schumpeteriano de inovação é o alicerce da teoria evolucionista. Propõe-se à realização de inovações criativas, defendendo a destruição dos pressupostos que levem à simples continuidade. Schumpeter acreditava que a teoria econômica tradicional poderia estar

¹⁹ A teoria do fluxo circular se caracteriza por um sistema de reprodução econômica em equilíbrio estático, exprimindo sua visão das relações e dos conceitos básicos de uma economia de mercado. Está fundamentada na propriedade privada, na livre empresa, na concorrência livre e pura, e na ausência de incerteza quanto ao futuro. O fluxo circular tende ao equilíbrio geral dos agentes econômicos, no qual não haveria estímulo ou motivo para mudar posições, salvo pela necessidade de uma suave adaptação e alterações contínuas e limitadas nos dados do sistema. (POSSAS, 1987, p. 170)

²⁰ O fluxo circular dos períodos econômicos é o mais notável dos ritmos econômicos, marcha relativamente rápido e como em todo período econômico ocorre essencialmente a mesma coisa, o mecanismo de troca econômica se opera com grande precisão. Os períodos econômicos passados governam a atividade do indivíduo, não apenas porque o ensinaram severamente o que deve fazer, mas também por outra razão: em cada período econômico todos vivem de bens produzidos no período precedente (SCHUMPETER, 1912, p. 11)

excessivamente relacionada ao fluxo circular de inovações, portanto sugeriu a destruição deste fluxo mediante mudanças descontínuas. Segundo a concepção de Schumpeter é mediante a quebra da combinação vigente que podem surgir idéias capazes de levar a economia ao desenvolvimento.

O desenvolvimento foi definido pelo autor como a realização de combinações novas, o emprego diferente da oferta dos meios produtivos existentes no sistema econômico. Consiste primariamente em empregar recursos diferentes de uma maneira diferente, em fazer coisas novas com eles independentemente de que aqueles recursos cresçam ou não.

Tigre (2005) salientou o aprofundamento que Schumpeter fez da questão atribuindo a ocorrência de ciclos ao processo de difusão de grandes inovações, como o que aconteceu com a máquina a vapor e a eletricidade. Nesses casos as inovações descontínuas promoveram ciclos que se caracterizaram pelo sucesso do pioneirismo que pode gerar novos empregos e investimentos que favorecem o desenvolvimento econômico, mas, após o término do uso inicial, ocorre o esgotamento da exploração das novas tecnologias. Tigre (2006) mencionou Freeman como o primeiro a resgatar esta contribuição de Schumpeter, ao mostrar como a difusão de inovações está no centro dos movimentos cíclicos da economia mundial. Freeman e Soete (1997) acrescentaram que após os ciclos da máquina a vapor e da eletricidade, um terceiro ciclo associado ao Fordismo e um quarto à difusão da microeletrônica. Mais recentemente propuseram um próximo ciclo a ser norteado pelas tecnologias voltadas ao meio ambiente e à saúde, quando a energia será predominantemente renovável, em substituição ao petróleo e ao gás natural.

As inovações cíclicas abordadas por Schumpeter e por Freeman apresentam trajetórias tecnológicas que abrangem desde o lançamento da tecnologia, sua posterior difusão, até a decadência. Este conceito foi abordado inicialmente por Nelson e Winter (1982), mediante a aplicação da teoria evolucionista, bem como por Dosi (1982), que atribui a cada uma das inovações cíclicas a constituição de um novo paradigma tecnológico. Estes três temas, trajetórias tecnológicas, teoria evolucionista e paradigmas tecnológicos, são descritos a seguir.

Sobre a abordagem evolucionista Nelson e Winter têm no ambiente de seleção a determinação da mudança técnica ao longo do tempo. Esses autores argumentam que a condição da indústria em cada período lança a semente para a sua condição no período seguinte, enfatizando que o ponto essencial é a interação entre os processos de busca e seleção de novas tecnologias.

No ambiente de seleção podem estar presentes, além das mudanças técnicas, também as questões econômicas e institucionais que, de acordo com a teoria evolucionista, levam a mudanças graduais e cumulativas em determinadas trajetórias, de tal modo que mudanças no ambiente de seleção podem levar o sistema a desenvolver um novo rumo (KEMP e SOETE, 1992; KEMP, 1997). Há exemplos de fatores que podem compor o ambiente de seleção no setor de combustíveis. São eles os efeitos econômicos negativos na balança comercial com a importação do petróleo, a perspectiva de falta do petróleo, o recrudescimento da legislação ambiental na atividade de exploração e as restrições ambientais em sua utilização (DUNHAM, BOMTEMPO e ALMEIDA, 2006).

A teoria evolucionista vem sendo empregada para auxiliar na compreensão da dinâmica evolutiva das inovações. Sua utilidade está na análise de uma grande amplitude de fenômenos associados às mudanças econômicas, que podem ser decorrentes da demanda de produtos ou condições de fornecimento, ou até mesmo de inovações em parte das firmas. O conceito central da teoria evolucionista está no processo pelo qual os padrões de comportamento das firmas e resultados de mercado são o tempo todo conjuntamente determinados (NELSON e WINTER, 1982, KEMP, 1997).

Nelson e Winter (1982) destacaram novamente a importância da mudança econômica. Citaram que dentre as maiores tarefas intelectuais da história esta é a merecedora de maior atenção e possibilita o entendimento da complexidade da mudança cumulativa na tecnologia que tem transformado a situação humana em curso. Para os autores, o que a condição da indústria determina em um dado período é transportado para o período seguinte, ou seja, as mudanças são progressivas, apresentam um desenvolvimento gradual. Nesse aspecto, defendem que o novo não é fundamentalmente melhor que o velho e os resultados atuais não são meramente uma nova tecnologia, mas também reforçam conhecimentos e formam bases para serem usados amanhã. Segundo os autores, em muitos casos as trajetórias e as estratégias para um avanço tecnológico em certo regime estão associadas a melhorias em outros aspectos que podem ser complementares, como, por exemplo, a exploração da economia de escala que poderia ocorrer na indústria química e na de geração de energia. Finalmente, citaram que o estudo dos ciclos dos produtos e trajetórias dentro de classes de tecnologia é útil para as organizações pensarem sobre certas irregularidades e padrões do progresso tecnológico. Sustentaram que em um determinado momento os esforços

de P&D são focados em uma classe de tecnologia e ao longo da história existirão tendências à sua queda e ascensão.

Além da teoria evolucionista, outra abordagem empregada para compreender as trajetórias tecnológicas foi proposta por Dosi (1982), para quem um regime tecnológico varia de acordo com a estrutura do mercado. Segundo Dosi, quando determinada tecnologia assume a posição de eixo condutor em um dado contexto socioeconômico pode ser adotada como um paradigma tecnológico. Em uma analogia com a definição de paradigma científico proposta por Kuhn, Dosi (1984) definiu paradigma tecnológico como um “modelo ou padrão” de solução para problemas tecnológicos selecionados. Para Dosi, um paradigma tecnológico envolve fortes prescrições quanto às direções de mudanças técnicas para perseguir e para negligenciar, e teria poderoso efeito de exclusão: os esforços e a imaginação tecnológica de engenheiros e organizações estariam focados em direções precisas, desconhecendo outras possibilidades. O autor denomina trajetórias tecnológicas as diferentes possibilidades de escolha tecnológica durante o desenvolvimento de um paradigma. Verspagen (2005) complementou que, além das questões citadas, o sucesso de um paradigma depende também de fatores sociais como as capacidades e habilidades da força de trabalho que vai utilizar o maquinário, bem como a influência de fatores culturais.

Como exemplos de paradigmas tecnológicos podem ser citados o motor de combustão interna, a química sintética baseada no petróleo e a indústria de semicondutores. Assim, uma análise mais aprofundada em torno dos padrões de trocas técnicas sugere a existência de paradigmas e trajetórias, com diferentes níveis de generalidade, em diversos setores industriais. A hipótese crucial é que as atividades inovadoras são fortemente seletivas e terminam em direções muito precisas e cumulativas (DOSI, PAVITT e SOETE, 1993).

A indústria de semicondutores caracteriza o último dos paradigmas tecnológicos registrados e, no presente, discute-se em que setor poderá ocorrer um próximo paradigma, que poderá acarretar em mudanças institucionais expressivas e afetar o estilo de vida da sociedade moderna, e de algum modo promover uma revolução no atual paradigma. Sugere-se que esse tipo de mudança não acontece de um dia para o outro, a construção provavelmente se dará em longo prazo até que o ambiente de seleção permita ou apóie a mudança.

Freeman e Perez (1988) auxiliam no entendimento do tema ao abordarem certos tipos de mudanças técnicas, definidas como mudanças em “paradigmas tecno-econômicos”. Destacam

que essas mudanças têm gerado conseqüências em todos os setores da economia e sua difusão é acompanhada por uma crise de ajustamento, na qual alterações sociais e institucionais são necessárias para levar a uma melhor combinação entre a nova tecnologia e o sistema de gestão social da economia, ou regime de regulação. As crises de ajustamento acontecem quando surge um novo paradigma, e, por conseguinte, podem ser entendidas como o processo de adaptação da nova tecnologia que apresenta características distintas daquelas que vigoravam no paradigma anterior. Assim, certas capacidades que eram importantes no paradigma anterior talvez não sejam necessárias no próximo, pois perdem seu valor. São necessárias novas competências: as competências do passado são desvalorizadas (FREEMAN e PEREZ, 1988; PIORE e SABEL, 1984). Perez apud Freeman (1987) relatou que as crises representam períodos de *mismatch* entre a emergência de um novo paradigma. Essa pode ser a realidade atualmente observada para os motores de combustão interna, que apresentam incertezas quanto à sua continuidade. Outro ponto que pode caracterizar uma crise de ajustamento é a saturação parcial na demanda de um padrão antigo de bens combinada com o desenvolvimento de novos produtos e serviços.

Em contrapartida, há alguns fatores-chave que conformam o ambiente de seleção para os novos paradigmas tecno-econômicos, tais como: a percepção da queda dos custos relativos; a avaliação do fornecimento para longos períodos; o potencial de uso em produtos e processos do sistema econômico; e o equilíbrio entre as mudanças técnicas e organizacionais. (FREEMAN, 1987).

Para Freeman e Perez (1987), um novo paradigma emerge em um mundo ainda dominado pelo paradigma antigo e começa demonstrando vantagens comparativas primeiramente em um ou em poucos setores. Para os autores, as mudanças em “paradigmas tecno-econômicos” exerceriam influências no comportamento da economia inteira, podendo ser chamadas de revoluções tecnológicas. Não somente levam ao aparecimento de uma nova amplitude de produtos, serviços sistemas e indústria, como também afetam direta ou indiretamente quase todas as outras esferas econômicas. Nesse contexto, as mudanças em um paradigma tecno-econômico são baseadas na combinação de inovações radicais em produtos e em processos. Ocorrem raramente (quicá duas vezes em um século) e determinam as mudanças sociais e institucionais. Os autores concluem que, tanto no setor produtivo quanto nos serviços, este é um difícil processo de ajustamento, envolvendo uma revolução cultural e a necessidade de equipar todos os setores.

Conclui-se que a teoria evolucionista traz a idéia de progresso, partindo do novo paradigma em relação ao paradigma anterior, mas quando surge um novo paradigma?

Com base nas informações levantadas até aqui foi possível perceber que este é um fenômeno complexo que dependerá, por exemplo, do grau de comprometimento em relação à trajetória e paradigma anterior. Se o atual conjunto de soluções para um determinado problema técnico, social ou econômico satisfaz as expectativas da sociedade, não há motivos que promovam a mudança. Entretanto, o progresso pode ser derivado de fatores institucionais que comprovem a maior eficiência das novas soluções ou a redução dos efeitos negativos observados no modelo anterior.

De acordo com Freeman (1974), a inovação não pode ser ignorada, pois é condição essencial ao progresso econômico e um elemento crítico na competição entre as empresas. Para esse autor, a propriedade fundamental da inovação está em permitir ao homem fazer coisas que até o momento não eram possíveis; permite modificar para o bem ou para o mal a qualidade de vida da sociedade.

Ainda sobre o progresso, ROSENBERG (1992) destacou que para os historiadores da ciência parece suficiente focar-se no progresso da ciência, mas acrescentou que, para os economistas e historiadores de negócios, se torna essencial identificar as complexidades do processo de desenvolvimento, compreendendo os desenhos de novos produtos, a realização de testes, a construção de protótipos, a experimentação em plantas-piloto, a invenção de novos processos de manufatura, entre outros. A complexidade citada por ROSENBERG teve por base as concepções de Nelson e Winter que sustentam a possibilidade de explicar o progresso tecnológico contínuo mediante a constatação de que os projetos de amanhã são independentes do que acontece hoje, mas o aprendizado adquirido nos projetos atuais pode levar a um elevado padrão de sucesso para os esforços futuros.

O aprendizado do desenvolvimento tecnológico e a teoria evolucionista demonstram que, apesar da autonomia da ciência para escolher os seus projetos, estes geralmente estão fundamentados nos problemas observados no paradigma vigente. A disponibilidade da inovação pode representar um progresso tecnológico e até mesmo conduzir a um novo paradigma. Isso dependerá de o contexto econômico abrir oportunidades para novos setores, ou provocar mudanças no atual estilo de vida da sociedade (DOSI, 1984; FREEMAN, 1987; FREEMAN e PEREZ, 1988). Freeman argumenta que quando um novo paradigma tecno-econômico se

estabelece, surge um novo regime tecnológico que abrangerá um novo contexto histórico e permanecerá enquanto for útil ou até que ocorra uma nova ruptura, quando será superado por uma evolução na forma anterior de tecnologia.

Freeman e Perez (1988) sugeriram algumas características relativas ao novo paradigma tecno-econômico, tais como: novas práticas organizacionais; novas habilidades na força de trabalho; novo mix de produtos; novas tendências para as inovações; novos padrões de localização para os investimentos nacionais e internacionais; uma onda particular de investimentos em infra-estrutura; tendência para que as firmas pequenas e inovadoras entrem rapidamente e formem novos setores na economia; tendência de as firmas grandes se concentrarem em setores da economia em que os fatores chave são produzidos e mais utilizados; novos padrões de consumo de bens e serviços e novos tipos de distribuição e comportamento do consumidor.

Em 1997, Kemp também utilizou as expressões trajetória e regime tecnológico para ilustrar as evoluções ao longo do tempo, do mesmo modo que Nelson e Winter, Dosi e Freeman. Segundo Kemp, um regime tecnológico não implica um *design* único. Usualmente consiste em um grupo de configurações, com formas básicas de competição, atividades de pesquisa e agenda de desenvolvimento de firmas individuais ou unidades de negócio. Como exemplos, o autor citou a engenharia de combustão interna e a indústria de semicondutores.

A respeito do motor de combustão interna, Mowery e ROSENBERG (2005) ilustram que o automóvel foi uma inovação transformadora única, pois trouxe drásticas alterações no padrão de uso do solo. Modificou completamente o ritmo da vida urbana, incluindo a organização espacial do trabalho e da residência, os padrões de socialização, recreação e compras. Os mesmo autores expõem que, além dos automóveis e aviões comerciais, o motor de combustão transformou a agricultura, contribuiu para o transporte de cargas em caminhões e para uma considerável reorganização do comércio varejista.

Outro fator apontado por Mowery e ROSENBERG (2005) é que o posicionamento e a direção de uma inovação tecnológica geralmente estão relacionados com a velocidade com que um *design* dominante emerge, com a redução de seus custos e com a diminuição das limitações sistêmicas. Com o mesmo pensamento, Mytelka (2003) citou que os movimentos da curva de redução dos custos dependerão da formação de alianças e da coordenação necessária para que a

integração tecnológica aconteça. Esses fatores permitirão o desenvolvimento da economia de escala, um pré-requisito para a redução dos custos.

Nesse aspecto Mowery e ROSENBERG (2005) expõem que quando as inovações tecnológicas são introduzidas ou patenteadas, ainda são muito diferentes da forma que tomam quando atingem ampla difusão. Como exemplo de evolução em uma tecnologia Kemp (1997), assim como Mowery e ROSENBERG, mencionou o motor de combustão, com constantes melhorias no *design* e na engenharia. Kemp citou ainda os avanços nos materiais, equipamentos, adaptações organizacionais, baixos preços dos combustíveis e a rede construída em torno da engenharia de combustão (distribuição do petróleo, infra-estrutura, treinamento dos mecânicos etc). Kemp empregou o termo “*dynamic scale and learning effects*” para tratar de melhorias evolucionistas nas características de determinada tecnologia, levando à redução dos custos em função da produção em escala e da curva de aprendizado.

Em 1998 Rogner ressaltou que as tecnologias que são receptivas à padronização e à exploração de economia de escala tendem a seguir padrões “*learning-by-doing*”; por meio dele aumentam a produtividade e assim baixam custos de produção, resultando em uma função cumulativa ou estágio do ciclo de vida.²¹ A curva de aprendizado está relacionada com a experiência e pode ser o caminho mais previsível para alcançar a economia de escala. Com o tempo, a tecnologia se torna conhecida e a demanda aumenta. Conseqüentemente, a produção cresce e se obtém ganho em escala.

As células a combustível também podem ilustrar essa questão. Rogner (1998) citou que a curva de aprendizado para as células a combustível ainda estaria nos estágios iniciais de seu ciclo de desenvolvimento, com uma produção caracterizada por pouca economia de escala, pouca padronização e mão-de-obra altamente especializada. Para o autor, a entrada da célula a combustível nos transportes certamente deverá ocorrer mediante múltiplas curvas de aprendizado, representando várias células a combustível, sistemas, integração de veículos, entre outros. Assim, a noção de comercialização deve considerar não apenas o custo unitário da tecnologia, mas também a inerente eficiência superior das células a combustível, bem como o alto custo do hidrogênio.

²¹ O ciclo de vida representa as etapas interligadas de produtos e serviços, desde a extração de recursos naturais até a disposição final. Um exemplo pode ser a avaliação do ciclo de vida que tem sido utilizada para realizar comparações entre os veículos com a célula a combustível PEMFC e os veículos tradicionais com combustão interna e movidos a gasolina (GRANOVSKII, DINCER e ROSEN, 2006).

A célula a combustível tem sido pesquisada como um substituto para o motor de combustão interna, assim como o hidrogênio é considerado um substituto para os combustíveis fósseis. Dessa maneira, a teoria evolucionista contribui para entender a questão. Conforme visto no capítulo anterior, a tecnologia da célula a combustível não é nova, mas, nas últimas décadas, avanços tecnológicos, juntamente com os interesses econômicos e as necessidades de reduzir as emissões que dominam o ambiente de seleção, têm aproximado a célula de um novo paradigma tecno-econômico. Essa é uma realidade que apresenta muitas controvérsias, pois existem possibilidades para o futuro que poderão fazer maior proveito da trajetória tecnológica do motor de combustão, como o uso do biocombustível (biodiesel e etanol). No contexto citado, algumas questões podem ser levantadas. A primeira é se haverá um paradigma capaz de substituir o paradigma constituído pelo motor de combustão. A segunda questão diz respeito aos elementos do ambiente de seleção que pressionarão essa mudança, dentre eles os custos e benefícios para as indústrias e para os governos, a influência dos consumidores e regulamentações. Uma terceira questão trata do hidrogênio como combustível. Se gerado por fontes fósseis, o seu uso nas células a combustível poderá não representar um novo paradigma. A quarta questão se refere ao emprego de fontes renováveis, dentre elas a biomassa, bem como a energia eólica e solar para a produção do hidrogênio por meio da eletrólise da água, e se o uso dessas fontes nas células a combustível representará um novo paradigma.

Assim como a célula a combustível, a máquina a vapor e o motor de combustão já foram invenções que levaram um longo prazo para se tornarem prontamente disponíveis para a sociedade. Inicialmente eram tecnologias que despertavam a curiosidade de cientistas e alguns visionários, que imaginavam a provável ruptura no estilo de vida da sociedade, caso suas idéias se tornassem realidade. De fato, os paradigmas tecnológicos reconhecidos pela literatura representaram grandes revoluções para os transportes, para o fornecimento de energia e para os sistemas de comunicação, mas estas soluções não são definitivas, sendo essa a premissa da teoria evolucionista. Considera-se que, apesar das tecnologias tratadas nesta Tese não serem novas, as pesquisas se intensificaram na última década em diversos países desenvolvidos e em desenvolvimento como proposta para um novo regime energético. De qualquer forma, os pesquisadores relatam a importância em atingir a economia de escala para que um dia seja possível alcançar a comercialização desses produtos mediante a disponibilização de uma infraestrutura adequada e preços competitivos. Nesse aspecto a trajetória tecnológica para o

hidrogênio e para a célula a combustível poderá iniciar-se quando as fontes renováveis alcançarem maturidade tecnológica e economia de escala, podendo então ser empregadas para gerar o hidrogênio, bem como superar os combustíveis fósseis mediante um ambiente de seleção favorável aos renováveis, privilegiando fontes menos poluentes e com menos incertezas quanto à continuidade no fornecimento. Por fim, entende-se que avançar ao longo de uma trajetória significa reduzir o *gap* entre a dimensão técnica e a dimensão econômica das tecnologias em investigação, processo que pode levar ao aprendizado tecnológico e, conseqüentemente, à economia de escala.

A próxima seção fortalece a abordagem evolucionista para o regime energético mediante a descrição de estudos prospectivos para o setor e as alternativas para o regime energético.

2.2 Possibilidades de transição para um novo regime energético

Idealizar o futuro é um exercício de aprendizado praticado por muitos especialistas da área energética, que prospectam tanto para as possibilidades de escolha em relação às fontes energéticas quanto para os sistemas de conversão. Assim, há inúmeras especulações a respeito do que poderá ocorrer no setor energético durante o século XXI.

Nesta seção, tratar-se-á de duas possibilidades, a primeira é a continuidade do regime energético vigente, com crescente, porém pouco significativa participação dos recursos renováveis, e com a adoção de medidas para minimizar os impactos ambientais. A segunda opção surge como proposta para a mudança de regime, o cenário da descontinuidade, visto como uma alternativa de longo prazo e caracterizado pela presença de inovações radicais. Essa possibilidade contempla o hidrogênio e a célula a combustível.

2.2.1 Estudos prospectivos para o setor energético

Mediante a revisão de estudos prospectivos da área energética retoma-se aqui a possibilidade de geração do hidrogênio a partir das fontes energéticas não-renováveis, em curto prazo, e renováveis, em longo prazo, como alternativas para produzir o hidrogênio e assim promover o desenvolvimento de um novo paradigma energético.

Em grande parte dos estudos que tratam de perspectivas energéticas, até mesmo naqueles que consideram a continuidade do paradigma dos combustíveis fósseis, destaca-se que os combustíveis renováveis terão maior participação no futuro, sendo que uma das possibilidades

está no hidrogênio e nas células a combustível. A abordagem prospectiva tratada aqui visa demonstrar que as possibilidades de transição energética estão sendo documentadas e que o hidrogênio está presente em muitas opções.

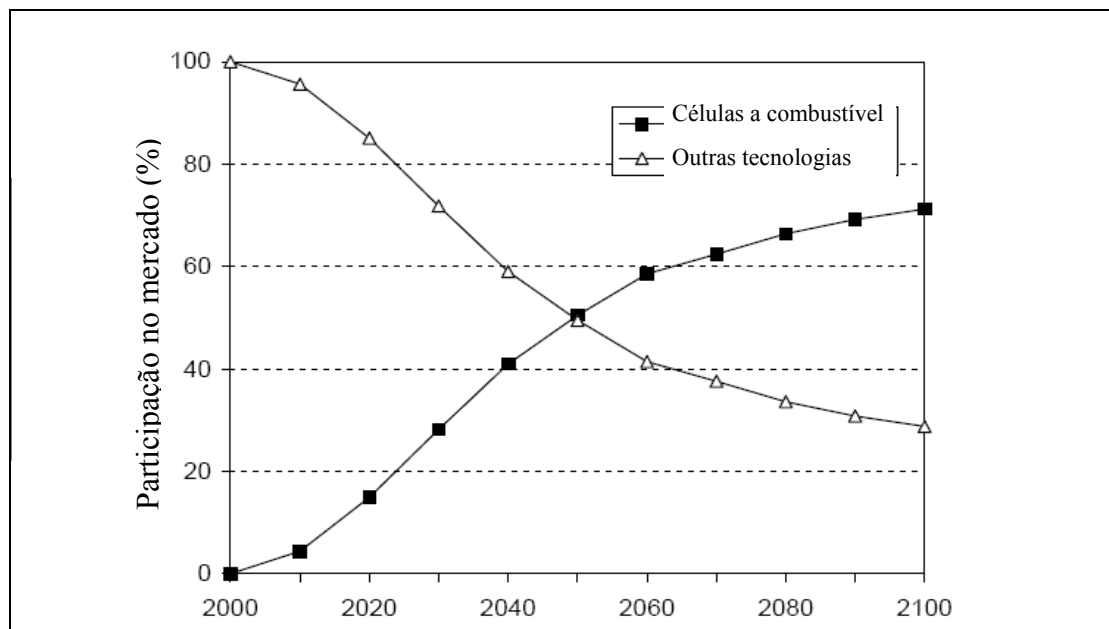
De maneira geral, há certa tendência de os estudos mais tradicionais procurarem demonstrar a continuidade dos atuais padrões energéticos e desconsiderarem a possibilidade de esgotamento dos combustíveis fósseis para os transportes. Mesmo assim aceitam que provavelmente o gás natural e o petróleo precisarão estar combinados com outras formas de energia, preferencialmente renováveis (HORTA NOGUEIRA, 2002).

A fim de ilustrar algumas das possibilidades energéticas para o futuro, esta seção sintetiza cinco estudos prospectivos e enfatiza, além dos cenários de Continuidade - os quais preconizam poucas mudanças em relação ao paradigma dominante - as perspectivas que tratam de mudanças descontínuas na estrutura energética.

Os estudos são dispostos na seguinte ordem: primeiramente, são apresentados dois gráficos descritos por Barreto, Makihiro e Riahi (2003). Em seguida, uma abordagem teórica elaborada por Nakicenovic (1993). No terceiro estudo, são apresentados dois cenários desenvolvidos pela Shell. O quarto estudo foi descrito pela IEA, que desenvolveu quatro cenários para o ano 2050. Finalmente, o quinto estudo citado também foi elaborado na estrutura da IEA, especificamente pelo *Hydrogen Coordination Group* (HCG).

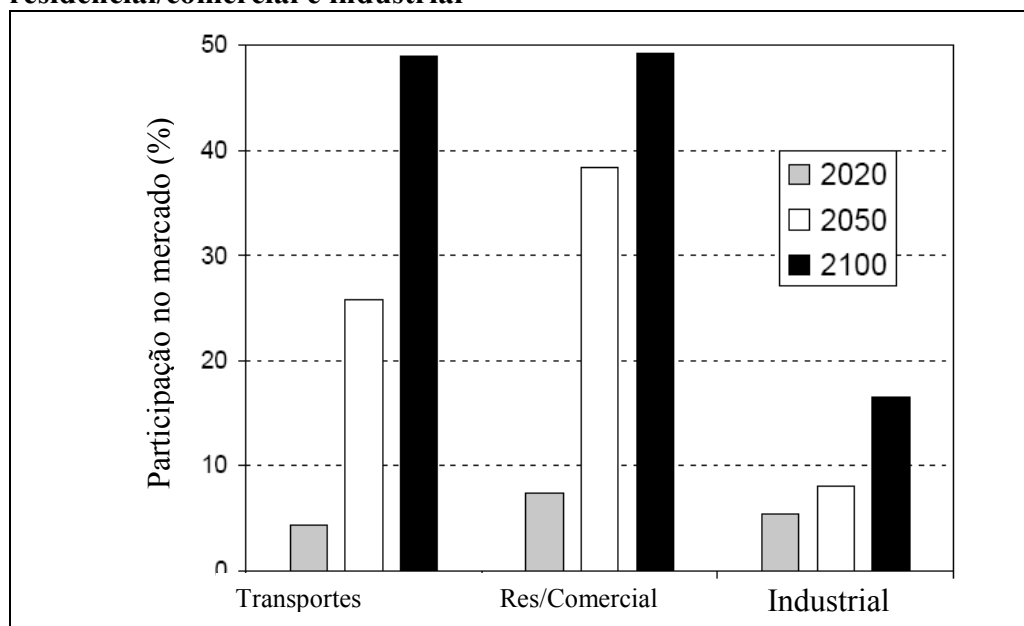
O primeiro estudo, elaborado por Barreto, Makihiro e Riahi (2003), destaca a presença do hidrogênio e da célula a combustível nas análises sobre o futuro regime energético. A Figura 2.1 representa um cenário para o setor de transportes durante o século XXI. Nessa figura é apresentada a evolução na participação de mercado das células a combustível *versus* outras tecnologias agregadas presentes. Segundo o cenário previsto, a célula a combustível representará 51% do mercado de transportes no ano 2050 e 71% no ano 2100. Nesse mesmo período, para as aplicações estacionárias, a penetração do hidrogênio nos mercados comercial e residencial também poderá ser substancial. As células a combustível estacionárias poderão alcançar 38% do consumo nos setores industrial e comercial até o ano 2050, crescendo até 50% até o final do século XXI (Figura 2.2) (BARRETO, MAKIHIRA, RIAHI, 2003).

FIGURA 2.1: Evolução da participação das células a combustível no mercado



FONTE: Barreto, Makihiro, Riahi (2003), adaptada pela autora.

FIGURA 2.2: Participação global do hidrogênio nos setores de transporte, residencial/comercial e industrial



FONTE: Barreto, Makihiro, Riahi (2003), adaptada pela autora.

No segundo estudo, elaborado por Nakicenovic (1993), foi argumentado que o futuro regime energético poderá apresentar basicamente dois tipos de estratégias tecnológicas, distinguidas mediante as possibilidades de redução ou estabilidade dos níveis de emissão de CO₂. A primeira estratégia, denominada incremental, enfatiza melhorias na eficiência energética e apresenta custos mais baixos, porque não requer mudanças na trajetória tecnológica. A segunda estratégia é a radical, inclui mudanças no design e em práticas operacionais das tecnologias. Nakicenovic se referiu a essas mudanças como mudanças de trajetórias. Para o autor, ênfase deveria ser dada aos sistemas de energia que entregam energia livre de carbono aos usuários finais. Finalmente, Nakicenovic afirma que o que está mudando na área energética é o aumento do reconhecimento de que as energias fósseis são mais abundantes do que as pessoas acreditavam na década de 1980 e que o limite para o consumo energético não devem ser os recursos, mas o meio ambiente.

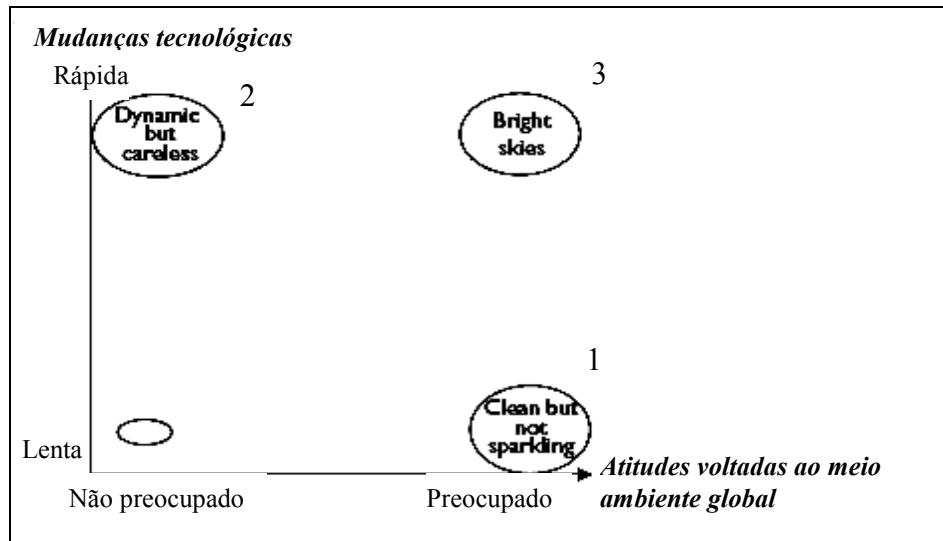
O terceiro estudo, elaborado pela Shell, é condizente com a proposta anterior, tendo sido propostos dois cenários, “Continuidade” e “Espírito da nova era”. O cenário da continuidade mantém as tendências históricas no futuro, propõe a continuidade do paradigma energético dominante. Os resultados sugerem que as tendências no cenário de Continuidade em uma política energética não levariam a uma substituição do paradigma atual pelo hidrogênio e pela célula a combustível (IEA, 2005).

O segundo cenário elaborado pela Shell, “O espírito da nova era”, é mais otimista em relação a um futuro com rupturas tecnológicas no regime energético. Propõe que o desenvolvimento inicial da célula a combustível acontecerá para aplicações estacionárias e aproveitará a infra-estrutura das Redes de distribuição do gás natural. O setor de transportes começará a se desenvolver em 2005, logo, em 2025 um quarto da frota dos veículos dos países da OCDE e 50% dos carros novos serão movidos a célula a combustível. Nos países em desenvolvimento esse número corresponderá a 25% dos veículos. O desenvolvimento também continuará no setor residencial, para geração de eletricidade e aquecimento da água. (IEA, 2003). Aos poucos, o hidrogênio deixará de ser produzido a partir dos combustíveis fósseis; após 2030 as energias renováveis e a energia nuclear serão empregadas para produzir hidrogênio (EXPLORING THE FUTURE, 2001; IEA, 2003).

O quarto estudo foi proposto pela IEA que desenvolveu quatro cenários para o ano 2050. O primeiro deles considera a continuidade e as mudanças incrementais, os outros três são

exploratórios. Os três cenários exploratórios diferenciam-se dada a ênfase colocada na preocupação com o meio ambiente e na taxa de mudanças tecnológicas (figura 2.3). O cenário mais próximo ao conceito de descarbonização foi denominado *Bright Skies*, apresentando níveis elevados de inovação tecnológica e de mudanças ambientais.

FIGURA 2.3: Três cenários exploratórios



FONTE: IEA (2003)

O cenário 1 (*Clean but not Sparkling*) tem como ponto inicial um aumento significativo nas atitudes relativas às preocupações com o meio ambiente, mas falha na criação de condições tecnológicas para a manutenção da sustentabilidade em longo prazo, como as tecnologias que permitam a descarbonização do sistema sem sacrificar o crescimento econômico.

O cenário 2 (*Dynamic but Careless*) caracteriza-se por mudanças tecnológicas mais dinâmicas e baixas prioridades em relação à mitigação das mudanças climáticas. Além disso, há uma crença generalizada que o rápido progresso tecnológico cuidará de todos os problemas ambientais sem necessidade de políticas intervencionistas (IEA, 2003).

O cenário 3 (*Bright skies*) é o mais favorável, pois visa encontrar condições para sustentabilidade e apresenta os mais baixos riscos dentre os três cenários em relação à segurança para o fornecimento e à proteção ambiental. Este cenário é caracterizado por mudanças tecnológicas rápidas e fortes preocupações com o meio ambiente global. Foi citado que o hidrogênio poderá ser produzido próximo dos pontos de consumo, particularmente importantes

nos primeiros estágios de transição para a Economia do Hidrogênio, sendo desnecessárias as grandes Redes de distribuição para longas distâncias (IEA, 2003).

O quinto estudo também foi elaborado na estrutura da IEA, desta vez pelo *Hydrogen Coordination Group* (HCG) com o suporte dos seguintes países membros do HCG: Austrália, Áustria, Canadá, França, Alemanha, Japão, Países Baixos, Espanha, Reino Unido, e Estados Unidos (IEA, 2005). Foram propostos dois cenários. O primeiro, assim como outros já apresentados, tende para a continuidade, foi denominado BASE. Já a possibilidade mais otimista para um regime energético que considere a Economia do Hidrogênio está no cenário denominado MAP. O cenário MAP surgiu a partir das informações coletadas no cenário BASE e organizou os direcionamentos-chave e políticas para o hidrogênio e para a célula a combustível sobre uma amplitude de proposições diferentes.

A partir do cenário MAP, foi feita uma análise dos impactos resultantes de diferentes direcionamentos para o hidrogênio e para a célula e, assim, foram delineados quatro novos cenários: A, B, C, D. Esses outros quatro cenários propõem esforços nas variáveis meio ambiente, segurança energética, inovação tecnológica, condições econômicas e opções competitivas. Essas variáveis foram avaliadas positivamente ou negativamente na definição de cada um dos quatro cenários. A visão mais otimista para o hidrogênio e para as células a combustível é mostrada pelo cenário que obteve avaliação positiva em todas as variáveis, denominado cenário D. Esse cenário D é delimitado pela evidência das mudanças climáticas e espírito de cooperação, nesse sentido as próximas duas décadas serão utilizadas para combater as emissões de CO₂ e o aquecimento global. Ademais, o desenvolvimento tecnológico caminha rapidamente para o hidrogênio devido ao apoio de atividades de P&D, governamentais e privadas (IEA, 2005).

Os outros três cenários (A, B e C) mostram uma demanda significativamente mais baixa para o hidrogênio do que o cenário D. Sugerindo que a difusão do hidrogênio para os próximos cinquenta anos não é um fato consumado e que o hidrogênio parece ter um papel importante somente se as políticas ambiciosas para o controle de CO₂ se tornarem realidade, ou seja, se os cenários da descontinuidade prevalecerem.

Com base nas informações discutidas até o momento, constata-se que existem basicamente dois tipos de cenários, a Continuidade e a Descontinuidade. Nos cenários da Continuidade tem-se a permanência do atual regime energético para os transportes (motores de

combustão abastecidos preponderantemente por fontes fósseis), e para a geração estacionária (uso intensivo de carvão), apenas com algumas melhorias de eficiência e poucas inserções de fontes renováveis de energia. Já o cenário da Descontinuidade traz propostas mais ousadas. Como opções para o regime energético, o hidrogênio e a célula a combustível foram citados várias vezes, mas o seu uso passaria por uma fase de transição, caracterizada pela extração do hidrogênio das fontes fósseis até alcançar as fontes renováveis e então levar a uma mudança de regime energético.

Finalmente, este levantamento prospectivo demonstrou que a presença de um novo regime energético, fundamentado no hidrogênio e nas células, somente ocorrerá mediante inovações tecnológicas acompanhadas de preocupações sociais e ambientais que conduzam a uma ruptura no paradigma atual. Se estas perspectivas se realizarem corresponderão às expectativas demonstradas pela literatura quanto à utilização de energias renováveis para posterior produção do hidrogênio. Essa transição, contudo, tende a ser lenta e, provavelmente, levará décadas até que seja possível confirmar a substituição do regime energético atual pela Economia do Hidrogênio. No entanto, há de se destacar que os cenários de Continuidade não arcarão com as mudanças necessárias para a transição de regime e que, apesar de atualmente o apelo ambiental produzir certa influência nas mudanças tecnológicas, a maior parte das adaptações que vêm sendo adotadas é oriunda das regulações, como é o caso das tecnologias para controle da poluição e redução dos índices de emissões.

2.2.2 As alternativas para o regime energético

Tendo em vista as possibilidades de Continuidade ou Descontinuidade do regime energético vigente, a seguir são apresentadas quatro alternativas diferentes para o futuro energético em relação às fontes empregadas e as contribuições para a descarbonização. As quatro opções analisadas já são aplicadas ou estão sendo desenvolvidas, em diferentes níveis de maturidade tecnológica, pelos setores público e privado.

A primeira delas é a inserção massiva de fontes renováveis de energia, como a energia eólica e a fotovoltaica para a geração de eletricidade; e a biomassa (biodiesel e etanol) para prover o combustível para o motor de combustão interna. No entanto, não existe uma forma predominante de energia renovável, pois esta depende das condições naturais para a sua geração.

Além disso, há dúvidas sobre como essas fontes poderão ser efetivamente utilizadas em grande escala se um de seus maiores problemas é a armazenagem.

A segunda alternativa está no aproveitamento das fontes fósseis existentes, inserindo ações que minimizem os impactos ambientais, como os MDL (Mecanismos de Desenvolvimento Limpo²²), a negociação dos créditos de carbono²³ e o Seqüestro e Armazenamento de Carbono (SAC).²⁴ Nos MDL os países mais ricos podem optar por investir em projetos nos países em desenvolvimento mediante a aquisição dos créditos de carbono, cumprindo assim os requisitos do Protocolo de Quioto.

Os Créditos de carbono também são considerados uma possível solução para resolver os problemas das emissões e aquecimento global, podendo ser negociados em bolsa ou diretamente das empresas empreendedoras, quando é emitido o Certificado de Redução das Emissões (CER). Em agosto de 2006 cada tonelada de carbono estava cotada entre \$15 e \$18 euros, com estimativas de chegar a \$30 ou \$ 40 euros entre 2008 e 2012 (CARBONO BRASIL, 2007).

O interesse nos créditos de carbono é crescente e já existem diversas empresas especializadas no desenvolvimento de projetos que reduzem o nível de gás carbônico na atmosfera e na negociação de certificados de emissão do gás espalhadas pelo mundo. Essas empresas se preparam para vender cotas dos países que em geral emitem menos poluentes, para os que poluem mais, certificados que conferem aos países desenvolvidos o direito de poluir (KHALILI, 2003)

No ponto de vista tecnológico há três diferentes métodos de seqüestro ou captura de CO₂, são eles: ‘pré-combustão’, ‘pós-combustão’, e ‘combustão oxi-combustível’²⁵. Quanto ao

²² MDL são medidas para reduzir as emissões de gases do efeito estufa e para promover o desenvolvimento sustentável em países em desenvolvimento, previstas pelo Protocolo de Quioto (CARBONO BRASIL, 2007)

²³ Os créditos de carbono são certificados que autorizam o direito de poluir. “O Protocolo de Quioto obrigou os países industrializados e responsáveis por 80% da poluição mundial a diminuírem suas emissões de gases formadores do efeito estufa, como o monóxido de carbono, enxofre e metano em 5,2%, base 1990, entre os anos de 2008 e 2012” (CARBONO BRASIL, 2007).

²⁴ SAC é um meio de aprisionar o CO₂ de combustíveis fósseis, antes ou depois da queima, e “armazená-lo” (descartando-o efetivamente) no mar ou abaixo da superfície da terra (CORDEIRO, 2007, p. 1).

²⁵ Na pré-combustão o CO₂ é removido antes da combustão e armazenado. O que pode ocorrer mediante a gaseificação do carvão (conversão de carvão de estado sólido a gás, produzindo monóxido de carbono, hidrogênio, metano e nitrogênio).

A pós-combustão é conhecida no setor energético como a prática padrão, na qual ocorre a remoção de enxofre de gás de combustão produzido em usinas de carvão, que normalmente contém até 14% de CO₂.

armazenamento, predomina o interesse no armazenamento subterrâneo (em aquíferos salinos profundos, reservatórios esgotados de petróleo ou gás natural, depósitos de carvão não-mináveis e outras formações geológicas). O seqüestro oceânico também é considerado como uma opção, porém desacreditada pelo IPCC (CORDEIRO, 2007).

Como riscos ambientais derivados do SAC, foram identificadas as possibilidades de vazamento de CO₂, tais como a acidificação da água, a degradação de ecossistemas marinhos e a potencial asfixia de plantas, animais e seres humanos.

Observa-se que a proposta para Seqüestro e Armazenamento de Carbono (SAC), apresenta limitações e muitos acreditam que não será seriamente implementado antes de 2020 e provavelmente não se tornará comercialmente viável como uma opção de mitigação eficiente até 2030. Ademais, o conceito ainda necessita avançar em P&D até que seja possível adotar as práticas citadas ao ponto de competir com outras opções energéticas como as fontes renováveis. Outra limitação é o fato desse mercado ainda necessitar de metas legais de redução de emissões e prazos para a criação de preços e mercados de carbono. Outras questões ainda são consideradas, tais como: o tempo que o CO₂ deve/pode permanecer seguro debaixo da terra? Milhares, dezenas de milhares de anos? O que acontecerá se o CO₂ escapar de volta para o ambiente? (CORDEIRO, 2007).

Cordeiro (2007) complementou que o processo é muito caro, aumentando os custos da geração de energia entre 40% e 80%. Além disso, uma quantidade adicional de combustível fóssil, entre 10% e 40%, deve ser queimada para conseguir o mesmo resultado energético.

Cordeiro (2007) conclui com a seguinte frase: “O SAC pode ser uma opção no futuro quando todas as perguntas tiverem sido respondidas e os problemas resolvidos, mas é necessário agir imediatamente. Esta ação deve ser o emprego de energia renovável disponível e tecnologias de eficiência energética aliadas às medidas de conservação energética atualmente disponíveis”.

Constata-se, portanto, que as tecnologias de captura e armazenamento de carbono para combater o aquecimento global e as mudanças climáticas ainda não são capazes de capturar, eficientemente, a quantidade de carbono emitido e armazená-la no subsolo para que não aqueça nosso planeta ainda mais (GREENPEACE, 2008).

Nos processos de ‘combustão oxi-combustível’, o nitrogênio é removido do ar por uma unidade de separação de ar. Oxigênio é adicionado ao combustível, que o acende, emitindo um gás que consiste basicamente de CO₂ e vapor de água, que pode ser condensado, resultando em uma corrente seca de CO₂ altamente concentrado, comprimido para o transporte e armazenamento.

Assim, apesar de contribuir para minimizar o aquecimento global, pode-se considerar que essa alternativa vai de encontro à descarbonização, pois os créditos de carbono garantem a continuidade do paradigma do motor de combustão e o uso das fontes fósseis para a geração de energia estacionária e veicular (CARBONO BRASIL, 2007).

A terceira possibilidade para o futuro energético está no emprego das fontes fósseis, principalmente o gás natural, para a produção do hidrogênio, permitindo também frear as emissões mediante a captura do carbono durante a geração do hidrogênio. Opção transitória até que o hidrogênio possa ser obtido exclusivamente dos renováveis.

A quarta e última alternativa é a única que representa uma descontinuidade em relação ao regime energético dominante, caracteriza-se pela produção do hidrogênio a partir das fontes renováveis e o seu uso nas células a combustível (ODELL, 2004; JACCARD, 2005). Alternativa que somente poderá se concretizar em longo prazo, isto é, provavelmente precisará de décadas, talvez a metade de um século para uma significativa introdução no mercado (WINTER, 2004). Condição que se deve ao fato de ainda existirem reservas suficientes de combustíveis fósseis para a continuidade do regime vigente por muitas décadas, bem como as fontes renováveis precisam evoluir em termos de desenvolvimento tecnológico.

Tomando por base a quarta alternativa citada, a Descontinuidade do regime vigente, esta seção se apóia na teoria evolucionista para apresentar os contextos teóricos favoráveis à transição para um novo regime energético, enfatizando as possibilidades que tendem a amenizar as emissões de CO₂ mediante a produção de hidrogênio a partir das fontes renováveis.

De acordo com Kemp (1997), o conceito de regime tecnológico é altamente relevante para as tecnologias energéticas, pois muitos dos exemplos dos regimes ou paradigmas tecnológicos são fundamentados na energia utilizada, como na máquina a vapor e no motor de combustão interna. A esse respeito, em 1980 Sunkel já havia abordado a importância das fontes de energia, explicando que a energia tem um papel-chave no funcionamento do meio ambiente construído, e, por conseguinte, a importância relativa das fontes de energia tem variado com o tempo e com a evolução tecnológica.

Tendo em vista a minimização das emissões, Martin (1996) analisou várias trajetórias que estavam sendo exploradas a fim de encontrar alternativas para os produtos à base de óleo cru. Concluiu que as fontes fósseis ainda teriam uma participação importante por um bom tempo, mas que existem alternativas renováveis. Para o autor a escolha pelos renováveis poderia levar a um

novo paradigma “tecno-econômico”. Neste caso, uma diversificação de mercado, ou uma completa mudança de direção pode ser observada em relação à “trajetória natural”, representada por atividades econômicas intensivas em energia e altas taxas de poluição. Contudo, o autor relatou que as evidências deste novo paradigma apresentarão variações de um país para outro.

Em 2000, Martin procurou traçar hipóteses explicativas plausíveis para compreender as orientações de mudança nas tecnologias energéticas. Para o autor, ao longo de trinta anos as mudanças no curso das tecnologias energéticas mostraram evoluir nos seguintes aspectos: disponibilidade, qualidade e preço dos fornecimentos, flexibilidade e compatibilidade das autorizações para novos procedimentos de conversão. Concluiu que quando essas evoluções nas tecnologias energéticas levam a mudanças de trajetórias são consideradas como predominantemente radicais, mas em outros casos como uma sucessão de mudanças incrementais.

A respeito dos conceitos de inovação radical e incremental, já em 1988 Freeman e Perez elaboraram uma classificação que abrange quatro níveis para as inovações tecnológicas. No primeiro nível estão as inovações incrementais, aquelas que comportam uma seqüência de pequenas mudanças e levam à continuidade do sistema vigente. No segundo nível estão as inovações radicais, inserindo-se nessa denominação as tecnologias inteiramente novas. No terceiro nível estão as mudanças que afetam os custos estruturais e as condições de produção no sistema. Finalmente, no quarto nível se encontram as mudanças de paradigmas tecnológicos e, nesse caso, podem envolver alterações na estrutura econômica de um grupo social. Esse quarto nível também é chamado pelos autores de paradigma tecno-econômico, pois consideram que as mudanças vão além das condições técnicas e abrangem toda a economia. Para o sistema energético é nesse nível que um novo regime poderá surgir.

No que tange às inovações incrementais, Schmidheiny (1992) sugeriu que podem ser observadas no aproveitamento dos atuais avanços em alguns tipos de pesquisas, tais como: tecnologias limpas para o uso de carvão combustível; expansão nuclear equilibrada; certas formas de energia de biomassa; energia solar; e incremento de energia elétrica. Foray e Grübler (1996) também estudaram as inovações incrementais, destacaram as restrições ambientais que forçam as empresas a melhorar os sistemas existentes. Entretanto, acreditam que estas melhorias incrementais não são suficientes para atingir as reduções necessárias no consumo de materiais e energia.

De maneira geral, apesar das contribuições das inovações incrementais, o processo de transformação do setor de energia por meio da sustentabilidade requer mudanças radicais nas tecnologias usadas para fornecer e usar a energia. Portanto, considera-se que as tecnologias energéticas inteiramente novas formam uma seqüência de inovações radicais cujas trajetórias enriquecem várias outras tecnologias, tais como: a energia nuclear, fotovoltaica e as células a combustível (MARTIN, 2000; ANDERSSON e JACOBSSON; 2000)

Além do aspecto tecnológico, no surgimento e na emergência de uma inovação tecnológica radical, há sempre certo grau de descontinuidade na infra-estrutura e nas instituições, sendo necessário, portanto, aprender novos caminhos para realizar os trabalhos e, ao mesmo tempo, abandonar hábitos e práticas do passado (MYTELKA, 2003).

Kemp (1997) destacou que as inovações radicais aparecem raramente e que somente em poucos aspectos novos produtos constituíram uma quebra radical com o passado e levaram a possíveis mudanças no paradigma tecno-econômico. Na maior parte das vezes são mudanças radicais, que se beneficiaram da experiência acumulada no mesmo setor ou em outros que contribuíram para o seu uso, característica também apontada por Nelson e Winter. A esse respeito Kemp (1994) citou como exemplo a experiência acumulada na produção de bicicletas, que foi posta em uso pela indústria automobilística. Componentes existentes como a infra-estrutura de estradas puderam ser melhorados ou combinados com novas tecnologias. Existe uma famosa frase do autor que demonstra sua teoria: “Fotografias dos primeiros automóveis mostram claramente que originalmente os automóveis não eram nada além de uma carruagem energizada por um motor, ao invés de ser puxada por um cavalo”. O Autor chamou de *horseless-carriage*. (Kemp, 1994, p. 1037). Por outro lado, Kemp e Soete (1992) levantaram que novos paradigmas tecno-econômicos poderiam ocorrer mediante a transição do atual regime tecnológico e da estrutura vinculada ao seu funcionamento para uma trajetória tecnológica mais amena. Esta mudança estaria baseada nos princípios do desenvolvimento sustentável e deveria ser considerada como uma ruptura tecnológica, um processo não-linear e evolucionário. Concluíram que abrangeria, além de mudanças no regime técnico e econômico, transformações na indústria, no sistema de transportes e na agricultura.

Em relação a um novo paradigma tecno-econômico que possa substituir o uso atual dos motores de combustão e dos combustíveis fósseis, Mytelka (2003) considera que o hidrogênio como vetor energético pode ser percebido como a terceira onda de mudança tecnológica na

atualidade. As duas primeiras, que teriam ocorrido no final do século XX, seriam: 1) as tecnologias de informação e comunicação; e 2) a biotecnologia e sua aplicação na indústria farmacêutica e na agricultura. A autora analisou os possíveis caminhos para o desenvolvimento de uma tecnologia em particular: a tecnologia PEM (*próton exchange membrane*) para a célula a combustível e a difusão dessa tecnologia no setor automotivo.

Enfim, as perspectivas sugerem que uma nova trajetória estaria fundamentada no desenvolvimento de fontes renováveis de energia para a produção do hidrogênio e a sua aplicação nas células a combustível, veiculares e estacionárias, o que caracterizaria um novo regime energético. Nesse contexto, a descarbonização continua sendo a referência e a justificativa para a mudança, pois poderá minimizar os problemas das emissões. Porém, há de se considerar que em curto prazo o incremento do atual regime pode ser a melhor alternativa nos aspectos político e econômico e que atualmente a sustentabilidade também é uma das metas para o uso dos combustíveis fósseis.

Assim, até este ponto foi possível concluir que um novo regime energético poderá vir a ser o resultado de cumulativas inovações radicais calcadas em preocupações ambientais. No entanto, estas questões ambientais raramente vão ao encontro dos objetivos econômicos. Para tanto, serão necessárias intervenções governamentais, mediante a aplicação de políticas públicas, que considerem, além de medidas corretivas para resolver os problemas das emissões, como é o caso do Protocolo de Quioto, medidas preventivas para inibir as emissões de CO₂. Por conseguinte, parece promissora a opção que leva ao uso dos renováveis e, posteriormente, ao hidrogênio e à célula a combustível.

Na próxima seção os obstáculos para a Economia do Hidrogênio são detalhados. Destacam-se os aspectos que tendem a dificultar e até mesmo impossibilitar esta descontinuidade tecnológica.

2.3 Obstáculos para substituição do atual regime energético por um novo regime, fundamentado no hidrogênio e na célula a combustível

A teoria evolucionista, os estudos prospectivos e as possibilidades de transição para um novo regime energético indicam que podem ocorrer mudanças no regime energético e que inovações descontínuas poderão levar a rupturas tecnológicas, estas fortemente influenciadas pela necessidade de descarbonização. Mas há muitas incertezas a respeito de quais serão as mudanças,

bem como quais serão os obstáculos que dificultarão a transição. Assim, os obstáculos para o hidrogênio e para a célula a combustível serão citados nesta seção que demonstrará que as alterações no regime energético são complexas e que diversos fatores podem aumentar as incertezas quanto ao futuro.

A situação também pode ser analisada sob a perspectiva do regime dominante e então refletir a respeito dos obstáculos para a sua continuidade. A discussão é a seguinte: se, por um lado, as tecnologias do hidrogênio e da célula a combustível carregam inúmeros obstáculos para sua inserção, por outro lado, o paradigma dominante também apresenta obstáculos importantes caso a escolha seja pela continuidade, principalmente as emissões, realidades percebidas no ambiente de seleção para a Economia do Hidrogênio.

Para efeitos de organização, os obstáculos extraídos da literatura foram numerados de 1 a 9. O primeiro obstáculo identificado foi a falta de compatibilidade entre a tecnologia estabelecida e as novas tecnologias para a mudança de regime energético. Dessa forma, as tecnologias estabelecidas caracterizam-se pelo uso intensivo dos combustíveis fósseis para geração estacionária e veicular de energia, bem como o motor de combustão como o sistema de conversão. Portanto, um novo regime energético, formado pelas células a combustível e pelo hidrogênio aproveitaria muito pouco em relação ao regime atual, pois a célula representa um sistema de conversão específico para o fornecimento de energia mediante a geração de eletricidade e não mais pela combustão.

O segundo obstáculo identificado na literatura também é relativo à tecnologia, trata do tempo de vida útil da célula a combustível, que é considerado crítico para os custos operacionais. Mediante alguns exemplos colocados pela IEA, a vida útil da célula depende muito das condições de operação, tais como: alta ou baixa temperatura de inicialização, excessiva ou insuficiente humidificação e pureza do combustível. Atualmente a vida média de uma célula PEMFCs é de cerca de 2.200 horas, o que equivale a 100.000 Km, com uma variação de 1.000 a 10.000 Km. A vida média de uma célula SOFC operando em pequena escala residencial é de aproximadamente 4.500 horas. Mesmo com os avanços alcançados nos últimos anos, que aumentaram o tempo de vida e a confiabilidade das células a combustível, ainda é preciso alcançar a aceitação dos consumidores. Atualmente, para as aplicações móveis, o referencial é de 3.000 a 3.500 horas para os carros e 20.000 horas para os ônibus. Nas aplicações estacionárias, o referencial é de 40.000 a 60.000 horas, equivalendo a um período de 5 a 8 anos de operação. (IEA, 2005, P. 24)

Como terceiro obstáculo aponta-se que a mudança para um sistema baseado em energias alternativas, na maioria das vezes, está relacionada à produção em pequena escala e não traz benefícios suficientes para a atual curva de aprendizado (“*dynamic scale and learning effects*”) (KEMP, 1994; LARSEN, FEIDENHANS’I e PETERSEN, 2004). Nesse aspecto, os custos de mudança de trajetória tecnológica são muito elevados e o que diferencia este período da história, diferentemente do que aconteceu no passado com o carvão em relação à lenha e depois com o petróleo em relação ao carvão, é que as novas energias são consideravelmente mais caras (SACHS, 2000). A esse respeito, torna-se relevante identificar sob quais condições os consumidores estariam dispostos a desembolsar mais recursos para adquirir uma nova tecnologia, bem como os fabricantes a investir na tecnologia, já que não há informações sobre a demanda e levará um tempo até alcançarem a economia de escala.

Acrescenta-se que a ausência de economia de escala pode elevar os preços da tecnologia, conseqüentemente aumentar as contas e afetar os negócios, os empregos e o bem-estar social. Mas, por outro lado, os preços elevados também podem estimular a exploração e o desenvolvimento de recursos adicionais, impulsionando as inovações (ROGNER e POPESCU, 2000).

Aponta-se a necessidade de mudanças institucionais como o quarto obstáculo para a Economia do Hidrogênio. Constatou-se que desde os anos 1970 todas as tecnologias relacionadas à energia têm sido marcadas por mudanças institucionais e a coevolução das mudanças institucionais e tecnológicas foi colocada como um ponto central no estudo dos paradigmas tecno-econômicos. Essa é a realidade em que se encontra a economia do hidrogênio, a qual ainda precisa de evoluções tecnológicas. Mas, para que as inovações cheguem aos usuários finais, são necessárias grandes mudanças institucionais. Estas, por sua vez, abrangem incentivos governamentais, regulamentação do setor, educação da sociedade, entre outros (KEMP, 1994; FORAY E GRÜBLER 1996; MARTIN, 1996; FREEMAN, 1996).

Grande parte das mudanças institucionais depende do suporte público para que a transição tecnológica se efetive, o que muitas vezes pode levar décadas ou até mesmo séculos para acontecer. São citadas mais algumas mudanças institucionais cujas ausências são tratadas como obstáculos: mudanças tanto nos bens de consumo quanto nas tecnologias de produção; nas estruturas urbanas e nos transportes; no conhecimento científico e tecnológico; e nas instituições

que fazem as escolhas para os atores econômicos-chave, ou seja, definem os padrões e as regulações (MARTIN, 1996).

Destaca-se que a ausência de normas, padrões e legislação para regulamentar as atividades de pesquisa, desenvolvimento, demonstração e comercialização da tecnologia do hidrogênio pode ser a maior barreira institucional para o desenvolvimento da Economia do Hidrogênio. Nesse contexto, países líderes no desenvolvimento das tecnologias para o hidrogênio e para a célula, como os Estados Unidos, o Canadá e o Japão, estão promovendo programas para a definição dos padrões, normas e legislação que regulamentem o setor. Conseqüentemente, a concretização destes programas poderá possibilitar que o setor seja orientado e fiscalizado (IEA, 2004).

A lenta maturação tecnológica das fontes renováveis foi o quinto obstáculo elencado nessa revisão. Atualmente, na proposta para a Economia do Hidrogênio, as fontes renováveis permanecem como a melhor alternativa para a produção do hidrogênio, mas a dificuldade não está simplesmente na busca por fontes não-convencionais de energia. O que ocorre são diversas barreiras para o emprego das fontes renováveis, tais como: a carência de determinados recursos; a necessidade de investimentos; os riscos econômicos; os impactos ambientais; a disponibilidade das fontes fósseis; a falta de informação; a necessidade de regulação; e os custos elevados. A redução dos custos, por sua vez, dependeria do aprendizado dos produtores de equipamentos, dos produtores de energia e redes cooperativas de usuários. Essas redes, contudo, se estabelecem muito lentamente em função do desfavorável ambiente institucional e organizacional em que operam, e das constantes pressões no fornecimento do óleo e a escassez que ameaça as economias industriais (SUNKEL, 1980; MARTIN, 1992; MARTIN, 1996; TURKENBURG; 2000).

O sexto obstáculo identificado está na segurança para a produção, armazenagem e distribuição do hidrogênio. Justifica-se essa preocupação porque, por um lado, o hidrogênio é uma substância potencialmente perigosa, pois em baixa densidade requer alta pressão para armazenagem do gás e temperatura refrigerada para armazenagem do líquido, tanto para aplicações móveis quanto estacionárias. Mas, por outro lado, nenhum combustível é 100% seguro em casos de acidentes e muitos acidentes fatais acontecem todos os anos com o petróleo ou com a gasolina. Complementa-se que a questão da segurança também pode ser lembrada a partir das

imagens do desastre de *Hindenburg*²⁶ e dos testes com a bomba de hidrogênio durante a Guerra Fria, quando pesquisadores concluíram que os perigos do hidrogênio não são diferentes daqueles causados por outros combustíveis como a gasolina ou o gás natural (BACON, 1985; IEA, 2004; CHERRY, 2004).

Como sétimo obstáculo colocam-se as dificuldades para a armazenagem do hidrogênio. No estado líquido, o hidrogênio pode resistir somente em temperaturas inferiores a -240°C, a “temperatura crítica”. No estado sólido, a armazenagem depende da pressão, temperatura e natureza da superfície. Outra questão refere-se à armazenagem do hidrogênio a bordo dos veículos. Muitos afirmam que o hidrogênio comprimido ocupa mais espaço do que o reservado ao tanque de gasolina e metanol, e sobraria menos espaço para os passageiros, tornando o veículo inviável (HOEKSTRA, 1995; LARSEN, FEIDENHANS’I e PETERSEN, 2004; RIFKIN, 2003).

Ainda tratando-se da armazenagem, são mencionados o volume a ser armazenado e os custos. Quanto ao volume, os carros deverão estar aptos a armazenar uma quantidade suficiente de hidrogênio, para oferecer autonomia de direção aos consumidores. A armazenagem é uma das maiores áreas de pesquisa, principalmente no que tange às expectativas dos consumidores com relação à autonomia de 500km para o reabastecimento dos automóveis. Para os custos, estimativas indicam que o hidrogênio será provavelmente 50% a 100% mais caro que os demais combustíveis, e que incentivos governamentais para o uso do hidrogênio serão necessários para reduzir os custos. As exceções acontecerão com os consumidores ambientalmente conscientes que pagarão este custo extra voluntariamente (CHERRY, 2004).

O oitavo obstáculo está na infra-estrutura, de tal forma que o apoio governamental é decisivo, oferecendo subsídios em P&D e regulamentando o setor. Outro ponto é que a transição para um sistema de energia diferente envolve não somente as fontes de energia e tecnologias de fornecimento, mas também mudanças na educação, na manufatura, no transporte e nos padrões de consumo (KEMP, 1994).

Foi levantado que uma infra-estrutura completa, formada por um sistema de produção, armazenagem e distribuição, custaria centenas de bilhões de dólares para ser construída. Na tentativa de minimizar os custos, muitas indústrias dos setores automotivo e energético investirão

²⁶ Acidente mais famoso na história envolvendo o hidrogênio, o desastre com o dirigível (Zeppelin) Hindenburg nos EUA, em 1937. Ocorreram 35 mortes, mas 27 das mortes foram de pessoas que se jogaram do dirigível, as outras 8 foram queimadas. As 62 pessoas que ficaram a bordo e evitaram o gás tóxico da fumaça expelida pelas mobílias e tapeçarias sobreviveram.

no desenvolvimento de reformadores e tecnologias para automóveis para produzir e usar hidrogênio a partir dos combustíveis fósseis, mantendo intacta a atual infra-estrutura do petróleo. Esta solução incremental, pelo uso de reformadores, foi criticada por muitos autores, mas consistiria em uma solução alternativa, que inicialmente utilizaria a atual infra-estrutura do gás natural e empregaria a célula a combustível em alguns nichos (DUNN, 2002).

O obstáculo da infra-estrutura também foi chamado de dilema *chicken or egg*, no qual os fabricantes não comprometerão bilhões de dólares para construir plantas para a fabricação de veículos movidos à célula a combustível sem a garantia de uma infra-estrutura para o hidrogênio que seja geograficamente dispersa e acessível. Do mesmo modo, os fornecedores de hidrogênio não investirão na infra-estrutura antes de existirem dezenas de milhares de veículos nas ruas. Esta situação leva muitos *experts* a concluir que a construção de uma infra-estrutura para o hidrogênio é um obstáculo insuperável e que custaria centenas de bilhões de dólares. Mas, estudos sugerem que o uso distribuído do hidrogênio pode custar menos do que imaginam, sendo assim uma alternativa viável para o período de transição (MOORE e RAMAN, 1998; THOMAS, JAMES, LOMAX, 1998; DUNN, 2002; RIFKIN, 2003).

Como nono obstáculo está a dificuldade em atingir o ideal da descarbonização. Nesse sentido, para diminuir as emissões de carbono por meio da célula a combustível e do hidrogênio, será necessária a reunião de muitos recursos para serem investidos em P&D. Para tanto, acredita-se que a descarbonização poderá ser mais brevemente alcançada se o hidrogênio for produzido das fontes renováveis. Uma tarefa que precisa da colaboração do governo e da indústria em escala internacional, pois as tecnologias para a Economia do Hidrogênio ainda são consideradas embrionárias ou em seus estágios iniciais de desenvolvimento (BACON, 1985; EKDUNGE e RABERG 1998).

Independentemente dos obstáculos aqui levantados, é fundamental que se faça a escolha, ou seja, qual a trajetória pretendida: a continuidade do atual regime com o uso intensivo dos combustíveis fósseis e a lenta introdução das fontes renováveis; ou a descontinuidade, com o uso intensivo das fontes renováveis e a sua gradual transformação em hidrogênio. Qual dessas trajetórias vai ao encontro da Economia do Hidrogênio e da descarbonização? Afinal, mudar um sistema de energia não é um problema simples, é um processo complexo a ser realizado em longo prazo (GOLDEMBERG, 2000; KEMP 1994; e SACHS; 2000).

Esta seção é finalizada organizando os obstáculos conforme proposição de Kemp e Soete (1992). Estes autores concluíram que as barreiras ou obstáculos que compõem a transição para uma trajetória composta por tecnologias adequadas ao meio ambiente são observados em três vertentes: barreiras técnicas, econômicas e institucionais. Tendo por fundamento a literatura sobre os obstáculos para a transição de regime energético e a classificação de Kemp e Soete, foram destacadas as principais considerações dos autores estudados e agrupadas no quadro 2.1.

QUADRO 2.1: Obstáculos para o hidrogênio e para a célula a combustível

Técnicos	Institucionais	Econômicos
Restrita compatibilidade com o atual regime.	Inexistência de normas, códigos, padrões e legislação para regulamentar as atividades de pesquisa, desenvolvimento, demonstração e comercialização da tecnologia do hidrogênio.	Necessidade de a tecnologia alcançar um preço final atrativo para o consumidor.
Dificuldades para armazenagem do hidrogênio.	Necessidade de educar a sociedade para novos padrões de consumo, alterando o atual estilo de vida.	Custos elevados para as fontes renováveis.
Lenta maturação no desenvolvimento e disponibilidade limitada das fontes renováveis.	Dificuldades em atender ao ideal da descarbonização.	Dificuldade em se beneficiar da curva de aprendizagem de algum outro componente tecnológico do setor.
Infra-estrutura não disponível.	Resistências por parte dos fabricantes que precisarão aprender a produzir as novas tecnologias.	Custos de entrada elevados tanto para o hidrogênio quanto para a célula a combustível.
Baixa eficiência e vida útil limitada da célula a combustível.	Grandes adaptações na estrutura urbana e de transportes.	Dificuldade em alcançar a economia de escala.
Incerteza quanto à segurança na produção, armazenagem e distribuição do hidrogênio.	Interação restrita entre o conhecimento científico e tecnológico.	Investimentos reduzidos que atrasam o desenvolvimento tecnológico.

FONTE: Elaborado pela autora a partir da revisão bibliográfica.

As barreiras técnicas colocadas pelos autores iniciam-se pela restrita compatibilidade tecnológica com o atual regime, necessitando de adaptações complexas para inserir a tecnologia no estilo de vida moderno. Devido à falta de compatibilidade, bem como o uso limitado e a lenta maturação no desenvolvimento das fontes renováveis, o hidrogênio e a célula a combustível não farão uso de muitas das vantagens da curva de aprendizado e essa questão refletirá nos custos da

tecnologia. A infra-estrutura necessária será complexa e os produtores de tecnologia precisarão avançar em sistemas que garantam a disponibilidade para o usuário. Neste aspecto se insere o dilema *chicken or egg*, no qual a grande barreira é a discussão entre produtores da tecnologia e empresas de energia. Acrescenta-se a baixa eficiência e vida útil da célula a combustível, em comparação com o motor de combustão. As dificuldades para armazenagem do hidrogênio também foram tratadas como um obstáculo técnico. Conclui-se com a questão da segurança, tanto na produção quanto na armazenagem e distribuição do hidrogênio (BACON, 1985; MARTIN, 1992; KEMP, 1994; MARTIN, 1996; FORAY E GRUBLER, 1996; THOMAS, JAMES E LOMAX, 1998; GOLDEMBERG, 2000; TURKENBURG, 2000; DUNN, 2002; CHERRY, 2004; IEA, 2004; IEA, 2005).

Na discussão a respeito das barreiras econômicas foram selecionados os temas relativos aos custos da tecnologia e ao preço final para o consumidor. Com relação ao preço para o consumidor a tecnologia precisará alcançar um preço atrativo, compatível com as tecnologias atualmente disponíveis e, se necessário, inserir as vantagens para o meio ambiente como fator importante na decisão de compra dos consumidores. A possibilidade de se beneficiar da curva de aprendizagem de algum componente tecnológico poderia reduzir as barreiras de custos, pois atualmente os custos elevados dos renováveis interferem nos custos para o hidrogênio e, conseqüentemente, no uso das células. Outro ponto é a dificuldade em alcançar a economia de escala, pois somente assim os produtores da tecnologia conseguirão se tornar mais competitivos. No entanto, a carência de recursos e de investimentos em tecnologia dificulta a maturação o que, dessa forma, atrasa a redução dos preços ao consumidor. Por fim, a questão econômica é complexa e necessita do desenvolvimento de instituições públicas e privadas para tornar a tecnologia mais atrativa. Uma possibilidade são os incentivos para pesquisas e a redução de impostos. (KEMP, 1994; MARTIN, 1992; HOEKSTRA, 1995; MARTIN, 1996; ROGNER e POPESCU, 2000; GOLDEMBERG, 2000; SACHS, 2000). As barreiras institucionais podem ser exemplificadas pela necessidade de regulação de um setor que segue o seu desenvolvimento sem uma definição de normas, códigos e padrões, bem como ausência de legislações. A regulamentação poderá contribuir no direcionamento das áreas de maior interesse para pesquisa e também para definir os padrões para produção do hidrogênio e fabricação das células. Além disso, aspectos regulatórios podem interferir nas características de uso final das tecnologias, exigindo, por exemplo, critérios de segurança. No aspecto ambiental, a sociedade

pode não estar preparada para mudanças de grande porte no regime energético. Atualmente os hábitos de consumo desperdiçam muita energia e geram grandes volumes de emissões de CO₂, o que dificulta e atrasa a descarbonização. Acrescentam-se as dificuldades de adaptação para os fabricantes de tecnologia que deverão atender novas especificações e alterar seus processos produtivos. Há ainda as adaptações necessárias na estrutura urbana e nos transportes, que deverão adequar-se à opção escolhida para a infra-estrutura, centralizada ou distribuída. Por último, a troca de informações entre as universidades e as indústrias poderá acelerar o desenvolvimento do setor. (KEMP e SOETE, 1992; KEMP, 1994; MARTIN, 1996; FREEMAN, 1996; JACOBSSON e JOHNSON, 2000).

2.4 Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo optou-se pela teoria evolucionista para compreender a dinâmica das inovações no setor energético, destacando-se as mudanças tecnológicas revolucionárias que causam impactos na estrutura de toda uma sociedade. Procurou-se demonstrar a idéia de progresso das mudanças tecnológicas e o conseqüente surgimento de novos paradigmas tecnoeconômicos, estes acompanhados das possibilidades de escolha durante um paradigma, ou seja, as trajetórias tecnológicas. Ademais, quando uma tecnologia encontra-se amplamente disseminada e predomina em dado contexto socioeconômico, caracteriza-se como um regime tecnológico próprio. Sendo assim, analisou-se em que condições o regime energético vigente poderá ser substituído pela Economia do Hidrogênio, o regime tecnológico em perspectiva.

Na perspectiva citada, os movimentos cíclicos da economia mundial e as respectivas substituições que caracterizaram cada ciclo, como a energia a vapor, a eletricidade e o petróleo, contribuíram para o entendimento do contexto da mudança. Nesse ponto, inserem-se questões que já foram tratadas por Freeman quando escreveu que no futuro haverá um próximo ciclo no setor energético e as energias renováveis terão um papel de destaque. Também se destaca a idéia de Kemp para justificar que o conceito de regime tecnológico é altamente relevante para as tecnologias energéticas. Assim, a teoria evolucionista aplica-se às incertezas para a continuidade do regime energético (emissões de CO₂, segurança energética e disponibilidade das fontes fósseis), de tal modo que o meio ambiente se torna a variável determinante nesta análise, buscando assim um regime energético mais ameno e que promova a descarbonização.

Além da ênfase dada ao uso dos renováveis como um ajuste necessário para os combustíveis fósseis na geração estacionária e veicular de energia, as fontes renováveis poderão ainda estar associadas com as mudanças no sistema de conversão, ou seja, a substituição do motor de combustão pela célula a combustível. Nesse caso, dependendo dos avanços nos projetos de pesquisa, desenvolvimento e demonstração, as rupturas serão muito maiores e poderão levar a alterações no curso do desenvolvimento tecnológico. Acrescenta-se que a inserção do hidrogênio e das células a combustível provavelmente será cumulativa, percebida por uma gradual substituição do motor de combustão, abastecido com as fontes fósseis, para as células a combustível, com o hidrogênio obtido das fontes renováveis. Logo, se essa transição influenciar

no comportamento da economia inteira, como parece apontar, será possível tratar-se de um novo regime energético.

Em se tratando das especulações sobre o futuro, os ambientes acadêmico e empresarial organizam os estudos prospectivos na área. Estes se dividem entre aqueles que ambicionam por mudanças e por isso acabam acreditando nelas; e outros que acreditam que mudanças em uma trajetória tecnológica são muito complexas e precisam de maiores evidências antes de serem afirmadas, tais como provas de eficiência da tecnologia, custos e vantagem em relação ao modelo dominante. No levantamento realizado neste capítulo foram observados dois caminhos. O primeiro tratou da Continuidade do regime atual, com algumas adaptações para a eficiência energética e o gradual uso dos renováveis. Insere-se também nessa possibilidade a adoção dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, os Créditos de Carbono e as tecnologias para SAC. Opções que manteriam o uso intensivo das fontes fósseis e, em uma perspectiva otimista, atuariam corretivamente equilibrando as emissões de CO₂. O segundo caminho é o da descontinuidade, levando às rupturas tecnológicas e, possivelmente, a um novo regime energético. Na perspectiva da descontinuidade, o hidrogênio, obtido a partir de fontes renováveis, e a célula a combustível representariam uma possibilidade com elevadas preocupações ambientais e grandes investimentos em tecnologia.

Mediante o levantamento dos estudos que tratam das perspectivas energéticas foi possível concluir que não existe uma análise capaz de identificar um modelo energético ideal. Entretanto, o regime energético vigente pode ser o mais adequado, em termos de eficiência e custos, às atuais necessidades sociais para os transportes, para a comunicação e para a eletricidade. Porém, a poluição e as expectativas de aquecimento global motivam a procura por alternativas para esse modelo. Por conseguinte, apesar de a Economia do Hidrogênio ser uma opção para a descarbonização, quiçá para um novo regime energético, há muitos obstáculos para que essa transição ocorra, sendo estes caracterizados em três esferas principais: técnicos, econômicos e institucionais.

Finalmente, nesta seção foi possível concluir que um regime energético pode ser conduzido para a continuidade e para a descontinuidade e, em relação ao quadro apresentado para o futuro energético, o hidrogênio e a célula são considerados as possibilidades mais próximas de descontinuidades.

O próximo capítulo contém informações obtidas em entrevistas realizadas com os especialistas que coordenaram a elaboração do Roteiro do Hidrogênio no Brasil. Foram realizadas entrevistas semi-estruturadas e tentou-se identificar o que vem sendo feito pelas instituições brasileiras desde o período de publicação do Roteiro, em 2005.

CAPÍTULO 3: A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL

As informações apresentadas a respeito das ações internacionais para a Economia do Hidrogênio indicaram que o hidrogênio é uma possibilidade energética que vem sendo amplamente abordada por vários países e formalizada em iniciativas como a *International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE) e a Agência Internacional de Energia (IEA). Dentre as ações impetradas pelos gestores brasileiros destacam-se a participação na IPHE e a elaboração de dois documentos que são tratados como diretrizes para o país. Esses documentos são o Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (PROCAC/PROH2),²⁷ publicado em 2002, e o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, publicado em 2005.

O presente capítulo se propõe a descrever como as ações nacionais estão transcorrendo desde a publicação do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. Nesse sentido, tratará de duas iniciativas decorrentes dos documentos citados, os Projetos Estruturantes e as Redes. Por conseguinte, para entender como o Brasil está se posicionando politicamente em relação à Economia do Hidrogênio e como as instituições são influenciadas e influenciam a construção dessa política, foram empregados dados primários e secundários. Os dados secundários foram obtidos no PROCAC/PROH2 e no Roteiro. Os dados primários foram coletados mediante sete entrevistas semi-estruturadas com membros de instituições que participaram da elaboração do Roteiro (apêndice um). Para as entrevistas foram escolhidos os coordenadores de grupos de trabalho, o coordenador geral e o operador de atividades do Roteiro. Estes entrevistados fazem parte das seguintes instituições: MCT; CENEH e LH2/UNICAMP; LACTEC; MME; COPPE/UFRJ; e INMETRO. Participou ainda da elaboração do Roteiro o CENPES/PETROBRÁS, porém o membro representante desta instituição não estava disponível para participar das entrevistas na época em que foram realizadas. As informações foram gravadas e depois transcritas e analisadas de forma que possibilitassem compreender as perspectivas para a Economia do Hidrogênio no país. Essas entrevistas foram realizadas no período compreendido entre novembro de 2006 a março de 2007.

²⁷ Para facilitar o entendimento do texto será utilizada a nomenclatura PROCAC/PROH2, que faz referência ao mesmo documento inicialmente denominado PROCAC (Programa Brasileiro de Sistemas Células a Combustível) e depois teve o nome alterado para PROH2 (Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio).

Neste capítulo inicia-se descrevendo como as instituições nas quais os entrevistados trabalham têm atuado em relação ao hidrogênio e à célula a combustível. Em seguida, detalha-se a participação do Brasil nas instituições internacionais e nacionais para a Economia do Hidrogênio, de modo que é relatada a participação do Brasil na IPHE e são resumidas as principais informações que constam nos documentos originais do PROCAC/PROH2, do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil e dos Projetos Estruturantes. São abordadas questões pertinentes à elaboração e operacionalização desses documentos e ações posteriores. Ainda são descritas as Redes de Pesquisa e suas respectivas atividades em desenvolvimento. Ressalta-se que não existem publicações oficiais que tratem das Redes, por isso as informações consideram apenas a opinião dos especialistas e os dados disponibilizados pelos entrevistados do Ministério da Ciência e Tecnologia e do Centro Nacional de Referência em Hidrogênio.

Na sequência são tratadas as perspectivas para o Brasil na Economia do Hidrogênio e como essa realidade está se construindo no país. O objetivo é analisar em que condições o atual regime energético brasileiro, para fornecimento de energia estacionária e veicular, poderá incorporar as tecnologias do hidrogênio, produzido a partir de fontes renováveis, e das células a combustível. Para tanto, a seção procura responder às seguintes questões: De que forma a Economia do Hidrogênio poderá representar uma ruptura no regime energético brasileiro? Quais os obstáculos e as oportunidades para a Economia do Hidrogênio? Quais os tipos de infraestrutura e de células a combustível mais adequados para o país? Quando o Brasil poderá adotar o hidrogênio e a célula a combustível como um regime energético?

3.1 As Instituições que coordenaram a elaboração do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil

3.1.1 Ministério de Minas e Energia – MME

O Ministério de Minas e Energia (MME) tem por atribuição propor ao Presidente da República as políticas nacionais e medidas para o setor energético, sendo o representante legal do Brasil para assuntos relativos à política do hidrogênio também no exterior. Assim é que o MME se responsabilizou pela organização e redação final do Roteiro para a Estruturação da Economia

do Hidrogênio no Brasil. Para tanto, fez uso da experiência prévia com o biodiesel e com o Programa Nacional de Introdução e Uso do Biodiesel, organizando o Roteiro à sua semelhança.

Dentre as iniciativas provenientes desse Ministério voltadas para a Economia do Hidrogênio destaca-se, além das ações políticas, a participação no Projeto Ônibus Brasileiro a Hidrogênio, que acontece mediante parceria com a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU). Outras instituições parceiras também participam do Projeto, tais como o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o *Global Environmental Facility* (GEF) e a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). A participação do PNUD/GEF se deve ao país ser o maior mercado mundial e o maior produtor mundial de ônibus. Registra-se que a frota desse tipo de veículo na Região Metropolitana de São Paulo é a de maior concentração no mundo e também uma das mais poluentes.

Na operacionalização do Projeto o MME é o diretor, e a EMTU, a gerenciadora. O Projeto abrange a operação e manutenção de ônibus protótipos com células a combustível e movidos a hidrogênio que serão utilizados no Corredor Metropolitano São Mateus/Jabaquara, em São Paulo. No total o Projeto construirá um protótipo e mais quatro ou cinco ônibus que integrarão a frota da EMTU. A previsão é que esses ônibus fiquem em circulação por pelo menos dois anos até que sejam feitos todos os testes. Foi destacado pelo entrevistado do MME que, além dos ônibus, existe a previsão de implantação de uma estação para produção de hidrogênio por meio de eletrólise da água para armazenamento e utilização como combustível.

Segundo o MME, o passo mais importante na implementação do projeto foi dado em maio de 2006 com a assinatura do contrato de fornecimento do primeiro ônibus e de toda a infraestrutura necessária para desenvolvê-lo em 2007. O projeto terá investimentos da ordem de US\$ 16 milhões e o contrato foi assinado por um consórcio de empresas.²⁸

Outra iniciativa por parte do MME aconteceu em março de 2007, quando publicou em seu site a abertura de processo de contratação de um profissional especializado em hidrogênio para realizar a coordenação das atividades de interesse nacional relacionadas ao tema. Dentre as atividades de responsabilidade desse especialista, destacam-se: desenvolver as atividades de

²⁸ AES ELETROPAULO – especificação da subestação, conexão, qualidade e disponibilidade de energia; BALLARD POWER SYSTEMS – design, desenvolvimento e fabricação da célula a combustível; EPRI – gerenciamento do projeto e líder do consórcio; HYDROGENICS – fabricante do eletrolisador e equipamentos da estação de abastecimento de hidrogênio; MARCOPOLO – fabricante da carroçaria e seus componentes; NUCELSYS – desenvolvimento, fabricação e engenharia de aplicação dos sistemas de célula a combustível; PETROBRAS DISTRIBUIDORA – integradora e operadora da estação de abastecimento de hidrogênio; TUTTOTRASPORTI – integradora do ônibus completo e fabricante dos chassis.

consultoria de forma integrada com as equipes técnicas responsáveis pelo assunto hidrogênio no MME; elaborar estudos que subsidiem a atuação do MME na cooperação bilateral Brasil-EUA em Tecnologias de Energia a Hidrogênio; revisar o Roteiro Brasileiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio; revisar e atualizar os Projetos Estruturantes apresentados no Roteiro; elaborar a metodologia para o acompanhamento do desenvolvimento dos Projetos Estruturantes; elaborar estudos que subsidiem a atuação do MME no âmbito da Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE).

3.1.2 Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT

O MCT é responsável pela formulação e implementação da Política Nacional de Ciência e Tecnologia no Brasil e também pela coordenação das políticas setoriais pertinentes à C&T. A relação do MCT com o tema Economia do Hidrogênio no Brasil teve seu início em 1995, quando o Ministério começou a estimular ações para o desenvolvimento de tecnologias da célula a combustível e do hidrogênio. Tanto é assim que a partir de 1999 o MCT passou a considerar a reforma do etanol para produção do hidrogênio como nicho de mercado a ser ocupado pelo Brasil na América Latina (MCT, 2005).

Segundo os entrevistados, em relação ao hidrogênio e às células a combustível, o objetivo do MCT é fomentar a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico de algumas áreas que se colocam como prioridade para o governo. Assim, no que tange às interações para a Economia do Hidrogênio no Brasil, o MCT é responsável pelo fomento às pesquisas e aos desenvolvimentos tecnológicos destacados pelo MME.

3.1.3 Centro Nacional de Referência em Hidrogênio – CENEH

O CENEH foi criado em 2001 no âmbito dos Centros Nacionais de Referência do MCT. O processo de criação iniciou-se durante o IV Encontro do Fórum Permanente de Energias Renováveis, realizado de 06 a 09 de outubro de 1998, em Recife - PE, que congregou os cinco Centros Nacionais de Referência em energias renováveis existentes até então.²⁹ Durante esse

²⁹ Centro Brasileiro de Energia Eólica, localizado na Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Centro Brasileiro para o Desenvolvimento de Energia Solar Térmica - GREEN SOLAR, instalado na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC-MG, Centro Nacional de Referência de Pequenas Centrais Hidroenergéticas - CERPCH,

encontro realizou-se também o I Workshop de Energia do Hidrogênio, que propôs ao Fórum a criação de um Centro Nacional de Referência em Hidrogênio, o que foi aprovado na plenária final do Encontro.

No final do ano 2000 foi assinado o convênio de criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio – CENEH, localizado no Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP (LH2), vale lembrar, contudo, que o CENEH não pertence a esta universidade, visto que resulta de um convênio de cooperação entre várias entidades.³⁰

Uma vez implantado, o CENEH começou a se articular para criar uma área específica de atuação e assim obter recursos. No âmbito dessa articulação, desde 2002, o Centro organizou e ficou responsável pelo Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível que acontece na UNICAMP em anos pares, atividade que rende recursos, contatos internacionais e funciona como um disseminador de informações. Além do Workshop, o CENEH criou um curso de segurança em hidrogênio e pretende iniciar um projeto de educação para o hidrogênio, atividades ligadas à política e não propriamente ao desenvolvimento tecnológico. Assim, enquanto o CENEH tem concentrado seus esforços nas ações políticas, o Laboratório de Hidrogênio (LH2), também localizado na UNICAMP, tem promovido o desenvolvimento tecnológico das seguintes linhas de pesquisa: geração eletrolítica do hidrogênio; aplicações automotivas do hidrogênio; economia do hidrogênio; análise de traços e padronização gasosa; reforma do etanol; e planejamento energético.

3.1.4 Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC

O LACTEC é um centro de pesquisa tecnológica sem fins lucrativos, localizado no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba. O primeiro projeto do LACTEC na área do hidrogênio aconteceu em parceria com a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL) e teve por objetivo estudar a tecnologia e analisar a viabilidade técnica e econômica de três plantas comerciais da Célula a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC) fornecidas pela

localizado na Escola Federal de Engenharia de Itajubá (MG) – EFEI, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL e Centro de Referência em Biomassa - CENBIO, instalado na Universidade de São Paulo - USP.

³⁰Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT; Secretaria de Estado de Meio Ambiente de São Paulo - SMA/SP; Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP; Universidade de São Paulo – USP; Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG; Organização não Governamental Vitae Civilis - Instituto para o Desenvolvimento, Meio Ambiente e Paz.

UTC Fuel Cells. O modelo estudado possui um reator que produz hidrogênio a partir do gás natural. As plantas foram instaladas em 2001, a primeira na COPEL, a segunda no LACTEC e a terceira no Hospital Erasto Gaertner,³¹ todas em Curitiba. Na época em que foram adquiridas, as PAFC eram a tecnologia de célula mais madura que estava disponível. O projeto já foi concluído e o relatório final entregue à COPEL. As células continuam em operação por meio de contrato de prestação de serviços entre LACTEC e COPEL.

Atualmente os projetos do LACTEC continuam sendo mais voltados para as células, mas o instituto pesquisa a produção do hidrogênio mediante parcerias. Uma delas acontece com a Universidade Estadual de Maringá - UEM, que está desenvolvendo um catalisador para a produção do hidrogênio a partir do etanol. No futuro, o LACTEC pretende adquirir uma célula PEM de 1 kW para utilização do hidrogênio gerado a partir do etanol.

O LACTEC mantém ainda uma parceria com COPEL financiada pela FINEP. Essa parceria se propõe a analisar a viabilidade do hidrogênio produzido a partir do metanol verde, obtido da biomassa. O projeto considera que no futuro será possível usar o metanol para produzir o hidrogênio, o que pode ser mais simples do que produzir hidrogênio de etanol.

Destaca-se uma terceira parceria com o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRÁS), para instalação de uma célula de tecnologia PAFC igual à célula do LACTEC, operando desde junho de 2002.

3.1.5 Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ – LABH2/COPPE

O Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ – LABH2/COPPE é parte integrante do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Fundado em 1984, desenvolve pesquisa básica e aplicada com o objetivo de criar novos materiais, processos e dispositivos necessários para o uso energético do hidrogênio.

Para financiar as suas linhas de pesquisa, o Laboratório têm obtido recursos junto a órgãos governamentais, como CNPq, FINEP, MCT, e a empresas públicas e privadas, tais como: Petrobrás, Oxiten, Renault, Villares.

³¹ Em julho de 2007 entrou em operação na cidade de Curitiba a célula comprada em 2001 para o Hospital Erasto Gaertner. Apesar de somente ter entrado em operação em 2007 a célula não apresenta problemas de operação e atende às características do início de sua vida útil (<http://portallh2.com.br>).

O LABH2/COPPE desenvolve algumas linhas de pesquisa no campo do hidrogênio, mas as áreas de eletroquímica e de materiais,³² consideradas críticas para a utilização do hidrogênio como energético, são suas prioridades.

O LABH2/COPPE atua na produção, no armazenamento e no uso energético do hidrogênio. Para cada área foram elaboradas algumas opções estratégicas. O hidrogênio foi inicialmente produzido a partir do gás natural, depois do biogás e agora o etanol também é um recurso. Para o armazenamento, o Laboratório da COPPE emprega a solidificação rápida, que permite produzir materiais amorfos, com estruturas cristalinas diferenciadas. Quanto ao uso energético do hidrogênio, o Laboratório desenvolve a célula a combustível de óxido sólido.

3.1.6 Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) foi fundado em 1973. Dentre as ações do Instituto para o desenvolvimento da Economia do Hidrogênio no Brasil destaca-se um projeto apresentado ao Fundo Setorial de Energia (CTENERG), cujo objetivo é montar o primeiro laboratório de confiabilidade metrológica do hidrogênio no Brasil. O Instituto já possui um laboratório na área de química, que trata de gases do hidrogênio, mas esse novo laboratório será para o hidrogênio como vetor energético. A proposta é fazer os testes com as células PEM e, gradativamente, passar à cultura metrológica de rastreabilidade para o hidrogênio.

Outra participação do Instituto teve seu início em outubro de 2005, quando passou a integrar um projeto de Cooperação Internacional na União Européia. A Cooperação Internacional foi estabelecida como um requisito para a efetivação do projeto.

O entrevistado do INMETRO afirmou que nesse projeto a participação do Instituto consiste na elaboração de um glossário de terminologia que conterà, inicialmente, todos os termos necessários para a área de *Regulation, Codes, Standarts* (RCS). O projeto foi montado no início de 2006 e as suas iniciais são FCTQA – *Fuel Cell Testing Quality Assurance* e têm relação com a TIB³³ (Tecnologia Industrial Básica) brasileira. Segundo esse entrevistado, o INMETRO,

³² Os catalisadores que processam os combustíveis para a produção de hidrogênio e os materiais que compõem as células, tais como: os eletrodos (o ânodo e o cátodo), o eletrólito, o coletor de corrente e as placas separadoras.

³³ A TIB tem uma sequência de disciplinas técnicas que toda indústria, todo laboratório deve ter para estruturar de maneira coordenada qualquer trabalho técnico (metrologia, normalização, regulamentação técnica e avaliação de conformidade).

o projeto é importante porque essa terminologia criada poderá ser usada para o lançamento de produtos no mercado.

3.2 A participação do Brasil nas instituições internacionais

Em 2003 o governo brasileiro assinou com os Estados Unidos um memorando de entendimento que criou a comissão mista Brasil/Estados Unidos para assuntos de energia. No âmbito desse acordo, os Estados Unidos convidaram o Brasil a integrar a Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE). A participação brasileira teve inicialmente por representante o MME, e posteriormente incorporou o MCT. As questões relacionadas à política energética ficariam a cargo do MME e as questões científicas e tecnológicas a cargo do MCT. Atualmente, o Ministro de Minas e Energia representa o país no Comitê Diretor da IPHE e o seu substituto é o titular da Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Recursos Renováveis, órgão do MME.

Desde a entrada do Brasil na IPHE, alguns coordenadores do Roteiro participaram de reuniões, tanto do Comitê de Implementação quanto do Comitê Diretor. Ressalta-se que, quando o Comitê de Implementação organizou-se em torno de cinco subcomitês para elaboração dos *Scoping Papers*, já citados no quadro 1.2, o Brasil foi convidado a integrar cada um deles, e os responsáveis foram os mesmos que coordenaram os capítulos do Roteiro Nacional.

Ainda em termos da participação brasileira na IPHE, os entrevistados enfatizaram que o Brasil precisa que os Ministérios (MME e MCT) sejam mais atuantes, ou seja, estabeleçam um grupo que, com o apoio da academia e das empresas, organize as políticas nacionais para a Economia do Hidrogênio. Um dos entrevistados justificou o seu posicionamento comentando que, por enquanto, as ações brasileiras têm sido pontuais e muitas vezes induzidas pelas ações da IPHE.

Os entrevistados argumentaram que um dos pontos positivos para o Brasil é o fato das informações serem rapidamente disseminadas em todos os países participantes, o que possibilita aos especialistas brasileiros conhecerem as ações provenientes de outros países para a Economia do Hidrogênio. Essas informações são analisadas conjuntamente em reuniões organizadas para avaliar a área de hidrogênio no mundo, bem como as perspectivas de desenvolvimento. Os entrevistados consideraram que essa é uma grande oportunidade para o Brasil participar dos

debates internacionais a respeito do tema. Como ponto negativo em relação à IPHE, os entrevistados citaram o fato de este ser um movimento estabelecido pelos EUA e por esse motivo defende os interesses norte-americanos, interesses que podem estar relacionados, por exemplo, ao uso de combustíveis fósseis para produzir o hidrogênio

Acrescenta-se, de acordo com informações cedidas pelos entrevistados, que até 2005 o Brasil foi bastante ativo na IPHE, mas, com o passar do tempo houve um enfraquecimento das iniciativas do governo. Porém, segundo os entrevistados, de maneira geral, em âmbito internacional as iniciativas também se arrefeceram, um processo natural em toda tecnologia, um tempo necessário para que seja avaliado qual o melhor caminho a ser adotado.

Um dos eventos mais importantes para o Brasil ocorreu em 2005, quando aconteceu uma reunião do Comitê de Implementação da IPHE no país. Nesse evento o governo brasileiro lançou o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, o que causou um impacto muito grande nas outras delegações, pois não estava sendo esperada uma ação tão bem estruturada do Brasil. Na mesma reunião, a IPHE, por intermédio do Comitê de Implementação, lançou os *Scoping Papers*.

3.3 As iniciativas nacionais para a Economia do Hidrogênio

Foi a partir das ações internacionais estabelecidas para o hidrogênio e para a célula a combustível, principalmente aquelas oriundas da IPHE, que o Brasil, sob as orientações do MME e do MCT, também procurou concentrar os seus esforços internos. Sendo assim, o primeiro marco relacionado à Economia do Hidrogênio no Brasil aconteceu em 2000, quando o MCT criou o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH). Posteriormente, em novembro de 2002, foi lançado o Programa Brasileiro de Sistemas Células a Combustível (PROCAC), que em 2005 passou a ser denominado Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (PROH2). Na sequência foram criadas as Redes de Pesquisa, cujas expectativas vinham desde a época da elaboração do PROCAC/PROH2. Houve ainda outra ação que foi fruto do Roteiro, os Projetos Estruturantes. Cada um desses marcos será explicado no decorrer desta seção.

As ações políticas para o desenvolvimento da Economia do Hidrogênio no Brasil são recentes, discutidas essencialmente na última década. Entretanto, na comunidade científica o

tema tem sido objeto de estudo há muito mais tempo. Já em 1989 D'Ajuz et al. (1989) haviam destacado diversos fatores para justificar a implementação da Economia do Hidrogênio do Brasil, entre eles:

a) Transmissão: em distâncias de 2.000 a 3.000 quilômetros por terra, o que acontece em regiões como na Amazônia, a distribuição do hidrogênio através de dutos pode ser considerada um modo econômico de transmissão de energia.

b) Células a combustível: O Norte do Brasil é caracterizado pela baixa densidade populacional. Para evitar a poluição causada pela utilização da madeira como combustível e a destruição da floresta tropical, acredita-se que a célula a combustível com a utilização do hidrogênio eletrolítico pode ser uma alternativa que satisfaça as pequenas demandas por eletricidade em comunidades isoladas.

c) Flexibilidade: O hidrogênio é um vetor energético utilizado como um combustível e tem como vantagem a possibilidade de ser obtido de diversas fontes.

d) Aspecto não-polvente: Estudos ambientais estão trazendo à tona os males do sistema fundamentado nos combustíveis fósseis e estão pressionando para a adoção de um novo sistema energético menos poluente.

e) Armazenagem: Em situações em que o excesso de energia hidrelétrica é perdido porque não há utilização imediata, a produção de hidrogênio em hidrelétricas do Norte do país pode ser uma alternativa para armazenar a energia.

Além dos fatores citados, para muitos pesquisadores o dilema energético brasileiro decorre de um terço do potencial hidroelétrico se encontrar na região amazônica, enquanto os grandes centros de consumo estão na Região Sudeste. Coloca-se, assim, a questão quanto ao transporte de grandes blocos de energia em longas distâncias. Para tentar resolver esse problema, Mattos (1985) e D'Ajuz et al. (1989) propuseram que o hidrogênio fosse estocado e armazenado, considerando-o uma energia complementar à eletricidade. Em função do pioneirismo brasileiro no estabelecimento do programa do álcool, Mattos entende que o país deve ser um exemplo, quiçá líder, nas tecnologias para o hidrogênio e para a célula a combustível entre os países em desenvolvimento. Mattos afirmou que a demanda energética pode ser reorganizada nesses países mais facilmente do que nos países industrializados, para os quais a infra-estrutura energética já está totalmente instalada

Mais recentemente, Lima e Veziroglu (2001) sustentaram que o atual regime energético dificilmente atenderá à demanda de energia no futuro e as conseqüências para o meio ambiente tendem a se agravar. Os autores descreveram uma prospecção do consumo energético no Brasil para o século XXI, na qual citam três situações. Na primeira situação não ocorrerá a introdução do hidrogênio, neste caso os autores acreditam que acontecerá uma saturação na oferta de energia e esta limitará o consumo energético por volta de 2050. A segunda situação apresenta uma lenta introdução do hidrogênio que, conseqüentemente, permitirá um aumento proporcional no consumo energético. A terceira situação é a mais otimista para os autores, visto que considera a rápida introdução do hidrogênio e um consumo energético crescente até o final do século. Essa perspectiva exposta por Lima e Verizoglu é interessante sob o ponto de vista do aumento no acesso à energia com a introdução do hidrogênio. Porém, como o hidrogênio é um vetor energético, o uso direto das fontes renováveis para a geração de energia também poderia promover resultado semelhante, ou seja, aumentar a oferta de energia, mesmo sem a produção do hidrogênio.

Os mesmo autores ainda citaram uma situação hipotética para o caso da rápida introdução do hidrogênio. Para eles, a demanda por combustíveis fósseis no Brasil atingirá o seu pico em 2035, decrescendo até atingir o nível zero no ano 2055, o que poderia ocorrer pelo esgotamento das fontes fósseis em paralelo à inserção do hidrogênio na matriz energética. Contudo, essa argumentação a respeito do esgotamento das fontes fósseis não pode ser confirmada, principalmente no que diz respeito ao carvão. Sendo assim, podem ser consideradas outras hipóteses, como a adoção voluntária das fontes renováveis e o seu respectivo uso para a geração do hidrogênio, o que poderia levar a um gradativo abandono no uso dos combustíveis que contenham carbono. Essa possibilidade seria a ideal para a descarbonização, entretanto não parece viável para o país abandonar o uso das fontes fósseis enquanto ainda houver reservas. O mais provável é que sejam adotadas soluções mais simples e baratas como os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo para conter o aumento das emissões de CO₂ na atmosfera (LIMA e VERIZOGLU, 2001).

Considerando as informações levantadas pelos autores citados, foi possível observar que a Economia do Hidrogênio é identificada como uma possibilidade para o Brasil que poderá trazer vantagens, principalmente em relação ao atendimento de comunidades isoladas, que hoje têm acesso restrito à energia, e também quanto aos benefícios para o meio ambiente, promovendo a

descarbonização. Mas, assim como no panorama internacional, não se observa uma certeza quanto à inserção das tecnologias para o hidrogênio e para a célula a combustível no Brasil, principalmente na primeira metade do século XXI, enquanto as fontes fósseis estiverem amplamente disponíveis para a geração energética. Embora não seja possível indicar o rumo exato em relação à Economia do Hidrogênio, observa-se que o país busca aprimorar o conhecimento e disseminar o tema entre os membros da comunidade científica, bem como junto aos setores público e privado.

Dando continuidade, os documentos e as ações citados no início desta seção são resumidos e complementados com informações levantadas nas entrevistas junto aos coordenadores do Roteiro. São abordados os documentos nacionais, destacando particularidades ocorridas durante a elaboração e condutas posteriores.

3.3.1 O Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio

O Ministério da Ciência e Tecnologia, por meio da Portaria MCT nº 731 de 14.11. 2002, instituiu o Programa Brasileiro de Sistemas Células a Combustível, o PROCAC. Este foi o primeiro documento oficial brasileiro relativo ao hidrogênio e à célula a combustível, cujo objetivo inicial foi desenvolver a tecnologia da célula a combustível. Em 2005, o PROCAC passou a ser denominado Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (PROH2). A mudança de nome justificou-se porque esse último passou a abranger a Economia do Hidrogênio na sua totalidade, ao contrário do nome inicial que destacava apenas as células a combustível. O PROCAC/PROH2 passou a abranger a cadeia energética que engloba desde a escolha das fontes para a produção do hidrogênio, depois o transporte, a armazenagem, a distribuição e o uso por meio das células a combustível. Ademais, aborda ainda a problemática da infra-estrutura, as regulamentações e a formação de recursos humanos. A troca da denominação também se deu porque o termo Economia do Hidrogênio tornou-se referência mundial para aqueles que pesquisam tanto o hidrogênio quanto a célula a combustível. No entanto, apesar da mudança do nome, o documento ainda permanece o mesmo.

Na perspectiva de implementação das atividades previstas no PROCAC/PROH2, o cronograma previu um prazo de dez anos para assegurar o desenvolvimento do mercado nacional, sendo que o principal objetivo é:

promover ações integradas e cooperadas, que viabilizem o desenvolvimento nacional da tecnologia de sistemas Célula a Combustível, habilitando o país a se tornar um produtor internacionalmente competitivo nesta área. Pretende-se ainda, apoiar o estabelecimento da indústria nacional para produção e fornecimento de sistemas energéticos com células a combustível (MCT, 2005, p. 2).

No texto do PROCAC/PROH2 foram descritas as perspectivas inerentes à célula e ao hidrogênio, bem como as principais consequências das mudanças energéticas para a sociedade. Acrescenta-se que foi recomendado que as empresas, grupos de pesquisa e o poder público desenvolvam e implementem projetos demonstrativos. Entende-se, portanto, que a finalidade desses projetos é facilitar a compreensão e aceitação dos produtos e processos a fim de garantir ao país o domínio das tecnologias que poderão trazer novos paradigmas à questão da geração de energia.

Foi apontado no texto do PROCAC/PROH2 que um dos nichos de mercado mais promissores para aplicações das células a combustível no Brasil é o de geração distribuída (descentralizada) de energia elétrica, fundamentada nas células a combustível para uso estacionário, com potencial especialmente para 5 a 200 kW. Já a produção nacional do hidrogênio privilegia a utilização do etanol, da hidroeletricidade e do gás natural (MCT, 2005).

Nesse documento foram descritos os seguintes desafios para a Economia do Hidrogênio no Brasil: o desenvolvimento tecnológico das células; a produção, a armazenagem e a distribuição do hidrogênio; a capacitação dos recursos humanos; a regulação quanto à segurança e padronização; e a necessidade de parcerias efetivas entre as instituições do governo, o setor industrial, o setor de serviços, as ONGs etc.

Os resultados esperados pelo PROCAC/PROH2 foram delineados de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e as diretrizes dos Fundos Setoriais. Para efetivação do Programa foram propostas, dentre diversas ações estratégicas: a implementação das Redes de informação, de formação e capacitação e de desenvolvimento tecnológico; a participação em mecanismos de cooperação internacional; e o incentivo aos sistemas energéticos Cac (célula a combustível) de produção nacional por meio de projetos de demonstração com a participação da indústria e das concessionárias de energia.

Para viabilizar as ações citadas, o Programa conta com o fomento do governo federal, envolvendo o MCT, o MME, e as ações de fomento provenientes das seguintes instituições: MCT/FINEP, MCT/CNPq, ANEEL, ANP e FAPESP, além dos fundos setoriais e do programa PIPE (Programa de Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas) da FAPESP.

3.3.1.1 A elaboração do PROCAC/PROH2

Segundo informações disponibilizadas pelos entrevistados, a elaboração do PROCAC/PROH2 ocorreu por iniciativa do MCT, tendo como ponto de partida um trabalho de prospecção sobre o tema no país, visando à ordenação das ações de P&D que estavam sendo realizadas na época. Esse trabalho foi coordenado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Paraná, junto às instituições de pesquisa dedicadas à Tecnologia. Os resultados desta prospecção foram apresentados ao Comitê Gestor do CTEnrg e serviram de referência para o PROCAC/PROH2.

A operacionalização do levantamento das informações necessárias começou quando o CGEE contratou uma consultora externa, a Doutora Helena Chum³⁴ que, com o apoio do CENEH, fez um diagnóstico da situação no Brasil, com a finalidade de direcionar o próximo passo que seria a elaboração do documento. Na época, a Doutora Helena Chum indicou a comissão responsável pela elaboração do PROCAC/PROH2 com os representantes do LACTEC, do CENPES/PETROBRÁS, da UNICAMP e do LABH2/COPPE; posteriormente, o MCT também veio a integrar o grupo. A construção do PROCAC/PROH2 foi um trabalho que durou mais de seis meses e teve como produto final, desenvolvido pelos cinco participantes, uma proposta de programa de P&D. Como resultado, entregaram essa proposta ao MCT, que fez algumas modificações no documento e o publicou, inicialmente, como PROCAC.

Durante a elaboração do programa foi considerada a necessidade de investimentos em P&D e a ampliação da colaboração entre grupos de pesquisa, o que deu origem às Redes de Pesquisa e Desenvolvimento. A esse respeito, foi informado pelos entrevistados que não há instituições no país que possam desenvolver isoladamente um sistema completo para a tecnologia. Para tanto, as Redes visam substituir os projetos individuais e promover o financiamento de um programa integrado, com metas estabelecidas e compromissos de colaboração em longo prazo entre as entidades governamentais, indústrias, universidades e centros de pesquisas envolvidos.

³⁴ A Dra. Helena Li Chum (Diretora da Divisão Química para Sistemas de Bioenergia do Laboratório Nacional de Energia Renovável – NREL, uma das divisões do Departamento de Energia do Consórcio Federal de Laboratórios – FLC – para Transferência de Tecnologia do governo dos Estados Unidos da América), contratada para assessorar o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), ajudou no desenvolvimento e seguimento do Programa Brasileiro de Células a Combustível.

O passo seguinte à elaboração do PROCAC/PROH2 foi um documento mais completo, envolvendo diversas instituições de pesquisa e especialistas na área, o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. O PROCAC/PROH2 se tornou um insumo para o Roteiro, principalmente nos capítulos que dizem respeito à formação de recursos humanos e aos sistemas de conversão do hidrogênio, ou seja, a célula a combustível, prioritariamente, e os motores de combustão.

3.3.2. O Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil

O Roteiro foi lançado em 2005, sob a coordenação do MME, tendo contado com 115 participantes no país - representantes de empresas, universidades e órgãos do governo - mais os coordenadores, ou seja, pesquisadores convidados a coordenar cada capítulo desse documento. Os coordenadores representaram as seguintes instituições: MME, CENEH, CENPES, LABH2/COPPE, LACTEC, MCT e INMETRO.

Organizado nos moldes de um programa, cada capítulo do Roteiro abrangeu um tema diferente relacionado ao hidrogênio e à célula a combustível, conforme resumidos a seguir.

O capítulo 1, liderado pelo MME, abrangeu as bases para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio como mais um elemento diversificador da matriz energética. A previsão para o mercado brasileiro é que o hidrogênio para uso energético esteja disponível até 2025.

Como oportunidades de mercado para o Brasil foram apontadas as seguintes: a geração distribuída; o uso de eletricidade no horário fora do pico para produção de hidrogênio; a combinação de células solares ou de centrais eólicas, eletrolisadores e células a combustível para pequenas comunidades isoladas; ônibus urbanos para transporte coletivo; e veículos de carga.

Como principais barreiras e desafios para o desenvolvimento da Economia do Hidrogênio destacaram-se o desconhecimento da sociedade sobre o hidrogênio como vetor energético; a inexistência de marco regulatório; a inexistência da cadeia de suprimento do hidrogênio energético; a defasagem tecnológica; a falta de recursos humanos qualificados; a inexistência de capacidade industrial para produção de equipamentos; a ausência de infra-estrutura para distribuição de hidrogênio; e a inexistência de normas de segurança específicas.

As propostas elencadas para o desenvolvimento da Economia do Hidrogênio no Brasil, tentando, assim, resolver parte dos obstáculos identificados, foram: a divulgação para a

sociedade; a criação de marco regulatório; o estabelecimento de comitês normalizadores; o incentivo à incubação de empresas; o acesso aos recursos de pesquisa e desenvolvimento; e o fomento à parceria entre empresas brasileiras e estrangeiras.

O capítulo 2, liderado pelo CENEH/UNICAMP, abordou a produção de hidrogênio. Como fontes para o hidrogênio no Brasil foram consideradas a eletrólise da água; a reforma do gás natural; o etanol; a gaseificação da biomassa e a conversão biológica; e alguns processos alternativos.

Para a geração do hidrogênio por meio da eletrólise da água, a proposta foi aproveitar as usinas hidrelétricas a fio d'água, que, em geral, não possuem reservatórios com grande capacidade de acumulação e podem empregar essa energia para produzir o hidrogênio. Para esse processo, as barreiras estão nos custos elevados devido à necessidade de importação de eletrolisadores e seus periféricos, bem como a reduzida capacidade industrial.

A reforma do gás natural foi justificada por ser a tecnologia mais desenvolvida até o momento e a mais competitiva para a produção do hidrogênio em curto e médio prazo. Porém, as reservas de gás natural são insuficientes para a indústria e para o setor veicular. Além disso, faltam no país unidades de reforma compactas e integradas e os reatores são ineficientes para reforma de pequeno porte.

O etanol foi considerado como uma vantagem competitiva para o Brasil, que possui aprendizado acumulado nas tecnologias de produção. Ademais, a produção do hidrogênio por meio do etanol é uma tecnologia embrionária no mundo todo. Como barreira foi destacada a inexistência de tecnologia de catalisadores em escala comercial.

Para a gaseificação da biomassa e conversão biológica, os métodos considerados foram a gaseificação e a biodigestão ou decomposição anaeróbica da matéria orgânica, uma vez que o Brasil possui grandes volumes de dejetos agrícolas para biodigestão. As barreiras estariam na falta de gaseificadores para a célula a combustível e reformadores de biogás compactos.

Os processos alternativos citados no Roteiro abrangeram duas possibilidades que ainda precisam de muitos investimentos em pesquisa básica. O primeiro é o fotovoltaico acoplado a um eletrolisador de água, sistema que visa transformar a energia solar em hidrogênio. O segundo é a bioprodução de hidrogênio, no qual ocorre produção biológica de hidrogênio por meio de algas e bactérias.

O capítulo 3, liderado pelo CENPES/PETROBRÁS, tratou da logística do hidrogênio. Atualmente a produção do hidrogênio acontece de forma distribuída, como é o caso das refinarias de petróleo, então mediante a produção centralizada, com o fornecimento para pequenas distâncias em carretas com vasos pressurizados.

Dentre as possibilidades apontadas para o futuro destacaram-se os veículos de transporte coletivo e frotas de transporte de carga urbana abastecidos por hidrogênio produzido nas próprias garagens; e as frotas veiculares usadas na agroindústria abastecidas com hidrogênio produzido localmente a partir da biomassa. Para os postos de abastecimentos a proposta foi interligá-los por uma rede centralizada de gasodutos e(ou) terminais regionais de distribuição por carretas.

Como barreiras logísticas foram evidenciadas a indisponibilidade de tecnologias para a implementação de gasodutos de hidrogênio e(ou) biocombustível; a inexistência de corredores de distribuição do hidrogênio e(ou) do GN+H₂; e a inexistência de estudos geofísicos para localização de reservatórios subterrâneos para estocagem de hidrogênio.

O capítulo 4, liderado pelo Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ, tratou dos sistemas de conversão. Os sistemas de conversão energética do hidrogênio transformam a energia química deste combustível em energia elétrica e térmica a partir de processos eletroquímicos ou de combustão. Estes sistemas de conversão dividem-se em células a combustível e motores de combustão interna.

Os motores de combustão interna podem ser adaptados ao consumo de hidrogênio puro ou misturado ao gás natural (GN+H₂); foram tratados como uma etapa de transição para a Economia do Hidrogênio.

Dentre as barreiras, foram mencionados o número limitado de profissionais especializados para lidar com as tecnologias de conversão do hidrogênio, o alto custo, a baixa durabilidade e a confiabilidade ainda inadequada das células a combustível.

O capítulo 5, liderado pelo LACTEC, descreveu as aplicações do hidrogênio como vetor energético. Foram previstas quatro aplicações principais para o hidrogênio na matriz energética brasileira. As barreiras estão nos custos, na ausência de regulamentação, na falta de maturidade tecnológica e no baixo desempenho.

A primeira aplicação é a geração distribuída de energia elétrica, que abrange os hospitais, os bancos, os aeroportos, os centros de computação, os eventos culturais e as unidades industriais

com elevado grau de automação, bem como demais aplicações cuja carga elétrica deve ser alimentada ininterruptamente.

A segunda forma de aplicação é para o transporte urbano, coletivo e de carga, de tal modo que para o Brasil a ênfase vem sendo dada no desenvolvimento de ônibus a hidrogênio. Para tanto, inicialmente o hidrogênio será produzido nas garagens, por reforma do gás natural, mas no futuro será suprida por uma rede de distribuição nacional, oriundo do gás natural e do etanol.

A terceira possibilidade de aplicação é a armazenagem de energia, o que pode ocorrer mediante a conversão da energia elétrica em energia química e então sua armazenagem na forma de hidrogênio. Posteriormente essa energia poderá ser convertida em eletricidade por meio das células a combustível ou motores de combustão interna. Também é possível armazenar a energia excedente originada das fontes solar e eólica, cuja eletricidade pode ser empregada para a produção do hidrogênio por meio da eletrólise da água.

A quarta possibilidade está no atendimento às comunidades isoladas. Neste caso as células a combustível utilizando hidrogênio produzido a partir do etanol, gás natural ou gaseificação da biomassa possuem o potencial de substituir os motores diesel, oferecendo uma opção mais eficiente, de menor manutenção e ambientalmente correta.

O capítulo 6, liderado pelo MCT, centrou-se no desenvolvimento tecnológico e na formação de recursos humanos. Foi relatado que atualmente estão sendo implementados os primeiros cursos de pós-graduação na área, nas seguintes instituições: COPPE, UNICAMP, UFSCar e IPEN. A qualificação estará voltada a atividades de produção; ensino e pesquisa fundamental; pesquisa e desenvolvimento tecnológico; avaliação da tecnologia; estudos de viabilidade técnica e de mercado; gestão de políticas e de negócios.

As barreiras mencionadas dizem respeito à necessidade de adaptar os currículos das engenharias e dos cursos técnicos para formação de pessoal, bem como às dificuldades para remuneração adicional das equipes dos projetos de pesquisa.

O capítulo 7, sob a liderança do INMETRO, abordou os temas metrologia, normalização, regulamentação técnica, avaliação da conformidade, regulação e fiscalização. Propôs que, no futuro, no campo da metrologia legal, o Brasil disponha de normas e regulamentos avançados. No campo da normalização, a ABNT pretende influenciar a normalização internacional junto à ISO/IEC,³⁵ inclusive liderando alguns subcomitês e grupos de trabalho do ISO/TC 197.³⁶ Aos

³⁵ ISO (Organização Internacional para a Normalização)

órgãos governamentais, caberá definir os marcos legais para aplicações da Economia do Hidrogênio.

Dentre as barreiras, identificou-se a ausência de padrões metrológicos, normas, regulamentos técnicos e avaliação da conformidade desenvolvidos concomitantemente com a cadeia do hidrogênio.

O capítulo 8 trouxe as conclusões a respeito do Roteiro. O capítulo 9, denominado Projetos Estruturantes, foi elaborado posteriormente no MME, sem a participação daqueles que elaboraram o Roteiro, define metas e prazos para implementação das diretrizes nele estabelecidas. Os Projetos Estruturantes também estão sintetizados nesta Tese.

3.3.2.1 A elaboração do Roteiro

O Roteiro procurou reunir aspectos gerais, abordando, além do hidrogênio e dos sistemas de conversão, as questões relativas ao mercado, à logística, à distribuição e ao armazenamento, e às principais aplicações, ou seja, examinou a cadeia de suprimento. É um texto decorrente de dezenas de encontros de especialistas e de colaborações obtidas na fase de consulta pública da versão preliminar. Portanto, reflete os entendimentos e as percepções gerais dos participantes a respeito da situação atual da Economia do Hidrogênio no Brasil e no mundo. Conforme mencionado no próprio Roteiro, o documento sugere de forma singela uma visão futurística para a Economia do Hidrogênio.

De acordo com os entrevistados, no processo de elaboração do Roteiro cada instituição líder organizou uma lista de instituições e pesquisadores convidados a participar de um determinado capítulo, mas o interesse não foi tão grande quanto o esperado, principalmente porque não havia uma idéia clara do que seria o documento. Com efeito, no LACTEC, o entrevistado relatou que *“sempre que se identificava uma instituição, ou um pesquisador de alguma instituição, ele passava imediatamente a fazer parte da lista”*. Até a elaboração final dos capítulos ocorreram diversas reuniões com o objetivo de consultar os especialistas em cada assunto, que resultavam em sucessivas versões submetidas à apreciação do grupo.

Contudo, a operacionalização de cada capítulo não ocorreu exatamente do mesmo modo. No CENEH, por exemplo, foram listados os e-mails de muitas pessoas, mas quem efetivamente

IEC (International Electrotechnical Commission)

³⁶ Trata das tecnologias do hidrogênio como vetor energético.

escreveu o capítulo foi a sua equipe interna. No caso do INMETRO fez-se uma grande reunião, praticamente um Workshop, que resultou no capítulo incorporado ao Roteiro.

No final, após serem organizadas todas as informações e elaborada a primeira versão do documento, houve um período, de 31 de janeiro a 2 de março de 2005, para consulta pública, da qual resultou um conjunto de sugestões. Segundo os entrevistados, nesse processo não houve votações, mas num certo momento a coordenação precisou estabelecer as definições necessárias e o coordenador de cada capítulo tentou aprimorar o seu texto mediante reuniões para discutir os pontos polêmicos. Para a consulta pública, os membros do LACTEC elaboraram uma ferramenta para ser utilizada na internet, o que possibilitou agrupar as contribuições das 115 pessoas que opinaram. As sugestões foram colocadas em uma planilha e então foi escrito um relatório com a visão dos participantes. A planilha e o relatório serviram ao MME como linha mestra para elaboração do documento no formato final em que foi publicado.

Na construção do Roteiro, o LACTEC exerceu uma atividade- chave. Foi convidado³⁷ pelo MME para a supervisão técnica e gerência do processo de elaboração do documento. Essa participação ocorreu por intermédio de um convênio estabelecido entre o LACTEC e o MME, que destinou os recursos para as atividades. Esse convênio foi financiado pelo PNUD, que sustentou toda a elaboração do Roteiro e em paralelo ofereceu o suporte técnico para a participação do governo na IPHE. Em função da falta de recursos, com o tempo o LACTEC, e outras instituições que contribuíram na realização do Roteiro, deixaram de participar das reuniões internacionais da IPHE. Os entrevistados informaram que inicialmente quatro a cinco pessoas compunham as missões de governo, depois os pesquisadores deveriam financiar as suas próprias viagens, então principalmente as universidades foram deixando de participar dessas reuniões.

Os entrevistados concluíram que a versão preliminar do Roteiro foi publicada num tempo muito curto, cerca de seis meses, o que acarretou em alguns *gaps*, entendidos como dificuldades e ausências de informações. Um deles é que o Roteiro inicialmente não atendia às expectativas do MME, ou seja, não havia uma definição de metas e prazos como, por exemplo, em 2007 contar com o primeiro protótipo em funcionamento, em 2008 ter um reformador pronto, em 2010 ter uma membrana nacional. Dentre os motivos para a ausência de metas e objetivos citaram que na

³⁷ Este convite resultou do sucesso de um projeto CENPES-LACTEC, um projeto que durou cerca de dois anos e teve por objetivo aumentar o uso do gás natural para a célula a combustível. O projeto conquistou uma premiação da Rede de Gás e Energia, que então convidou o LACTEC para supervisão técnica e gerência do processo de elaboração do Roteiro.

época o conhecimento e as informações sobre o tema eram limitados. No entanto, o representante do MME informou que ambos os ministérios vêm tentando resolver esses gaps. Segundo os entrevistados, quando o Roteiro foi elaborado o país ainda não tinha tecnologias e pesquisas suficientes em andamento para fazer prospecções. Justificaram que atualmente é possível chegar mais próximo, porque existem trinta e quatro instituições, dentre universidades e centros de pesquisa, trabalhando no tema. Nesse sentido, constataram que o Roteiro indicou um conjunto de prioridades, mas essas prioridades não haviam sido estabelecidas cronologicamente.

Os entrevistados referiram que na construção do Roteiro foi definida como prioridade a produção do hidrogênio a partir de fontes renováveis, principalmente o etanol e a biomassa. A eletrólise da água foi considerada a segunda prioridade, pois o país tem tecnologia em produção de eletricidade por meio de usinas hidrelétricas. O gás natural, considerado o insumo de transição, é a terceira prioridade porque a tecnologia de produção do hidrogênio a partir desta fonte já é madura.

Outra consideração feita pelos entrevistados é que a tecnologia para a produção do hidrogênio para fins energéticos é embrionária no mundo todo. Logo, nessa fase o fator de crescimento em relação ao desenvolvimento tecnológico tende a ser exponencial. Por isso, conforme o entrevistado do MME, antes de empreender o esforço de lançamento de um plano, é preciso atualizar constantemente as informações derivadas de projetos de pesquisa, pois estas estão em contínuo desenvolvimento.

Os entrevistados comentaram que durante a elaboração do documento os participantes constantemente se questionavam a respeito do que estariam realizando, se era política ou não. No transcorrer dos trabalhos, restou claro que estavam organizando os elementos que subsidiariam a política no futuro e que a definição da política estaria sob a responsabilidade do MME. Concluíram que o documento conseguiu extrair as informações necessárias para o governo decidir se irá incentivar determinada ação política que poderá culminar no hidrogênio disponível para o consumidor a um preço competitivo e com benefícios para a matriz energética brasileira.

A finalização do Roteiro foi considerada uma meta cumprida e logo na sequência vieram os Projetos Estruturantes que, de acordo com o entrevistado do MME, necessitam de revisão e têm, na coordenação do documento, um obstáculo para a sua continuidade. Um dos problemas relativos à coordenação é que o MME, mediante a Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis, é responsável pelas decisões relativas a todos esses combustíveis, não

existindo uma secretaria exclusiva para o hidrogênio, logo, as ações para esse vetor energético não estão sendo tratadas como prioridade pelo governo atual.

Além dos problemas pertinentes aos Projetos Estruturantes, o MME planeja fazer uma revisão do Roteiro. Neste caso os entrevistados consideraram que já estão sendo feitas pequenas mudanças, mas que também é preciso concluir os estudos que indicarão as metas para uma política voltada ao desenvolvimento da Economia do Hidrogênio. Como descrito anteriormente, os projetos estruturantes corresponderam ao capítulo nove do Roteiro e têm por finalidade operacionalizar as atividades previstas no documento. Seguem-se os detalhes sobre os projetos.

3.3.3 Os Projetos Estruturantes

Com o término da elaboração do Roteiro, o MME concluiu que, apesar de o documento ter direcionado a construção de uma Política Nacional para o Hidrogênio, permanecia ainda a necessidade de serem estabelecidos metas e prazos para alcançar as ações propostas. Então, a partir da identificação dessa necessidade, o Ministério organizou a construção de um novo documento, denominado Projetos Estruturantes, que, após concluído, foi anexado ao texto do Roteiro como o capítulo nove. A finalidade dos Projetos Estruturantes consiste em definir como o Roteiro seria colocado em prática. Para o entrevistado do MME, os Projetos Estruturantes representaram o primeiro passo em busca do Programa Nacional.

Ressalta-se que na elaboração dos Projetos a proposta foi delinear as ações necessárias para 20 anos, no formato de um cronograma. Correspondeu ao primeiro período (2004 a 2005) a visualização de uma versão preliminar do Roteiro, denominada Versão Beta. Marcou o segundo período (2005 a 2006) a elaboração dos Projetos Estruturantes. Desde então, as ações previstas no cronograma, como a Revisão do Roteiro (2006 a 2007) e a preparação para o lançamento do Programa Governamental de Produção e Uso do Hidrogênio no Brasil (2007), não foram efetivadas. Tendo em vista que os prazos pré-definidos não vêm sendo cumpridos, observa-se que o período fixado para a consolidação da Economia do Hidrogênio no Brasil (2007 a 2025) por certo será postergado.

Em uma perspectiva mais detalhada, os Projetos Estruturantes estão organizados em subprogramas que correspondem às fontes para o hidrogênio citadas no Roteiro, ou seja,

Subprograma Etanol, Subprograma Água, Subprograma Gás Natural, perfazendo um total de 69 projetos (apêndice três).

Para o Subprograma Etanol, a proposta dos Projetos Estruturantes estabeleceu um prazo de 15 anos, a partir de 2005, para a implementação. Considerou que a utilização comercial do hidrogênio produzido a partir da reforma do etanol começaria em 2007 e estaria disseminada em 2020.

O Subprograma água tem previsto o ano 2007 como o início de sua operacionalização, e o ano 2015 como da utilização efetiva comercial do hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água

O Subprograma gás natural seria o primeiro a se desenvolver; teria o início em 2007 e seu processo de implementação estaria concluído em 2010.

O Subprograma Biomassa e Processos Alternativos tem o prazo mais longo, com início em 2007 e a utilização comercial do Hidrogênio produzido a partir da Gaseificação da Biomassa e de Processos Alternativos prevista somente para o ano de 2025.

3.3.3.1 A elaboração dos projetos estruturantes

O entrevistado do MME explicou que o capítulo dos Projetos Estruturantes foi elaborado porque no Roteiro não existem prioridades relacionadas a uma ordem cronológica e que por isso o documento não traz objetivos e metas vinculadas a um prazo de execução. A proposta foi complementar o Roteiro organizando as iniciativas futuras. Segundo esse mesmo entrevistado, *“o Roteiro mostrou aonde o país quer chegar, mas não deixou clara qual é a rota, e esse foi o objetivo do capítulo dos projetos estruturantes”*. Um dos objetivos citados pelo entrevistado do MME é lançar para o hidrogênio, nos moldes do biodiesel, um Programa Nacional de Produção e Uso do Hidrogênio, tornando mais explícitas as metas para o país.

Estabelecendo uma relação entre o Roteiro e os Projetos Estruturantes, o representante do MME concluiu que Roteiro é um mapa, isto é, indica como o Brasil pretende se posicionar na Economia do Hidrogênio. Já os Projetos Estruturantes foram construídos com o propósito de operacionalizar a implementação do Roteiro, indicando os melhores caminhos nesse mapa, bem como os prazos para alcançar cada ponto estratégico. Entretanto, ainda não ficou muito claro como essa questão irá funcionar. Nesse sentido, algumas críticas foram registradas nas entrevistas

com os coordenadores do Roteiro, quando foi possível perceber que eles não concordaram com a efetividade dos Projetos Estruturantes.

Para dar continuidade ao Roteiro e também para legitimar os Projetos Estruturantes, o entrevistado do MME esclareceu que o Ministério pretende contratar novos estudos que subsidiarão os planos de ações e metas e informou que está providenciando uma licitação para tratar disso, com recursos do BID ou do PNUD. A intenção é contratar uma consultoria para fazer as devidas revisões no PROCAC/PROH2, no Roteiro e, conseqüentemente, nos Projetos Estruturantes. Na época das entrevistas, o representante do MME informou que a licitação estaria prevista para 2007, e a contratação, provavelmente, para 2007-2008. Informou ainda que nessa revisão serão analisadas as grandes áreas dos Projetos Estruturantes, tais como: desenvolvimento tecnológico, desenvolvimento industrial, desenvolvimento da indústria de bens e serviços, estudos ambientais, estudos tributários e estudos de preços. Por conseguinte, cada uma dessas grandes áreas gerará um estudo detalhado que subsidiará a construção de um plano de ação e de metas e servirá para revisar o Roteiro.

Segundo o entrevistado MME, na etapa da revisão os especialistas na área serão ouvidos e assim poderão contribuir para o planejamento da matriz energética. Nesse ponto, o representante do Ministério comentou que poderão ocorrer dificuldades para conduzir a revisão, pois cada pesquisador naturalmente tentará privilegiar a sua área de estudo e será necessária uma visão isenta para definir o que é prioritário em termos de ciência e tecnologia para o país.

Por isso tudo, entende-se que o Brasil se encontra nos primeiros estágios de desenvolvimento de uma política para o hidrogênio. Acrescenta-se que, apesar de alguns documentos já terem sido elaborados, a maioria das ações desenvolvidas no país não é decorrente desses documentos, ou seja, os estudos em desenvolvimento partem muito mais do interesse de cada instituição em trabalhar com determinadas tecnologias. Apesar dessa realidade, de alguma forma o governo tenta organizar as iniciativas provenientes das universidades, das empresas e dos institutos de pesquisa. Atualmente, a proposta para organizar essas pesquisas considera a criação das Redes de Pesquisa e Desenvolvimento, estruturadas de acordo com o PROCAC/PROH2.

As Redes foram criadas para estabelecer uma organização das instituições e áreas de pesquisa, alocando recursos e mantendo um coordenador para cada área. A próxima seção visa esclarecer o papel das Redes, ilustra como elas estão organizadas, suas propostas, e o que de fato está sendo realizado.

3.3.4 As Redes

A criação das Redes de Pesquisa e Desenvolvimento foi proposta, entre 2000 e 2002, durante a elaboração do PROCAC/PROH2, mas foi somente a partir da metade de 2004 que o Governo Federal, por meio do MCT, aportou recursos para a sua formação. Assim, inicialmente foram criadas três Redes: a Rede de Combustíveis e Hidrogênio; a Rede de Células a Combustível de Óxido Sólido (SOFC); e a Rede de Células a Combustível de Eletrólito Polimérico (PEMFC). Posteriormente, foram acrescentadas a Rede de Sistemas, Integração e Uso e a Rede de Utilização, para as quais ainda não foram formalizados os coordenadores (quadro 3.1)

Cada uma das Redes é constituída por um grande número de instituições que compartilham temas de interesse em comum, conforme quadro 3.2:

Quadro 3.1: Coordenadores das Redes

COORDENADORES EM 2004	COORDENADORES EM 2007
Rede de Combustíveis e Hidrogênio Coordenador: Prof. Martin Schmal Suplente: Dr. Fábio Bellot Noronha	Rede de Combustíveis e Hidrogênio Coordenador: Prof. Martin Schmal Suplente: Dr. Fábio Bellot Noronha
Rede de Células a Combustível de Óxido Sólido (SOFC) Coordenador: José Octávio Armani Paschoal Suplente: Fábio Coral Fonseca	Rede de Células a Combustível de Óxido Sólido (SOFC) Coordenador: Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda Suplente: Dr. Gilmar Clemente Silva
Rede de Células a Combustível de Eletrólito Polimérico (PEMFC) Coordenador: Prof. Ernesto Rafael Gonzalez Suplente: Prof. Edson Antônio Ticianelli	Rede de Células a Combustível de Eletrólito Polimérico (PEMFC) Coordenador: Prof. Ernesto Rafael Gonzalez Suplente: Prof. Edson Antônio Ticianelli
	Rede de Sistemas, Integração e Uso Coordenador: a definir Suplente: a definir
	Rede de Utilização Coordenador: a definir Suplente: a definir

FONTE: MCT HIDROGÊNIO, 2007 (adaptado pela autora).

Quadro 3.2: Estrutura das Redes

Redes	Instituições envolvidas	Área de Interesse
PEM	IQ-USP/São Carlos, UFBA, UFMA, UFPA, UFAM, FFCRP-USP, Unesp-IQARA, Unesp-Bauru, IPEN, IPT, IQ-USP, IQ-UFRJ, IMA-UFRJ, CEPTEL-Eletróbrás, COPPE e UFRJ.	1 – Estabilidade e aumento de escala de MEAs visando à durabilidade a longo prazo, desenvolvimento de célula de 100W; 2- Catalisadores para reações de Redução de Oxigênio e Oxidação de combustíveis e Catalisadores tolerantes a CO; 3- Desenvolvimento de membranas alternativas ao Nafion para operar com Hidrogênio e Etanol; 4- Desenvolvimento de placas bipolares; 5- Modelamento, Aproveitamento do calor rejeitado, Armazenamento de energia.
ÓXIDO SÓLIDO	COPPE-UFRJ, UFBA, UFMA, UFRN, UFPI, UENF, UFSCar, UFMG, UNESP-Bauru, IPEN, UFSC, ETEJBMF-FAETEC.	1- Aplicações de Materiais Avançados na forma de Filmes em Células a Combustível de Óxido Sólido para operação em temperaturas intermediárias; 2- Componentes para a célula de Óxido Sólido: Manufatura e Avaliação de Desempenho de célula/pilha unitária; 3- Fabricação e testes de Células a Combustível de Óxido Sólido com deposição de camadas nanoestruturadas e escalagem de potência; 4- Desenvolvimento de laminados cerâmicos para Células a Combustível de Óxido Sólido.
HIDROGÊNIO	COPPE-UFRJ, UFBA, UNICAMP, UFSCar, UFF, INT, UFU, EQ/UFRJ, UEM, IPEN, IQ/USP, IQ/UFSC, UFRGS E UFES.	Desenvolvimento de forma integrada de tecnologias de produção de hidrogênio para célula a combustível a partir do gás natural, etanol, e outras fontes renováveis como a biomassa. 1- Fundamentos: produção do hidrogênio por eletrólise, biomassa, microorganismos e plasma; 2- Reforma de etanol; 3- Reforma de gás natural; 4- Engenharia de reatores; 5- Processos de purificação.
SISTEMAS, INTEGRAÇÃO E USO	Instituições: IPEN, UFSC, UFRN, UNESP, UNICAMP, CERTI, SENAI. Empresas: ELETROCELL, UNITECH, ESSS, WEG, CIANET, CEBRA	1- Definir e desenvolver protótipos comerciais; 2- Realizar a avaliação sistêmica dos protótipos; 3- Desenvolver a integração da produção, armazenamento e processamento de combustível associados aos protótipos; 4- Estimular a formação de recursos humanos na área de sistema de célula a combustível; 5- Difundir o conhecimento gerado pela rede de integração e sistemas; 6- Desenvolver os modelos de negócio para comercialização dos produtos; 7- Fortalecer as empresas brasileiras e estimular a criação de novas empresas atuantes no mercado de CaC.
UTILIZAÇÃO: APOIO À NORMALIZAÇÃO, NORMA DE SEGURANÇA	Instituições: ABNT, INT, INMETRO, CEPEI, UNICAMP/CENEH, UFPA. Empresas: PETROBRÁS/CENPES, LACTEC	1- Apoiar a constituição do Comitê Brasileiro de Tecnologias de Hidrogênio; 2- Apoiar à elaboração das Normas Brasileiras referentes ao hidrogênio e harmonizar com as normas internacionais (ISO e IEC); 3- Mapear o que está disponível em recursos humanos, em infraestrutura de serviços tecnológicos, em TIB e nas oportunidades para complementação e constituição de laboratórios de ensaio incluindo banco de testes para células a combustível; 4- Organizar três cursos sobre: “segurança do hidrogênio e identificação de perigos em sistemas de células a combustível”.

FONTE: Informações cedidas pelo MCT.

A formação das Redes deu-se por iniciativa do MCT, quando chamou dois de seus institutos, o IPEN e o INT, e juntos convidaram *experts* nas áreas de interesse para a coordenação das Redes brasileiras. Esses coordenadores foram nomeados por uma portaria ministerial³⁸ e tiveram como atribuição convidar outros pesquisadores com competência na área e assim constituírem as Redes. Primeiramente foram selecionados os especialistas para compor cada uma das redes, o que foi possível mediante a plataforma *Lattes*, garantindo o acesso ao currículo dos pesquisadores. Em seguida foram feitos os convites e os interessados passaram a fazer parte do projeto. O passo seguinte consistiu em uma série de reuniões, nas quais os pesquisadores expuseram as informações que consideraram prioridades a respeito das necessidades para que o país alcançasse o desenvolvimento esperado na área. Conseqüentemente, começaram a surgir projetos em conjunto para tentar resolver os gargalos de conhecimento.

Foi informado pelo representante do LACTEC que o primeiro projeto de apoio às redes foi o PEDCaC, coordenado pelo LACTEC, que repassou em torno de R\$2,3 milhões aos grupos das três Redes desde o início de 2005. Sobre os recursos para as Redes, a tabela 3.1 mostra a previsão inicial de aporte. No entanto, conforme informações cedidas pelo CENEH, os projetos das redes foram aprovados pela FINEP apenas em 19 de dezembro de 2006. Por conseguinte, foi somente em maio de 2007 que os recursos para as três primeiras redes foram liberados, ou seja, para as redes PEM, Óxido Sólido e Hidrogênio. As respectivas datas de liberação desses recursos constam na tabela 3.2. Para as demais redes, os recursos ainda não foram liberados. Para finalizar essa questão, aponta-se que o primeiro obstáculo para as redes foi organizar a alocação dos recursos, e o obstáculo atual é possibilitar que esses recursos cheguem até as redes.

Tabela 3.1: Redes, previsão para aporte de recursos

Rede	Previsão para Aporte de Recursos (milhões de reais)				
	Valor da ação	Valor 2005	Valor 2006	Valor 2007	Valor 2008
PEM	4,60	1,40	2,00	1,20	
ÓXIDO SÓLIDO	4,60	1,40	2,00	1,20	
HIDROGÊNIO	4,60	1,40	2,00	1,20	
SISTEMAS, INTEGRAÇÃO E USO	2,00		1,00		
UTILIZAÇÃO	1,20	0,60	0,60		

FONTE: Informações cedidas pelo MCT.

³⁸ Portaria MCT nº 430, de 27.08.2004

Ementa: Nomeação de membros da rede colaborativa de pesquisa do Programa Brasileiro de Sistemas Célula a Combustível – PROCaC.

Tabela 3.2: Redes, Recursos liberados

Redes	Valor da ação	Recursos Liberados em maio de 2007
PEM	R\$ 4.600.000,00	R\$4.600.000,00
ÓXIDO SÓLIDO	R\$ 4.600.000,00	R\$4.600.000,00
HIDROGÊNIO	R\$ 4.600.000,00	R\$4.599.991,12
SISTEMAS, INTEGRAÇÃO E USO	R\$ 2.000.000,00	
UTILIZAÇÃO	R\$ 1.200.000,00	

FONTE: Informações cedidas pelo CENEH.

Os entrevistados citaram que atualmente os recursos são provenientes dos fundos setoriais e também de parte do dinheiro de P&D oriundo do setor energético. Existem ainda outras fontes de financiamento de várias naturezas, como as FAPs, os projetos FINEP e as empresas que estão investindo na área. Apesar disso, o representante do CENEH informou que os recursos ainda são insuficientes, em função principalmente de o hidrogênio como vetor energético ainda não representar uma prioridade para a matriz nacional.³⁹ Os entrevistados comentaram que uma alternativa para o melhor direcionamento dos recursos seria o desenvolvimento de uma política de Estado que priorize os projetos para uma determinada tecnologia. Neste caso, a ANEEL poderia incentivar os projetos na área do hidrogênio e da célula a combustível. Enfatizaram também a importância do apoio governamental para tecnologias embrionárias, pois o interesse do governo pode contribuir para as trocas de conhecimento entre os pares da comunidade científica, a indústria e o governo e assim transportar a tecnologia da bancada para a escala pré-comercial.

Foi destacado nas entrevistas que um dos problemas observados nas Redes é a interação das universidades e centros de pesquisa com as empresas. Nesse aspecto, os pesquisadores têm muito receio de abordar a empresa antes de o projeto já estar bem adiantado, mas, ao mesmo tempo, é necessário que as idéias saiam dos laboratórios. Esse é um ponto fundamental, mas acreditam que não pode ser imposto, pois a formação de uma rede é um projeto delicado que depende de tempo e confiança. Ainda complementaram que as redes do hidrogênio estão sendo formadas nos mesmos moldes que as redes de biodiesel, a diferença é que o biodiesel possui uma tecnologia madura e o hidrogênio ainda é embrionário e não tem apelo comercial. Além disso, muitos pesquisadores não participam das Redes porque temem que seus projetos sejam copiados.

³⁹ Realidade que se manifesta principalmente no setor veicular, que tem no etanol um modelo para a substituição dos combustíveis fósseis. Por outro lado, é na geração estacionária de energia que o hidrogênio e a célula aparecem como potenciais soluções para os problemas de fornecimento, que ocorrem devido ao consumo crescente e a capacidade limitada da principal tecnologia adotada no país, as hidrelétricas.

O objetivo inicial para as Redes não foi gerar a tecnologia, mas sim estabelecer contato entre os grupos e promover a troca de informações. De acordo com os entrevistados, a operacionalização inicial das redes custou pouco para o governo, resumindo-se a alguns computadores e técnicos. O valor aportado para a ação foi de 1 milhão de reais, de modo que cada integrante da rede ganhou um computador e protocolos (secretos) de comunicação, conforme consta na tabela 3.3. Para o representante do CENEH o fundamental nesse processo é produzir coisas novas, sejam elas tecnologias ou informações.

Além do estabelecimento das cinco Redes citadas, o MCT, por meio de ações do PROCAC/PROH2, também aportou recursos para a operacionalização de outros temas relevantes para a efetivação das ações voltadas à Economia do Hidrogênio no Brasil. Esses temas estão relacionados na tabela 3.3 e abrangem, além dos recursos para a formação das Redes, a formação de mestres e doutores, a capacitação laboratorial, e o desenvolvimento de um reformador para o etanol.

Tabela 3.3: Aporte de recursos para outros temas relevantes

AÇÃO	Recursos Aportados (milhões de reais)					Área de interesse
	Valor da ação	Valor 2004	Valor 2005	Valor 2006	Valor 2007	
Formação de mestres e doutores	2,00	2,00				Apoio fundamental para a formação de cerca de 39 mestres e 15 doutores envolvendo 30 grupos de pesquisa em 14 universidades.
Capacitação laboratorial	2,50	2,50				Apoio e capacitação de laboratórios envolvendo cerca de 34 laboratórios de 20 universidades e centros de pesquisa.
Formação das redes	1,00		0,50	0,50		Apoio à formação de redes de pesquisa nas áreas temáticas previstas no programa, em reuniões de coordenação e de trabalho, workshops, seminários, visitas técnicas e participações em eventos científicos. Criação do Portal do Programa.
Reformador do etanol	5,70	1,00	2,00	2,00	0,70	Projeto cooperativo entre INT, IPEN, CEPEL e COPPE para a construção de um sistema de 5kW baseado em célula a combustível alimentado por hidrogênio obtido por meio da reforma de etanol, com todos os componentes críticos e engenharia desenvolvidos com tecnologia nacional.

FONTE: Informações cedidas pelo MCT.

Como aspecto positivo em relação à criação das Redes os entrevistados ressaltaram a importância para as instituições de pesquisa e as poucas empresas no Brasil que estão envolvidas

com o tema, pois, pela primeira vez, puderam conduzir os esforços do governo de acordo com as áreas de interesse para pesquisa e assim articular o provimento de recursos. No entanto, a realidade tem sido mais difícil do que a expectativa inicial, principalmente no que tange às dificuldades em obter consenso sobre as prioridades e a distribuição de recursos para o desenvolvimento de uma política para a Economia do Hidrogênio.

3.4 Perspectivas para a Economia do Hidrogênio no Brasil

Além das informações a respeito dos documentos e ações formais para a Economia do Hidrogênio no Brasil, nas entrevistas realizadas durante a pesquisa que sustenta esta Tese procurou-se identificar o que a Economia do Hidrogênio atualmente representa para o país, ou seja, descobrir se as instituições nacionais estão se preparando para uma possível mudança de grandes proporções no setor energético e quais as motivações para que essas mudanças aconteçam.

De acordo com o entrevistado do CENEH, o termo “Economia do Hidrogênio” é norte-americano e tem como proposta transformar o carvão em hidrogênio; o termo é antigo e pode ser encontrado em publicações desde a década de 1970. Além disso, o entrevistado acrescentou que na Economia do Hidrogênio poderá ocorrer a integração de várias atividades econômicas, mas *cada país usará o termo de acordo com seus interesses*. Assim, concluiu que para o Brasil o hidrogênio é verde porque está associado às fontes renováveis. Portanto, a Economia do Hidrogênio terá configurações diferentes de acordo com as fontes empregadas para a produção do hidrogênio.

Conforme os entrevistados, no Brasil a Economia do Hidrogênio poderá ter a seguinte configuração: em uma ponta estarão as empresas de energia (combustíveis ou eletricidade), usando o hidrogênio como uma estratégia para atender ao seu consumidor; e na outra ponta estarão as empresas, fabricando e vendendo sistemas que precisem do hidrogênio, as células a combustível, os reformadores, os eletrolisadores, entre outros. A esse respeito as publicações internacionais destacam que existe um considerável *gap* entre o desenvolvimento do hidrogênio e das células a combustível no mundo e que as pesquisas em torno das células estariam em um estágio muito mais avançado que as pesquisas com o hidrogênio. Essa realidade se repete no Brasil, onde a maior parte dos entrevistados considerou que a produção do hidrogênio está

atrasada em relação às células a combustível. Foi observado que as células são pesquisadas no país há 30 anos, mesmo assim esse não é um indicador de que as soluções tecnológicas estejam próximas.

Apesar do atraso tecnológico citado, há de se considerar que o Brasil já produz o hidrogênio em larga escala. Conforme os entrevistados, a Petrobrás produz 500 toneladas de hidrogênio por dia para consumo próprio⁴⁰; isso significa que o país tem competência para produzir o hidrogênio, mas este ainda é inadequado para uso na célula a combustível de membrana polimérica, embora possa ser usado sem restrições na célula de óxido sólido.

Dentre as experiências realizadas com as células, há três empresas que se destacam no país: ELETROCELL, UNITECH e NOVOCELL. Essas empresas já possuem alguns produtos disponíveis. Segundo os entrevistados do LACTEC, essas empresas são *“pequenas, de alto conteúdo tecnológico, alta competência, mas não têm mercado. Vão fabricar e vender para quem?”*. Sendo assim, a ausência de demanda também caracteriza o estágio embrionário de desenvolvimento tecnológico do hidrogênio e das células a combustível.

Acrescenta-se que, além dos problemas relativos ao suprimento energético, os impactos ambientais e a necessidade de descarbonização são elementos que favorecem a transição de regime energético. Nesse sentido, a opinião dos entrevistados vai ao encontro da literatura internacional quando aponta que o argumento principal para a utilização do hidrogênio e da célula a combustível deixa de ser a exaustão dos combustíveis fósseis e passa a ser a questão ambiental.

Considerando as possibilidades para o hidrogênio e para as células a combustível no Brasil, esta seção visa responder às questões colocadas no início do capítulo, o que ocorre mediante a consolidação das informações obtidas durante as entrevistas com os coordenadores do Roteiro a respeito da construção da Economia do Hidrogênio. Dessa forma, a primeira questão coloca em foco as possibilidades de rupturas tecnológicas que poderão acompanhar a Economia do Hidrogênio, isto é, discute-se se a inserção das tecnologias relacionadas ao hidrogênio e à célula a combustível representará uma ruptura por si só, bem como quais os impactos decorrentes do uso dessas tecnologias podem caracterizar uma ruptura tecnológica. Para responder à segunda questão foram levantados os obstáculos e as oportunidades para a Economia do Hidrogênio.

⁴⁰ O hidrogênio é produzido pela Petrobrás mediante o uso de métodos convencionais como a reforma a vapor do gás natural. A White Martins e outras empresas da área de gás também produzem e engarrafam o hidrogênio no Brasil.

Dentre os obstáculos, destacam-se as dificuldades para o hidrogênio alcançar o nível de desenvolvimento tecnológico já conquistado pela célula; a definição de padrões, normas e regulação para o setor; a busca de maior interação entre as universidades e empresas, e a formação de recursos humanos. As oportunidades estão em torno do etanol como fonte para o hidrogênio, da ampla utilização de fontes renováveis já alcançada pelo país, e do hidrogênio e da célula a combustível como possibilidades para reduzir as emissões. A terceira questão trata das possibilidades de infra-estrutura para a geração do hidrogênio no Brasil, centralizada ou distribuída. Nessa mesma questão são abordados os dois tipos de células a combustível mais pesquisados no país e que inclusive formam Redes de pesquisa, ou seja, as células PEMFC e as SOFC. Por fim, a quarta questão explora datas para que a produção do hidrogênio e o uso da célula a combustível se tornem realidade no Brasil.

3.4.1 Como a Economia do Hidrogênio poderá representar uma ruptura no regime energético brasileiro

A respeito da possibilidade de ruptura tecnológica para a instalação de um novo regime energético no Brasil, os entrevistados comentaram que o governo brasileiro pretende se inserir na Economia do Hidrogênio, mas isso deverá ocorrer respeitando as características locais da matriz energética, isto é, a matriz brasileira continuará sendo diversificada, destacando-se o fato de ser composta por 45% de fontes renováveis. Assim, sob o ponto de vista da matriz energética, as mudanças tendem a ser de baixo impacto e por isso os entrevistados questionaram o tratamento da Economia do Hidrogênio como um novo regime energético, argumentando que o Brasil tem muita água, hidrelétricas, biomassa e etanol e que por isso não precisa do hidrogênio. Por outro lado, há concordância quanto ao tratamento do hidrogênio como um vetor energético originado de uma diversidade de fontes renováveis. Apesar disso tudo, houve consenso entre os entrevistados quanto à evolução histórica do sistema energético caracterizada pela sucessiva inserção de novas fontes de energia, tais como a lenha, o carvão, o petróleo e o gás natural.

Em concordância com a literatura, os entrevistados brasileiros destacaram as hidrelétricas como um aspecto importante para o país. Entenderam que o Brasil não deve trocar a hidroeletricidade por alternativas que possam causar mais danos ambientais. No entanto, relacionaram alguns problemas, como a escassez de chuvas em alguns períodos e excessos em outros, além da variação da demanda. Dessa forma, uma possibilidade seria armazenar a energia

excedente, produzida nos períodos chuvosos, isto é, o excedente pode ser transformado em hidrogênio por meio da eletrólise da água. No entanto, foi complementado que armazenar a energia excedente das hidrelétricas pode ser mais caro que a construção e manutenção de uma barragem, com a vantagem, porém, de não causar os impactos ambientais gerados pelas hidrelétricas sobre o entorno. O entrevistado do LACTEC informou que o hidrogênio é uma alternativa para armazenar a energia nas pequenas centrais hidrelétricas a fio d'água. Assim, alguns entrevistados observaram que se essas possibilidades se efetivarem poderão ser tratadas como rupturas em relação ao regime energético atual.

Em uma perspectiva otimista para o hidrogênio como vetor energético, os entrevistados indicaram que poderão ocorrer mudanças no estilo de vida dos brasileiros. Uma das possibilidades seria que no futuro as células a combustível estivessem disponíveis para as comunidades isoladas, visto que o atual fornecimento de eletricidade para essas comunidades é feito por motores e geradores a diesel, que inicialmente foram desenvolvidos para os veículos. Esse mesmo processo ocorreu na adaptação das tecnologias das turbinas de aviação para as turbinas na geração de energia elétrica. De igual forma, nas células a combustível as aplicações veiculares podem inspirar outras possibilidades. No aspecto citado, conclui-se que uma tecnologia é desenvolvida para um determinado setor e depois, com o avanço tecnológico, se expande para novas possibilidades de uso.

Os entrevistados argumentaram que uma ruptura poderá acontecer nos grandes centros urbanos, por meio da introdução de ônibus e caminhões com células a combustível, uma substituição que poderá ajudar a resolver grande parte dos problemas de poluição. É possível ainda que haja ruptura no mercado de automóveis, considerando-se que no setor automotivo as células a combustível já são mais eficientes que os motores de combustão, no entanto a produção do hidrogênio ainda é pouco eficiente. Logo, se essa eficiência do hidrogênio for alcançada, o Brasil estará mais próximo de um novo regime energético, pois resultará em grandes mudanças na geração e distribuição de energia. Mesmo assim, foi acrescentado que ainda existem muitos problemas tecnológicos para serem resolvidos e talvez nunca ocorra uma ruptura de fato.

Os entrevistados descreveram que a infra-estrutura de manutenção poderá ser um *breakthrough*, uma mudança de tecnologia, representada pela saída dos sistemas térmicos e entrada nos sistemas elétricos no setor de transportes. Os entrevistados ressaltaram que a ruptura

poderá ocorrer em diferentes graus e a Economia do Hidrogênio poderá levar a uma sociedade mais limpa, mais baseada na energia elétrica e com menos impactos ambientais.

Tendo como fundamento os parágrafos anteriores é possível destacar que para o Brasil a Economia do Hidrogênio é vista como uma oportunidade para armazenagem energética das fontes renováveis e redução das emissões, o que poderá ocorrer com a energia excedente produzida pelas hidrelétricas. Ao lado dessas rupturas, tem-se o fornecimento de energia para as comunidades isoladas; as células a combustível e o hidrogênio usados no transporte coletivo e de cargas; e, no setor automotivo, *breakthroughs* na infra-estrutura de manutenção. Entretanto, essas possibilidades somente serão confirmadas como rupturas tecnológicas após a disseminação de seu uso no futuro.

3.4.2 Os obstáculos e as oportunidades para a Economia do Hidrogênio no Brasil

A ausência de demanda para as tecnologias do hidrogênio e da célula a combustível compõe o primeiro obstáculo apontado pelos entrevistados. Nesse contexto pode acontecer de as instituições de pesquisa e as universidades chegarem a um reator de alta eficiência, mas com o risco de tornar-se um projeto de demonstração por prazo indeterminado devido à ausência de demanda. Logo, sem demanda não há empresas que se disponham a fabricar a tecnologia ou a transformar a tecnologia em produto. Esse dilema foi enfatizado na seguinte frase dos entrevistados do LACTEC: *“O Brasil não sabe o que é inovação, o conceito de invenção o país conhece, mas ainda não aprendeu a transformar a invenção em produto”*, ou seja, faz-se necessário disponibilizar a tecnologia para o mercado e aos poucos criar a demanda. Sobre essa dificuldade em transportar os projetos brasileiros da escala da bancada para a escala pré-comercial, acrescenta-se outra afirmação também do LACTEC: *“Muitas vezes acontece de um pesquisador desenvolver um projeto que funciona lindamente na bancada, tem um valor imenso para gerar um conjunto de teses e de papers, mas que não avança para a escala pré-comercial”*. O motivo para essa dificuldade de entrada das novas tecnologias no mercado está justamente na resistência da indústria em fabricar produtos para os quais a demanda é inexistente, ou seja, o risco decorrente da tentativa de criar demanda seria muito grande.

Ainda a respeito da necessidade de aproximar os pesquisadores brasileiros do mercado, os entrevistados referiram-se à desvinculação do desenvolvimento acadêmico e científico daquele da

indústria, e do desenvolvimento comercial. Um problema que aparece em todos os setores cujas tecnologias são embrionárias. Conseqüentemente, o que ocorre são interesses díspares entre os setores acadêmico e empresarial, que transitam entre a viabilidade financeira, a aplicabilidade imediata e a capacidade de invenção.

O segundo obstáculo apontado pelos entrevistados reporta-se à escassez de recursos, situação que tem por característica o fato de as pesquisas no Brasil sofrerem com a descontinuidade temporária dos recursos. Sobre isso os entrevistados do LACTEC explicaram: *“Se o recurso é para a célula a combustível, o pesquisador se adapta e pesquisa célula a combustível. Se for um recurso para cerâmica, ele vai pesquisar cerâmica para a célula de óxido sólido”*. Outros entrevistados complementaram que parece não existir um equilíbrio entre o tempo e os recursos investidos em pesquisas com o hidrogênio e com as células, mas, apesar desse aparente desequilíbrio, o representante do MCT afirmou que para o governo não existe prioridade, ou seja, é dada a mesma importância para os projetos de pesquisa que estudam o hidrogênio ou as células a combustível. Já no MME esclareceram que os interesses individuais dos pesquisadores são respeitados, mas os recursos do governo são escassos e é necessário optar por algumas direções para investimento.

Cita-se como terceiro obstáculo o atraso no desenvolvimento brasileiro, tanto para o hidrogênio quanto para a célula a combustível. Nesse aspecto os entrevistados explicaram que algumas vezes o desenvolvimento nacional parece estar muito atrasado em comparação com outros países. Outrossim, ressaltaram que a continuidade e o incremento das pesquisas na área são caminhos para que o Brasil consiga entrar para a Economia do Hidrogênio, pois parece muito arriscado que o país dependa somente das importações. Sobre essa ênfase nas pesquisas, um dos entrevistados foi mais otimista e afirmou que o Brasil possui competência científica, bem como pesquisadores competentes e preparados, e por esses motivos ainda poderá contribuir com algum desenvolvimento tecnológico para a área de hidrogênio.

Aponta-se como quarto obstáculo a necessidade de criar uma política industrial antes que seja criada uma nova indústria. Essa situação foi abordada pelos entrevistados quando observaram que chegar a uma política para o hidrogênio e para a célula é um dos maiores obstáculos, assim como foi difícil chegar a uma política para o biodiesel. A importância da criação de uma política foi ressaltada mediante explicação sobre o papel do governo no desenvolvimento de novas tecnologias. Por conseguinte, foi explicado que quando o governo

decide o que um país vai desenvolver, o processo é facilitado, então o governo subsidia, disponibiliza infra-estrutura e oferece suporte. O papel do governo nesse processo é, por meio da política, sinalizar as áreas de interesse estratégico para o país e incentivar as pesquisas mediante a alocação de recursos.

Complementando a ausência de política, a opinião do entrevistado do MCT é que ainda não existe nem mesmo uma política de renováveis. A visão do Ministério é que o Brasil deveria trabalhar não numa política de hidrogênio, mas numa política de energia. A política é uma missão do MME, mas o MCT participa das discussões sobre o tema, tanto é assim que sugeriu que inicialmente poderia haver pelo menos a institucionalização da Economia do Hidrogênio como um interesse comum entre os dois ministérios.

Quanto ao desenvolvimento da política nacional, os entrevistados esclareceram que cada vez que a IPHE⁴¹ promove reuniões com o Comitê de Implementação ou com o Comitê Diretor, o MME é incentivado a se posicionar sobre o estabelecimento de um marco regulatório. Foi sob essa influência internacional que a comunidade científica elaborou o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, considerado pela maioria dos entrevistados como o principal avanço brasileiro para a construção de uma política para o hidrogênio e para a célula a combustível. O entrevistado do MME disse que a intenção deste Ministério é que o país tenha uma Política Nacional para o Desenvolvimento da Economia do Hidrogênio e que essa política seja materializada no lançamento de um programa, que seria o Programa Nacional de Produção e Uso do Hidrogênio.

Para alguns dos entrevistados, a inexistência de uma política, bem como normas e padrões oficiais para a Economia do Hidrogênio no Brasil, não impede o progresso científico e tecnológico. Afirmaram que uma determinada área de pesquisa não depende necessariamente de o governo estar, simultaneamente, criando decretos e fazendo política; há diversos projetos de pesquisa em andamento no país, e esses estudos acontecem sem que a normalização esteja estabelecida, independente também de uma política pré-documentada.

A ausência de recursos humanos qualificados é tratada como o quinto obstáculo. Uma das justificativas é que no Brasil o número de institutos de pesquisa, universidades e empresas interessados no hidrogênio e nas células ainda é reduzido e está submetido aos direcionamentos e incentivos governamentais. Conforme mencionado pelos entrevistados, a capacitação de pessoas

⁴¹ A IPHE tem servido como instrumento impulsionador da política nacional inspirando as ações do MME.

ocorre dentro dos projetos aprovados para pesquisa na forma de bolsas, normalmente nos projetos FINEP ou CNPq. O programa de hidrogênio foi feito de forma diferente porque o CNPq não tinha recursos para esse tema. Logo, o recurso foi solicitado aos fundos setoriais e foi obtido um valor para formar mestres e doutores. Atualmente as bolsas disponíveis são para 39 mestres e 15 doutores, envolvendo 30 grupos de pesquisa, em 14 universidades. No período da entrevista, foi observado que os projetos de mestrado estavam em vias de conclusão, pois haviam começado há dois anos. Os de doutorado estavam em andamento. Para o representante do MCT, essas bolsas possibilitam que seja formada uma massa crítica no assunto, pois há necessidade de desenvolvimento e são poucos os pesquisadores na área.

Como parte do processo de formação de recursos humanos também foram citados os projetos de demonstração. Mas o entrevistado do MCT relatou que o Brasil não está investindo o suficiente neste modelo porque atualmente estes projetos teriam que acontecer com material importado, e o objetivo é que o Brasil comece a desenvolver suas próprias patentes; por isso o governo brasileiro está investindo em pesquisa básica.

A infra-estrutura aparece como o sexto obstáculo identificado na pesquisa e foi caracterizado pelo entrevistado do CENEH mediante a seguinte afirmação: *“Há dificuldades no suprimento do hidrogênio, no preço dessa tecnologia e dificuldades de infra-estrutura. A questão científica e tecnológica já não é a única questão que impede essa tecnologia de se disseminar no mercado”*. Foram observadas duas situações a serem solucionadas. Uma delas é a infra-estrutura para a produção, armazenagem e distribuição do hidrogênio, para que então esse vetor energético esteja disponível para o uso na célula a combustível. A segunda situação diz respeito à infra-estrutura para a manutenção de um novo regime, tal como oficinas capacitadas para realizarem a manutenção nos veículos e também nas células estacionárias.

Em que pese todos os obstáculos apontados, também se colocam oportunidades para que a Economia do Hidrogênio se instale no Brasil. Destaca-se, primeiramente, a possibilidade de uso das fontes renováveis para a produção do hidrogênio, visto que estas fontes já compõem 45% da matriz energética brasileira. Mais especificamente, os entrevistados apontaram que uma oportunidade para o Brasil está nos biocombustíveis, mas para essa alternativa seria necessário desenvolver os reformadores para fazer a conversão para o hidrogênio. Consequentemente, mesmo sendo tratada como uma oportunidade, ainda não há no país indústrias interessadas em

produzir os reformadores, bem como os preços ainda são muito elevados, o que remete à inexistência de demanda.

Dentre os biocombustíveis, o etanol é considerado a oportunidade na qual o Brasil poderá apresentar maiores vantagens competitivas se souber aproveitar o aprendizado e a experiência. Segundo os entrevistados, uma alternativa para o futuro pode ser a conversão do etanol em eletricidade por meio de um gerador de etanol, tecnologia ainda inexistente. Dentro dessa possibilidade, afirmaram que pode ser empregado um reformador de etanol acoplado a uma célula a combustível, e assim com um litro de etanol gerar mais eletricidade do que em um gerador elétrico a etanol. Complementaram que os parâmetros técnicos para o reator de reforma já existem e por isso essa possibilidade é considerada, mas somente será concretizada se o reator tiver uma eficiência energética em torno de 60%, uma eficiência considerada alta.

Os entrevistados informaram que na conversão do etanol em hidrogênio é queimada uma pequena parte do etanol para produzir a reforma, condições que ainda estão sendo testadas, de modo que os efeitos são desconhecidos. Os entrevistados concluíram que a tecnologia para a conversão do etanol ainda é embrionária e que o país não possui um reator que converta o etanol em hidrogênio de uma maneira constante. Nesse quadro, os entrevistados do LACTEC informaram que provavelmente os EUA conseguirão desenvolver antes do que o Brasil a tecnologia para a conversão do etanol em hidrogênio. Conseqüentemente, para o país as oportunidades estarão relacionadas aos potenciais nichos de mercado para a produção de equipamentos e serviços. Foi sugerido que a instalação das empresas estrangeiras pode ser uma alternativa desde que sejam fechadas parcerias com as empresas brasileiras. Outro ponto é que essas empresas estrangeiras⁴² desenvolvam equipamentos que sejam adequados para o mercado local, e que não tenham capital 100% estrangeiro. O representante do MCT reforçou que essa questão é estratégica para o país; sendo assim, mesmo que o Brasil não seja o primeiro a lançar o reformador no mercado, é importante que a tecnologia nacional acompanhe essa evolução.

⁴² Foi citado pelo representante do MCT que houve no Brasil uma primeira tentativa de trabalhar com a Alemanha através de um convênio para montar um reformador de etanol para a produção do hidrogênio. O reformador viria para o Brasil, seria operado com etanol, mas os brasileiros não poderiam abrir o equipamento, nem fazer a manutenção, atividades realizadas exclusivamente pelos alemães. Esse projeto foi rejeitado. No final de 2004 o projeto foi reformatado e envolveu o IPEN, o INT, o LABH2/COPPE e o CEPEL. O Objetivo é fabricar um reformador de etanol nacional, com catalisador nacional, com uma célula a combustível fabricada no Brasil e se possível com MEA já nacional. No final, estes componentes tecnológicos serão patenteados no Brasil. Foi informado que esse projeto está em andamento há dois anos e estão começando a montar o reformador.

De acordo com os entrevistados, fica difícil imaginar que todos os recursos que estão sendo investidos no país e o empenho das instituições que se dedicam às tecnologias relacionadas ao hidrogênio e à célula a combustível não resultem em mudanças no regime energético nacional, mesmo que essas não constituam rupturas no regime.

3.4.3 Tipos de infra-estrutura e de células a combustível mais adequados para o país

As tendências nacionais em relação à infra-estrutura para a geração do hidrogênio seguem as perspectivas internacionais, que apontam duas possibilidades de infra-estrutura para dar suporte à Economia do Hidrogênio: a centralizada e a distribuída (ou descentralizada). Os entrevistados concordaram que no Brasil inicialmente prevalecerá a infra-estrutura distribuída, fundamentada essencialmente na eletrólise da água, na reforma do gás natural e no etanol. Nesse caso o etanol líquido pode ser transportado e a conversão para o hidrogênio acontecer de forma distribuída, ou seja, no ponto de consumo.

Vale notar que no futuro a infra-estrutura distribuída do etanol poderia ser estendida para o metanol. Nessa perspectiva, o representante do LACTEC entende que o metanol produzido a partir da biomassa poderá fazer parte da gama de combustíveis convertíveis para o hidrogênio.

Para o fornecimento de energia estacionária, os entrevistados afirmaram que a geração distribuída é a melhor opção, principalmente porque a produção do hidrogênio no local de consumo facilitaria o atendimento às comunidades isoladas. Sobre esse aspecto, foi enfatizado pelo representante do MCT que a produção distribuída do hidrogênio poderá ocorrer primeiramente nos locais que não têm acesso à energia elétrica, porém ele considera que essa é uma possibilidade remota porque ainda não existe um programa para isso. Além disso, o governo busca uma tecnologia mais simples para essas regiões, que atenda ao conceito de tecnologias apropriadas.

A geração distribuída também poderá estar presente no transporte coletivo, alternativa que poderá avançar mediante os atuais projetos de demonstração no Brasil. Nestes projetos o hidrogênio poderá ser produzido nas garagens das empresas de ônibus. Logo, a inovação brasileira provavelmente estará nos veículos pesados para o transporte coletivo, o que poderá ocorrer devido à habilidade e experiência brasileira na fabricação de ônibus e a possibilidade de substituição do diesel pelo hidrogênio, conforme projeto para a frota da EMTU em São Paulo.

Em se tratando das possibilidades para a infra-estrutura centralizada, levantou-se, mediante as entrevistas, que para o Brasil essa alternativa somente seria viável em uma perspectiva de longo prazo. Assim, a fase de introdução do hidrogênio e da célula a combustível no mercado provavelmente ocorrerá de forma distribuída.

Quanto aos tipos de células a combustível que poderão ser predominantemente utilizadas no país, o entrevistado do MCT relatou duas possibilidades: baixa temperatura e alta temperatura. A célula de baixa temperatura é a de membrana polimérica, PEM, que está sendo desenvolvida no mundo todo e já possui vários protótipos, principalmente em automóveis. O segundo tipo de célula que poderá ser adotado pelo Brasil é a de alta temperatura, a exemplo da célula de óxido sólido (SOFC). Segundo informações obtidas junto ao CENEH e ao LABH2/COPPE, a célula de óxido sólido é uma oportunidade para o desenvolvimento nacional, pois a célula PEMFC já representa uma tecnologia estabelecida no exterior. De acordo com os entrevistados, a célula de óxido sólido poderá favorecer o país a alcançar vantagens competitivas em relação às tecnologias para geração estacionária, e com isso as instituições brasileiras poderão ocupar um espaço importante nesse mercado. Os entrevistados concluíram que, em longo prazo, o ambiente será mais favorável para a célula de óxido sólido e esta poderá ser produzida integralmente no Brasil.

Com base nas informações levantadas tem-se que as células PEMFC e as células SOFC foram escolhidas como alternativas para o Brasil. Por esse motivo, mesmo que outros países estejam muito mais avançados nessas tecnologias, o representante do MCT acredita ser necessário para o Brasil conhecê-las e desenvolver componentes para os dois tipos de células, atividades que podem ser realizadas pelas Redes PEMFC e PACOs.

Também se cogitou nas entrevistas o uso da célula a combustível para aplicações nas quais a eletricidade não pode ser suspensa, como sistemas de reserva de energia, baterias, substituição de baterias em plataformas, entre outros. A vantagem da célula nessas aplicações estaria na sua vida útil maior e na redução das emissões de poluentes em relação às baterias convencionais. Nesses casos os entrevistados admitiram que o Brasil provavelmente importará a tecnologia, assim como para os veículos leves, portanto precisará desenvolver a infra-estrutura para o suprimento do hidrogênio e a manutenção dos equipamentos. Assim, conclui-se, a partir de informações cedidas pelos entrevistados, que a oportunidade tecnológica do país para as células a combustível está nos sistemas estacionários, possibilidade que foi privilegiada no

Roteiro. Para os demais tipos de células, o país poderá destacar-se desenvolvendo a infraestrutura necessária para a manutenção das células e para o suprimento do hidrogênio.

3.4.4 Período em que o Brasil poderá adotar o hidrogênio e a célula a combustível como um regime energético

Quanto a um período para que o hidrogênio e a célula a combustível comecem a ser empregados no setor energético brasileiro, foi observado que a inserção será gradual. Os especialistas concordaram que a Economia do Hidrogênio no país será caracterizada por um grupo de fontes renováveis concorrentes para a produção do hidrogênio, mas na matriz energética o hidrogênio será tratado com um vetor energético e não como uma fonte de energia. Ademais, o hidrogênio poderá ser utilizado em muitas aplicações sem que o consumidor saiba, situação que foi considerada pelos entrevistados do LACTEC nos seguintes termos: *“O que o consumidor precisa? Precisa de uma matriz diversa, de várias fontes e de energia sempre disponível e barata”*. Segundo os representantes do LACTEC, o problema atual é de fornecimento de energia, combustível e eletricidade, mas *“nenhum governo planeja fornecer hidrogênio, esse é um sonho dos pesquisadores, mas não é isso que a sociedade demanda”*. As necessidades da sociedade estão limitadas ao uso energético, sendo esta uma posição muito distante dos cientistas que idealizam um futuro no qual o hidrogênio e as células a combustível terão substituído plenamente o atual regime energético.

Dando continuidade às informações obtidas junto aos entrevistados, estes observaram que as empresas brasileiras fabricantes de células, reformadores e eletrolisadores serão importantes para a Economia do Hidrogênio, mas para que o país consiga ter essas empresas fora das incubadoras, produzindo e vendendo essas tecnologias, levará cerca de 10 a 15 anos. No entanto, de maneira geral os entrevistados acharam difícil estabelecer uma data para que o hidrogênio e a célula a combustível cheguem ao mercado consumidor, tanto no país como no exterior.

Na indústria automobilística os entrevistados acreditam que essas tecnologias só serão comercializadas quando forem competitiva em termos de custos. O entrevistado do MME apontou que dentro de cinco a dez anos o carro a hidrogênio estará disponível para a comercialização. Quanto aos projetos de demonstração, esses provavelmente começarão a aparecer no mercado brasileiro dentro de um a dois anos. Segundo o entrevistado do MCT, hoje já é possível comprar uma célula montada no Brasil, mas a membrana MEA é importada, bem

como outros componentes. Sugeriu que em dois anos, aproximadamente, haverá alternativas melhores, com alguns componentes nacionalizados, e então o próximo passo será baixar os custos para tornar a tecnologia competitiva.

Com pensamento similar, o entrevistado do LABH2/COPPE apontou que em 2008 o país já terá células de membrana polimérica de baixa potência, com possibilidade de agrupamentos para resultar em potências maiores. Nas aplicações para geração distribuída de energia elétrica, o *nobreak* e outros dispositivos já estarão disponíveis comercialmente. Observou que a introdução das células de óxido sólido provavelmente demorará um pouco mais para se instalar na estrutura industrial e ainda que, dependendo da forma como evoluir o protótipo do ônibus a hidrogênio, a atividade comercial poderá ser antecipada. No entanto, apesar dessas possibilidades, mencionou ainda que o hidrogênio e a célula a combustível não representam uma prioridade para o país nem do ponto de vista energético e nem ambiental. E isso ocorre devido ao amplo uso das fontes renováveis aliada à disponibilidade das fontes fósseis, situação que poderá atrasar a entrada do Brasil neste mercado.

No MME, com a elaboração dos Projetos Estruturantes, aconteceu a primeira tentativa oficial para o estabelecimento de prazos para que as tecnologias do hidrogênio e das células a combustível se tornem prontamente disponíveis no Brasil. Assim, a previsão é que até 2010-2015 o país tenha desenvolvido o hidrogênio a partir do gás natural. Nesse aspecto, mesmo que a prioridade para o Brasil seja a produção do hidrogênio a partir de fontes renováveis, isso não ocorrerá antes de 2015-2020, quando o hidrogênio produzido da eletrólise da água estará disponível. Finalmente, a tecnologia para a produção do hidrogênio a partir do etanol somente estará pronta para o mercado a partir de 2020-2025. Entretanto, os prazos citados nos projetos estruturantes não são compartilhados pela comunidade científica, pois esta alega que não participou do estabelecimento desses prazos.

Ressalta-se que o uso industrial do hidrogênio já é amplo, e a produção do hidrogênio a partir do gás natural é hoje o grande insumo que abastece o mercado químico do hidrogênio no Brasil, mas a proposta do Roteiro é o hidrogênio para o uso energético.

A respeito do desenvolvimento do mercado para as células a combustível, sabe-se que a tecnologia está sendo desenvolvida e que já existem alguns modelos sendo comercializados, como as células PEMFC produzidas pela Ballard e adquiridas por laboratórios de pesquisa, e as células PAFC da UTC (*United Technologies Corporation*), que estão sendo testadas em vários

lugares do mundo, inclusive no Brasil. No entanto, apesar das expectativas da comunidade científica, a demanda comercial para essas tecnologias ainda é insipiente, conforme mencionado nos obstáculos para a Economia do Hidrogênio. Por conseguinte, os entrevistados não conseguiram estabelecer um prazo para a entrada do hidrogênio e da célula a combustível no mercado consumidor. Nesse contexto, não há como estabelecer datas, mas, tendo em vista os estudos prospectivos para o setor, bem como as publicações que tratam da maturidade tecnológica dos países desenvolvidos tanto para o hidrogênio quanto para as células, observa-se que antes da metade do século XXI será muito improvável ter essas tecnologias disseminadas e disponíveis para aplicações energéticas veiculares e estacionárias. Conclui-se que a realidade está muito mais próxima de uma longa fase de introdução no mercado até que essas tecnologias possam vir a concorrer com o regime dominante, não apenas em relação às suas vantagens para a descarbonização, mas principalmente em relação a custos, condição que, se satisfeita, poderá acelerar a entrada no mercado.

3.5 Considerações sobre o capítulo

Este capítulo procurou descrever em que condições o atual regime energético brasileiro, para o fornecimento de energia estacionária e veicular, poderá incorporar as tecnologias do hidrogênio, produzido a partir de fontes renováveis, e das células a combustível. Fundamentou-se na análise de dados primários e secundários. Os dados primários foram obtidos em entrevistas realizadas com coordenadores de grupo de trabalho do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil. Os dados secundários foram organizados mediante a análise dos documentos nacionais para a Economia do Hidrogênio.

O primeiro passo para a Economia do Hidrogênio no Brasil foi a elaboração do PROCAC/PROH2, documento que organizou os objetivos e as necessidades iniciais para a entrada do Brasil nesse mercado. O PROCAC/PROH2 deu origem ao Roteiro e às Redes de Pesquisa. Na sequência do Roteiro, e como parte dele, foram elaborados os Projetos Estruturantes.

Posteriormente à elaboração do Roteiro, as atividades de P&D continuaram sendo desenvolvidas pelas instituições co-autoras do documento, o que vem ocorrendo independentemente de orientações de políticas públicas. Dentre as ações em desenvolvimento, o LACTEC mantém parcerias em pesquisas com o etanol para a produção do hidrogênio com a UEM e com a UNICAMP, e ainda estuda o metanol verde, proveniente da biomassa, como fonte para o hidrogênio. O LBH2/COPPE coordena a Rede PACOs e realiza pesquisas nas áreas de eletroquímica e de materiais (produção, armazenagem e uso energético do hidrogênio). O LH2/UNICAMP estuda os principais estágios do ciclo de vida do hidrogênio (geração, purificação, armazenamento e utilização). O INMETRO participa de um projeto em conjunto com a União Européia para elaborar um glossário de terminologia que contenha os termos mínimos necessário para a área de RCS (*regulation, codes, standarts*). O MME foi o responsável pela coordenação do Roteiro e atualmente é o representante legal para os assuntos relativos à política do hidrogênio no Brasil e no exterior. O PROCAC/PROH2 foi coordenado pelo MCT e atualmente desenvolve as pesquisas e tecnologias necessárias que foram delineadas pelo MME.

No âmbito internacional, tanto o hidrogênio quanto a célula a combustível podem representar uma mudança no regime energético, mudança esta que está sendo discutida e pesquisada pelos países desenvolvidos e também por alguns países em desenvolvimento. Por

consequente, o Brasil está engajado com as atividades propostas pela IPHE nos *scoping papers*, pois considera temas semelhantes em seus documentos internos, como a preocupação com a armazenagem do hidrogênio, P&D para a célula e a definição de códigos e padrões. Ademais, as ações da IPHE e dos países membros contribuem para delimitar as áreas de interesse para o Brasil. Enfim, a participação do Brasil na IPHE foi percebida como positiva para o país ter acesso a informações relativas aos projetos internacionais, bem como estar inserido nos grupos de discussão que detêm as tecnologias mais avançadas.

No Brasil constatou-se que as ações para o desenvolvimento da Economia do Hidrogênio são recentes, pois foi a partir de 2002, com a publicação do PROCAC/PROH2, que começaram a ser formadas as Redes de pesquisa e somente a partir de 2005, com o envolvimento do MME em conjunto com o MCT, que as instituições nacionais formalizaram suas áreas de trabalho mediante a publicação do Roteiro. Uma das ações impulsionadas pelo governo em 2007, por iniciativa do MME, foi a contratação de um profissional para coordenar a revisão do Roteiro, o que pode ser identificada como a primeira ação oficial brasileira para a Economia do Hidrogênio desde a formalização do documento.

Os Projetos Estruturantes foram elaborados na seqüência do Roteiro e inclusive publicados no mesmo documento, mas as opiniões a respeito desses projetos são divergentes. O MME, que elaborou o documento, explicou que foi uma necessidade para operacionalizar o Roteiro, pois este último não possuía metas e nem prazos para a execução. Entretanto, as demais instituições entrevistadas criticaram o fato de os Projetos Estruturantes terem sido elaborados por uma consultoria, sem ouvir a comunidade científica. Até o período das entrevistas, nenhum dos projetos havia sido encaminhado.

A respeito das Redes, foi percebido que a indefinição das políticas públicas e o atraso na liberação de recursos resultaram na desarticulação entre os coordenadores. Diante disso, não se realizam as trocas de informações dentro das redes e entre elas, como já deveria estar ocorrendo.

Os pesquisadores concordaram a respeito das incertezas quanto à implementação da Economia do Hidrogênio no mercado brasileiro. Como proposta, a perspectiva de um novo regime energético é criticada por muitos especialistas porque há no Brasil ampla utilização das fontes renováveis, e, portanto, a transformação dessas fontes em hidrogênio não faz sentido. Esse ponto de vista precisa ser observado, pois, para o Brasil, dificilmente o hidrogênio e a célula serão aplicados nos mesmos moldes que em alguns países estrangeiros, que poluem muito mais e

não apresentam uma matriz energética com as mesmas vantagens que a brasileira em relação ao uso dos renováveis. Para o Brasil, a descarbonização aparece como o principal argumento para a Economia do Hidrogênio.

Na proposta de ruptura tecnológica do regime energético atual para o alcance da Economia do Hidrogênio, entende-se que no Brasil a matriz energética permanecerá composta pelas fontes atuais mas, antes de chegarem ao usuário da energia, passarão por uma segunda etapa, que é a sua transformação em hidrogênio. As células a combustível, por outro lado, poderão substituir os já estabelecidos motores de combustão, bem como diversas formas de geração estacionária de energia. As rupturas tecnológicas poderão ocorrer mediante o uso das tecnologias do hidrogênio e da célula a combustível para o fornecimento de energia para as comunidades isoladas, bem como mediante o transporte público e de cargas adaptados para as tecnologias do hidrogênio e da célula. Outra ruptura citada foi a necessidade de adaptação da infra-estrutura de manutenção para receber as novas tecnologias

Como obstáculos destacou-se a ausência de uma política industrial nos moldes da instituída para o biodiesel, para então fomentar e regulamentar as empresas do setor. O número reduzido de profissionais qualificados para trabalharem na área também foi considerado um obstáculo, pois o investimento na formação de recursos humanos ainda está em seus estágios iniciais, com a formação de poucos mestres e alguns estudos de doutorado em andamento. Apontam-se, também, o número reduzido de empresas privadas pesquisando o hidrogênio e a célula, bem como a pouca interação entre a universidade e a indústria. Assim, é patente a dificuldade em transformar as invenções em inovações, ou seja, trazer os projetos da bancada para a escala pré-comercial. As maiores oportunidades para o país estão na utilização do etanol para gerar o hidrogênio nas aplicações para o transporte coletivo e também na geração estacionária.

Quanto aos tipos de células, o Brasil segue a tendência internacional. Para aplicações estacionárias, desenvolve a SOFC, e para as aplicações veiculares, as células PEMFC. No entanto, assim como nos demais países, a tecnologia das células está em uma etapa mais avançada do que as tecnologias para produção, armazenagem e distribuição do hidrogênio, um ponto que pode atrasar até mesmo o recebimento dos veículos com células a combustível, caso o país não tenha infra-estrutura para o abastecimento e manutenção destes veículos.

Finalmente, quanto aos prazos estabelecidos nos Projetos Estruturantes para que o hidrogênio e a célula a combustível estejam disponíveis para o mercado consumidor, acredita-se que esses prazos foram estimados com base em uma visão unilateral por parte do MME e que, portanto, não refletem a realidade nacional quanto ao desenvolvimento tecnológico. Ademais, os prazos tratam da geração do hidrogênio para uso energético, entretanto, deve-se considerar que para o uso do hidrogênio faz-se necessário que as células a combustível estejam disponíveis no mercado também nesse período, mas não foram estipulados prazos para isso. Conclui-se que a adoção nacional das tecnologias do hidrogênio e da célula a combustível seguirá o panorama internacional, cuja previsão otimista seria para a metade do século XXI.

De resto, os depoimentos, de maneira geral, assinalaram que os investimentos que estão sendo empregados, em termos de custos financeiros e operacionais, bem como o aprendizado já obtido no setor, tornam improvável que o Brasil possa ignorar esta possibilidade de mudança.

CONCLUSÕES

Esta Tese se propôs a analisar em que condições o atual regime energético brasileiro, para fornecimento de energia estacionária e veicular, poderá incorporar as tecnologias do hidrogênio, produzido a partir de fontes renováveis, e das células a combustível. Para estruturar essa análise foram definidos dois objetivos específicos: descrever as principais ações e perspectivas internacionais para o hidrogênio e para a célula a combustível e relatar os avanços obtidos na construção da política nacional para o hidrogênio no Brasil, detalhando os obstáculos e as oportunidades, bem como as possibilidades de uso do hidrogênio na célula a combustível.

Para o levantamento das informações pertinentes ao tema partiu-se da hipótese que a realidade energética do Brasil difere do contexto internacional, principalmente em relação aos países desenvolvidos. Dentre os fatores de diferenciação, destaca-se que os países desenvolvidos estão à frente em termos de evolução tecnológica. Além disso, a opção quanto às fontes para a produção do hidrogênio, bem como os potenciais de aplicação para a célula abastecida com o hidrogênio, complementam os itens de diferenciação internacional.

Desse modo, a respeito das ações e perspectivas internacionais para o hidrogênio e para a célula a combustível, foi possível chegar às seguintes conclusões.

1. No que tange à matriz energética mundial, o conceito de descarbonização vem sendo atualmente aplicado com o propósito de favorecer estratégias e políticas públicas que conduzam à minimização das emissões de poluentes. Realidade que diverge do contexto histórico, quando a descarbonização nada mais foi que uma consequência natural das trajetórias escolhidas. Na atualidade, o meio ambiente passou a ter papel tão ou mais importante que a tecnologia nas decisões sobre o futuro energético, condição esta que colabora com a busca por alternativas energéticas ambientalmente mais amenas. Diante disso, essa é a primeira vez na história da energia, que aspectos como o meio ambiente, a preocupação com a qualidade do ar e as mudanças climáticas poderão influenciar efetivamente o próximo regime energético. Dentre os caminhos disponíveis tem-se a ampliação no uso das fontes renováveis; as tecnologias e estratégias que incluem os MDL, os créditos de carbono e o SAC; e a Economia do Hidrogênio. Em se tratando das

possibilidades citadas, a ampliação do uso das fontes renováveis associada à geração do hidrogênio é a estratégia que poderá ir ao encontro da descarbonização. Ao contrário de ações como o Seqüestro e Armazenamento de Carbono que mantêm o modelo dominante de uso energético, atrasando a descarbonização.

2. Apesar da crescente preocupação com os impactos ambientais derivados da geração e do uso energético, para muitos países a Economia do Hidrogênio como regime energético é compreendida como uma opção a ser adotada apenas como solução para a redução da oferta dos recursos fósseis e problemas de segurança energética. Nesses países os combustíveis fósseis serão empregados para gerar o hidrogênio, e somente com o esgotamento dessas fontes não-renováveis é que se pretende utilizar os recursos renováveis para obter o hidrogênio, realidade encontrada nos Estados Unidos e também no Japão, líderes mundiais no desenvolvimento de tecnologias para o hidrogênio e para a célula a combustível.
3. Em que pese as dificuldades apresentadas, o movimento internacional para a Economia do Hidrogênio se torna maior a cada ano, pois cada vez mais os países estão evoluindo em relação às suas pesquisas com as tecnologias para o hidrogênio e para as células a combustível. Lentamente algumas tecnologias da célula a combustível, voltadas ao uso veicular e estacionário, transcendem o espaço dos projetos de demonstração e começam a entrar no mercado; é o que vem acontecendo com as células empregadas para reserva energética. Ademais, existem diferenças em relação às estratégias adotadas em cada país, como a opção por fontes renováveis ou não-renováveis para gerar o hidrogênio, bem como o emprego preferencial das células a combustível na geração estacionária ou veicular. No setor veicular em especial, os países também se diferenciam quanto às opções pelo transporte coletivo, de cargas, ou de passeio.
4. Na participação internacional a *International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE) tem sido um poderoso instrumento político, pois tem conseguido reunir os países participantes para tratar de temas relativos às tecnologias do hidrogênio e da célula a combustível, bem como promove trocas de informações com os atores internacionais para

discutir os aspectos políticos, econômicos e sociais pertinentes a esses temas. Entretanto, a IPHE não influencia diretamente as políticas de C&T dos países pertencentes ao grupo, o seu papel restringe-se a um fórum de discussões internacionais sobre o tema Economia do Hidrogênio.

5. No âmbito da IEA, os países membros do *Hydrogen Co-ordination Group* (HCG) possuem um grande envolvimento da indústria com a comunidade científica, característica ausente no Brasil. O setor veicular é o mais desenvolvido, principalmente na Itália, no Japão, nos Estados Unidos e na França, países que possuem tradição e alta tecnologia no setor automotivo e estão transferindo essas habilidades para a produção das tecnologias necessárias para a inserção dos automóveis com células a combustível no mercado. Já as estratégias canadense e alemã para os transportes se parecem mais com a brasileira, pois estão investindo em projetos de demonstração para o transporte coletivo. Os demais países citados no quadro 1.6, em sua maioria, estão mais avançados no desenvolvimento de tecnologias para a célula a combustível do que para o hidrogênio, principalmente as células PEMFC, MCFC e SOFC, tecnologias que, de maneira geral, estão mais desenvolvidas no mundo todo.
6. Não existe um modelo de Economia do Hidrogênio que será igualmente aplicado em todos os países. Cada região possui suas características, tais como índices de poluição, necessidade energética e disponibilidade de fontes renováveis e não renováveis. Há ainda os fatores que compõem o ambiente de seleção, tais como os custos e benefícios para as indústrias e para o governo, as influências dos consumidores e as regulamentações. Em função dessas necessidades é que se torna difícil afirmar em que casos as mudanças no regime energético serão radicais ou incrementais e quando será possível constatar um novo regime energético.
7. O Brasil é um dos países em desenvolvimento que está representado na IPHE, sendo o único do continente sul-americano. Portanto, mesmo considerando o fato de ser um país periférico e seguir as tendências dos países centrais, é oportuno conhecer as tendências tecnológicas para o hidrogênio e para a célula a combustível. Afinal, dificilmente o Brasil poderá negar-se a receber as inovações tecnológicas à medida que a Economia do

Hidrogênio começar a tornar-se uma realidade no ambiente internacional. Por conseguinte, cabe ao país tornar-se referência para os demais países em condições equivalentes de desenvolvimento, repetindo assim o que vem ocorrendo na Europa, com a Alemanha, país que é responsável por mais de 70% dos projetos europeus para o hidrogênio e para a célula a combustível.

Quanto aos avanços obtidos na construção da política brasileira para a Economia do Hidrogênio, foram apontados os obstáculos e as oportunidades, evidenciando-se que os obstáculos para a mudança no regime energético ainda não foram superados nem mesmo na esfera tecnológica, e a eles se somam as dificuldades institucionais e econômicas para a mudança de regime. Constatou-se a esse respeito:

1. Para o Brasil, as rupturas tecnológicas estarão presentes na possibilidade de armazenagem do excedente das hidrelétricas, preferencialmente no caso das usinas a fio d'água, e na disponibilidade de energia para as comunidades isoladas, ou seja, os sistemas estacionários. Desse modo, as células SOFC e PEMFC representam as maiores oportunidades para o país, isso desde que no futuro estejam tecnologicamente prontas para o mercado. No que diz respeito à PEMFC, esta é uma tecnologia dominada pela maior parte dos países desenvolvidos. Nesse caso, a produção do hidrogênio para abastecer as células é outro nicho de mercado para o Brasil, propiciando a utilização dos veículos com células a combustível que virão do exterior, ou seja, o fornecimento de combustível para os veículos com tecnologia estrangeira que serão importados ou montados no Brasil. Portanto, o Brasil poderá concentrar esforços no desenvolvimento tecnológico para a produção do hidrogênio, uma tecnologia que precisará estar prontamente disponível para o abastecimento delas.
2. Além da infra-estrutura para a geração do hidrogênio, o país precisará desenvolver infra-estrutura adequada para a manutenção dessa tecnologia, tanto para o setor estacionário quanto veicular. Nesses termos também será necessária a formação de profissionais qualificados para trabalharem no setor automotivo e nas empresas de energia.

3. As instituições nacionais precisam avançar no estabelecimento de relações entre o meio acadêmico e empresarial, seja por meio de regulamentação, ou de convênios, ou até mesmo da aplicação de recursos para P&D provenientes do setor energético. A definição das políticas que intermedeiem essas relações, bem como incentivos fiscais e recursos para pesquisas poderão fortalecer o relacionamento entre as universidades e as indústrias, de modo que os interesses possam convergir para o desenvolvimento tecnológico.
4. Nos projetos nacionais as tecnologias estão em estágio embrionário, isto é, as empresas brasileiras que optaram por investir no desenvolvimento das tecnologias para a Economia do Hidrogênio não apresentam produtos prontos para o mercado. Isto posto, são poucas as iniciativas que conseguem fornecer a tecnologia para os projetos experimentais que estão em andamento no país, por isso a maioria das instituições utiliza tecnologia importada. Nesse quadro, a evolução do desenvolvimento tecnológico brasileiro será inicialmente validada para a capacitação dos recursos humanos internos e adaptação das tecnologias provenientes do exterior.
5. O etanol representa uma alternativa energética na qual o desenvolvimento tecnológico brasileiro ainda está à frente do restante do mundo. Mas o país poderá perder a sua liderança na produção do hidrogênio a partir do etanol, pois os EUA poderão alcançar a escala comercial muito antes de o Brasil definir quais são os seus objetivos para o etanol na Economia do Hidrogênio.
6. As Redes de Pesquisa são uma iniciativa do poder público para mapear as pesquisas em torno da célula e do hidrogênio em andamento no país. Atualmente os recursos disponibilizados têm sido insuficientes e limitam as ações da comunidade científica, pois esta fica condicionada aos recursos que o governo tem liberado para determinado tipo de estudo. Sob a ótica governamental as Redes estão cumprindo seus objetivos, que seria organizar áreas-chave de pesquisa, promover a integração e os recursos necessários, mas, para a comunidade científica, a sua formação foi pontual, os recursos não foram adequadamente disponibilizados e os integrantes não compartilham informações com receio de revelar segredos de pesquisas ainda não concluídas. Dessa forma, as Redes

podem ser entendidas como um agrupamento das pesquisas por área temática, mas sem um grande envolvimento entre os participantes.

7. O país não detém uma política industrial para o hidrogênio ou para a célula a combustível, o que torna muito difícil a atuação da comunidade científica. O governo precisa delimitar as suas áreas de interesse para o desenvolvimento científico e tecnológico para, então, definir os temas, disponibilizar os recursos e promover a troca de informações entre as entidades envolvidas.
8. Em termos de política nacional o país ainda precisa promover debates entre o governo, a comunidade científica e a indústria de modo a incentivar o estabelecimento de estratégias adequadas à realidade nacional. Sendo assim, além de espelhar-se em modelos de sucesso apresentados pelos países desenvolvidos, faz-se necessário adaptar a política aos problemas brasileiros. Os documentos inicialmente propostos precisam ser continuados, pois somente mediante a participação do poder público é que a comunidade científica obterá os limites e as intenções formais para o país rumo a um novo regime energético.
9. Mesmo considerando a intensiva exploração dos combustíveis fósseis e até mesmo o incentivo à construção de termoeletricas, de certo modo a política energética nacional já valoriza o desenvolvimento tecnológico para os combustíveis renováveis, porém, sem uma definição legal quanto a isso, dificultando ainda mais o estabelecimento de diretrizes para a Economia do Hidrogênio. Neste aspecto vale lembrar as dificuldades iniciais para articulação do Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel, identificar como foram superadas e aplicar o aprendizado adquirido para então formatar um Programa Nacional para a Produção e Uso do Hidrogênio.

Quanto às condições para que o atual regime energético brasileiro possa vir a ser substituído pelo hidrogênio, produzido a partir de fontes renováveis, e pelas células a combustível, chegou-se às seguintes conclusões:

1. Tem-se na geração distribuída do hidrogênio a solução de curto prazo para o Brasil, o que ocorrerá mediante a aplicação de reformadores internos acoplados às células a

combustível que possibilitem a conversão do gás natural em hidrogênio. Constatou-se que para a geração centralizada a infra-estrutura é uma questão complexa que depende de ações que se estendem muito além das universidades e centros de pesquisa, pois são necessários incentivos e investimentos por parte dos governos e das indústrias.

2. Os cidadãos brasileiros ainda não têm no meio ambiente um apelo importante em suas decisões sobre consumo energético. Fato que ocorre, em grande parte, devido aos recursos limitados que forçam o consumidor a escolher pela energia mais barata e não a mais ecológica, um luxo que estaria disponível para uma parcela muito pequena da população, mas que em geral não atrai nem mesmo aqueles que representam as classes sociais mais altas. Essa condição pode atrasar ainda mais a substituição do regime energético, principalmente porque nos estágios iniciais de entrada no mercado os custos das tecnologias são mais elevados do que aqueles observados em tecnologias já estabelecidas.
3. 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 dá em função de uma matriz energética representada 45% por fontes renováveis. No entanto, mesmo com essa vantagem em relação ao contexto internacional, o hidrogênio e as células a combustível representam uma alternativa para complementar a geração estacionária e veicular de energia.
4. Atualmente o hidrogênio brasileiro tem sido gerado prioritariamente a partir do gás natural, de tal modo que as fontes renováveis para a produção do hidrogênio serão empregadas apenas quando alcançarem viabilidade econômica. Condição essa que leva a compreender a Economia do Hidrogênio como uma evolução em relação ao uso dos renováveis, pois possibilitará o seu armazenamento. Essa é a perspectiva que tem na Economia do Hidrogênio uma solução para os problemas relativos ao meio ambiente, como o aquecimento global e a poluição. Mas, enquanto a prioridade nacional for o fornecimento energético, tendo por contrapartida as medidas de mitigação para minimizar os impactos após o uso, o desenvolvimento tecnológico e as decisões políticas para a Economia do Hidrogênio continuarão a ser postergadas no país. Pois neste caso o

hidrogênio obtido das fontes renováveis e a célula a combustível representam um objetivo secundário em relação ao lucro e por isso terão a sua adoção adiada.

5. Uma das questões que permanece sem resposta é se o resultado final da geração de poluentes, mediante a transformação do combustível fóssil em hidrogênio, será menor do que se ocorrer a utilização direta do combustível fóssil com o posterior armazenamento do carbono gerado. Ambas alternativas ainda não foram suficientemente testadas, tampouco comprovadas. Atualmente considera-se que os ganhos reais para a redução dos poluentes somente serão representativos quando o hidrogênio for obtido essencialmente de fontes renováveis. Nessa perspectiva poderá ocorrer uma mudança radical e, quiçá, uma descontinuidade em relação ao regime energético dominante. Assim, presume-se que a opção pelas fontes fósseis para produzir o hidrogênio não mudaria o regime energético brasileiro. Constatou-se que as rupturas tecnológicas estão na opção pelas fontes renováveis para a produção do hidrogênio e na célula a combustível, em substituição aos motores de combustão.
6. Quando as escolhas energéticas priorizarem os fatores ambientais em relação às questões tecnológicas será possível alcançar a descontinuidade em relação ao regime vigente, alterando assim o curso dominante no qual durante muito tempo as decisões ambientais dependeram das decisões tecnológicas, sem que o inverso tivesse a mesma importância. Essa é a questão fundamental para o país: aderir ou não à Economia do Hidrogênio. Não basta somente seguir a tendência tecnológica para manter-se em equilíbrio com o ambiente internacional, mas sim definir qual a prioridade nacional. Além disso, para alcançar a sustentabilidade há outros caminhos cogitados que são independentes de uma descontinuidade do regime energético vigente. Neste aspecto as inovações incrementais, isto é, a continuidade do regime dominante, também poderá minimizar as emissões. Possibilidade que pode ocorrer mediante a utilização dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo e também das tecnologias para Seqüestro e Armazenamento do Carbono. Mas, essas opções podem ser contrárias ao ideal da descarbonização, o que será um problema se o meio ambiente for um objetivo estratégico para o Brasil.

7. Para que a Economia do Hidrogênio leve a alterações substanciais e definitivas no curso da atual trajetória energética serão necessárias mudanças políticas, sociais e econômicas que sustentem a tecnologia. Sendo assim, a Economia do Hidrogênio somente representará um novo regime energético desde que o hidrogênio e as células a combustível se tornem o principal eixo condutor em um dado contexto sócio-econômico, promovendo, além da descarbonização, impactos no modo de vida de toda a sociedade. Características que somente poderão ser comprovadas no futuro quando o hidrogênio e as células a combustível forem sistematicamente adotados pelos produtores e usuários de energia.
8. A transição para um novo regime energético não garante a redução nos níveis das emissões de CO₂, o que poderá continuar aumentando devido ao constante crescimento no consumo energético. Por conseguinte, a mudança no regime resolverá grande parte dos problemas até que se chegue a um novo ponto de estrangulamento, onde mudanças radicais, promovidas por rupturas tecnológicas, possam ser novamente necessárias.
9. Mesmo que a Economia do Hidrogênio não se estabeleça como um novo regime, dada a magnitude dos investimentos e esforços em P&D já realizados, nacional e internacionalmente, tanto com o objetivo de realizar pesquisa básica, quanto para o desenvolvimento de produtos para o mercado, parece pouco provável que os avanços alcançados não influenciem de algum modo o atual regime energético, interferindo na trajetória que vem sendo construída há mais de um século.

Cabe destacar que no âmbito internacional o levantamento aqui realizado foi meramente ilustrativo, portanto recomendam-se pesquisas futuras mais específicas, a começar pelos países considerados mais avançados, a fim de compreender a evolução da Economia do Hidrogênio em diferentes realidades políticas, econômicas e sociais. Recomendam-se também pesquisas futuras voltadas à atividade industrial, investigando a capacidade de as empresas nacionais produzirem as tecnologias necessárias.

Para o Brasil, recomendam-se pesquisas futuras que levistem os avanços já alcançados pelos atuais projetos, bem como o volume de recursos necessários para a sua continuidade.

Recomenda-se ainda um levantamento do perfil profissional e acadêmico dos pesquisadores que estão desenvolvendo projetos na área, mapeando esses projetos de acordo as respectivas áreas de formação dos pesquisadores. Desse modo será possível identificar todas as áreas de conhecimento que de alguma forma estão envolvidas ou poderão contribuir para a Economia do Hidrogênio no Brasil.

Considerando o exposto, esta Tese atingiu o maior objetivo da autora que foi aplicar os conceitos da teoria evolucionista para compreender o contexto da Economia do Hidrogênio, quais as possibilidades de aplicação, impactos ao meio ambiente e ao estilo de vida moderno, bem como entender o processo de construção de uma política no Brasil e como o Brasil se posiciona em relação ao contexto internacional.

Finaliza-se descrevendo as contribuições para o ambiente acadêmico e para o mercado. No ambiente acadêmico são poucas as teses que tratam do tema. As que o fazem, em sua maioria, são da área de engenharia e têm por objetivo analisar elementos tecnológicos. São teses que abrangem pesquisa básica, afinal a tecnologia é embrionária no país. Pelos motivos citados valorizam-se o pioneirismo desta Tese e o ineditismo de muitas das informações aqui agrupadas, as quais trataram dos contextos institucional e econômico para a Economia do Hidrogênio. Ademais, o levantamento de informações aqui realizado poderá contribuir para o entendimento das ações em termos de políticas públicas, e como as universidades, empresas e institutos de pesquisa estão se organizando para enfrentar o desafio de uma ruptura no regime energético dominante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, Björn A.; JACOBSSON, Staffan. **Monitoring and assessing technology choice:** the case of solar cells. *Energy Policy*, v. 28, 1037-1049, 2000.

ANP – Agência Nacional do Petróleo. Anuário Estatístico: **Dados Estatísticos Mensais**. Disponível em http://www.anp.gov.br/petro/dados_estatisticos.asp. Acesso em 03 de março de 2008.

BACON, F.T. **The development and practical application of fuel cells:** keynote address. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 10, N. 7/8, pp. 423-430, 1985. Printed in Great Britain.

BAJAY, Sérgio Valdir; BADANHAN, Luís Fernando. **Energia no Brasil:** os próximos dez anos. In: Evento sustentabilidade na geração e uso de energia, unicamp, 18 a 20 de fevereiro de 2002.

BARRETO, L.; MAKIHIRA, A.; RIAHI, K. **The hydrogen economy in the 21st century:** a sustainable development scenario. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 28, N. 3, pp. 267-284, 2003.

BICELLI, L. Peraldo. **Hydrogen: a clean energy source.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 11, N. 9, pp. 555-562, 1986. Printed in Great Britain.

BREELLE, Y.; GELIN, P.; MEYER, C.; PETIT G. **Technico-economic study of distributing hydrogen for automotive vehicles.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 4, pp. 297-314. Pergamon Press, 1979. Printed in Great Britain.

BUCHNER, H. **The question of the hydrogen infrastructure for motor vehicles.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 8, N. 5, pp. 173-380, 1983. Printed in Great Britain.

CALABI, Andréa Sandro et al. **A energia e a economia brasileira: interações econômicas e institucionais no desenvolvimento do setor energético no Brasil.** São Paulo: Pioneira, 1983.

CAMERON, D. S. **World Developments of fuel cells.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 15, N. 9, pp. 669-675, 1990. Printed in Great Britain.

CARBONO BRASIL. Disponível em www.carbonobrasil.com. Acesso em 02 de setembro de 2007.

CHERRY, Robert S. **A hydrogen utopia?** *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 29, N. 2, pp. 125-129, 2004.

COLLECTING THE HISTORY OF FUEL CELLS. Disponível em: <http://americanhistory.si.edu/fuelcells>. Acesso em 31 de maio de 2006.

COMISSÃO EUROPÉIA. **European Fuel Cell and Hydrogen Projects:** 2002-2006. Sustainable development, global, change and ecosystems.

COPPE-UFRJ. **Laboratório de Hidrogênio - LABH2**. Disponível em <http://www.labh2.coppe.ufrj.br>. Acesso em 2007.

CORDEIRO, Jorge. **Seqüestro e Armazenamento de Carbono**. 27 de Abril de 2007. Disponível em www.greenpeace.org/brasil. Acesso em 02 de setembro de 2007

CTPETRO. **Visão de futuro do setor de óleo e gás no Brasil Horizonte 2010**. Cenários exploratórios e normativo focalizados no setor de Óleo & Gás. Versão final, resumo executivo, 28 de junho de 2002.

D'AJUZ, A.; ELLERY FILHO, E.H; CONTI, A. M.; MATTOS, M. C. **Electrical energy transmission from the amazon region**: hydrogen as a promising alternative in Brazil. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 14, N. 8, pp. 515-523, 1989. Printed in Great Britain.

DANTE, R.C. et al. **Life cycle analysis of hydrogen fuel**: a methodology for a strategic approach of decision making. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 27, N. 2, pp. 131-133, 2002.

DINGA, Gustav P. **Hydrogen: the ultimate fuel and energy carrier**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 14, N. 11, pp. 777-784, 1989. Printed in Great Britain.

DONITZ, W. **Economics and potential application of electrolytic hydrogen in the next decades**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 9, N. 10, pp. 817-821, 1984. Printed in Great Britain.

DOSI, G. **Technological paradigms and technological trajectories**: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research Policy**, v.11, 147-171, 1982.

DOSI, G. **Technical change and industrial transformation**. The theory and an application to the semiconductor industry. MacMillan, Londres, 1984.

DOSI, Giovanni; PAVITT, Keith; SOETE, Luc. **La economía del cambio técnico y el comercio internacional**. Secretaría de Comercio y Foment Industrial. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, 1993

DUNHAM, Fabrício Brollo; BOMTEMPO, José Vitor; ALMEIDA, Emar Luiz Fagundes de Almeida. **Trajectorias tecnológicas em combustíveis sintéticos**: análise dos mecanismos de seleção e indução. Revista Brasileira de Inovação. Vol. 5. N. 1. Janeiro/junho 2006.

DUNN, Seth. **Hydrogen futures**: toward a sustainable energy system. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 27, N. 3, pp. 235-264, 2002.

EG&G Technical Services, Inc. **Fuel Cell Handbook** (Sixth Edition). Science Applications International Corporation. Morgantown, West Virginia, November 2002

EKDUNGE, Per and RABERG, Monika. **The fuel cell vehicle analysis of energy use, emissions and cost.** International Journal of Hydrogen Energy, Vol 23, N. 5, pp. 381-385, 1998. Printed in Great Britain.

ERDMANN, Georg. **Future economics of the fuel cell housing market.** International Journal of Hydrogen Energy, Vol 28, N. 7, pp. 685-694, 2003.

ESCHER, W. J. D. **The case for solar/hydrogen energy.** International Journal of Hydrogen Energy, Vol 8, pp. 479-498, 1983. Printed in Great Britain.

FORAY, Dominique; GRÜBLER, Arnulf. Technology and the environment: an overview **Technological Forecasting and Social Change.** 53, 3-13 (1996)

FREEMAN, C. **La teoria económica de la innovación industrial,** Alianza Editorial, Madrid, 1974.

FREEMAN, C. et al. **Technical innovation and long waves in world economic development.** Futures, vol. 13, n. 4, ago/1981

FREEMAN, C., Information technology and change in techno-economic paradigm. In: FREEMAN, C; SOETE, L. (eds) **Technical change and full employment.** Blackwell, Oxford, 1987.

FREEMAN, C., PEREZ, C. Structural crises of adjustment, business cycles and investment behaviour. In: : Dosi, G. et al. (eds.). **Technical Change and Economic Theory.** London: Pinter, 1988.

FREEMAN, C. The Greening of Technology and Models of Innovation. **Technological Forecasting and Social Change** 53, 27-39 (1996)

FREEMAN, C; SOETE, L. **The Economics of Industrial Innovation.** 3 ed. The MIT Press, 1997.

GOLDEMBERG, José et al. **Energia para o desenvolvimento.** São Paulo : T. A. Queiroz, 1988.

GOLDEMBERG, José. In: **World energy assessment:** energy and the challenge of sustainability. UNDP, 2000.

GOLDEMBERG, José. **Energy and sustainable development.** In: Evento sustentabilidade na geração e uso de energia, unicamp, 18 a 20 de fevereiro de 2002.

GOLDEMBERG, José; VILLANUEVA, Luz Dondero. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** 2 ed. rev. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

GOLTISOV, Victor A.; VEZIROGLU, T. Nejat. **From hydrogen economy to hydrogen civilization.** International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, N. 1, pp. 909-915, 2001. Printed in Great Britain.

GOLTISOV, Victor A.; VEZIROGLU, T. Nejat; GOLTISOVA, L.F. **Hydrogen civilization of the future**—A new conception of the IAHE. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 31, N. 2, Pages 153-159, February 2006,

GOMES NETO, Emilio Hoffmann. **Hidrogênio evoluir sem poluir:** A era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005

GREENPEACE. **Captura e armazenamento de carbono é falsa esperança.** 05 de Maio de 2008. Disponível em www.greenpeace.org/brasil. Acesso em 14 de agosto de 2008.

HEFNER III, Robert A. **Toward sustainable economic growth:** the age of energy gases. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 20, N. 12, pp. 945-948, 1995. Printed in Great Britain.

HOLDREN, John P.; SMITH, Kirk R. **Energy, the environment and health.** In: World energy assessment: energy and the challenge of sustainability. UNDP, 2000.

HORTA NOGUEIRA, L.A.. **Produção e processamento do petróleo e gás natural no Brasil:** perspectivas e sustentabilidade nos próximos 20 anos. In: Evento sustentabilidade na geração e uso de energia, Unicamp, 18 a 20 de fevereiro de 2002.

IEA, International Energy Agency. **Energy to 2050:** Scenarios for a Sustainable Future, OECD/IEA, 2003

IEA, International Energy Agency. **Hydrogen & Fuel Cells:** Review of National R&D Programs, OECD/IEA, 2004

IEA, International Energy Agency. **Energy Technology Analysis:** Prospects for hydrogen and fuel cells, OECD/IEA, 2005

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. O que é o INMETRO. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/inmetro/oque.asp>. Acesso em 2007.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Navio de containers movido a hidrogênio fará viagens na metade do tempo. 01 de março de 2007. Disponível em: www.inovacaotecnologica.com.br . Acesso em 05 de abril de 2007.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Submarino será alimentado por célula a combustível. 11 de março de 2004. Disponível em: www.inovacaotecnologica.com.br . Acesso em 05 de abril de 2007.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Boeing testa primeiro avião híbrido alimentado por célula a combustível. 02 de abril de 2007. Disponível em: www.inovacaotecnologica.com.br . Acesso em 05 de abril de 2007a.

IPHE Collaborative projects recognized in 2005. Disponível em www.iphe.net. Acesso em 04 de dezembro de 2006.

IPHE. Implementation-Liaison Committee. Scoping Papers. Sumário executivo. Disponível em www.iphe.net/Scoping%20Papers/3-1-05%20Combined%20Scoping%20Papers.pdf . Acesso em 10 de dezembro de 2006.

JACCARD, Mark. **Sustainable fossil fuel: the unusual suspect in the quest for clean and enduring energy**. Cambridge University Press, 2005.

JACOBSSON, Staffan; JOHNSON, Anna. **The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research**. Energy Policy, v. 28, 625-640, 2000.

KHALILI, Amyra El. **O que são créditos de carbono?** Revista Eco 21, ano XII, nº74, janeiro/2003.

KEMP, René. **Technology and the transition to environmental sustainability**. Futures, vol 26, n 10, 1994.

KEMP, René; SOETE, Luc. **The greening of technological progress: an evolutionary perspective**. Futures 24 (5), 1992.

KEMP, R. **Environmental Policy and Technical Change: a comparison of the technological impact of policy instruments**. Cheltenham: Edward Elgar, 1997.

LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. **O Instituto**. Disponível em <http://www.lactec.org.br>. Acesso em 2007

LARSEN, Hans; FEIDENHANS'I, Robert; PETERSEN, Leif Sonderberg. **Riso Energy Report 3**. Hydrogen and its competitors. Riso National Laboratory, November, 2004.

LEIS, Héctor Ricardo. **A modernidade insustentável: as críticas do ambientalismo à sociedade contemporânea**. Petrópolis, Rio de Janeiro: Vozes; Santa Catarina: UFSC, 1999.

LIMA, Lutero Carmo de; VEZIROGLU, T. Nejat. **Long-term environmental and socio-economic impact of a hydrogen energy program in Brazil**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 26, N. 1, pp. 39-45, 2001.

MARTIN, Jean-Marie. **A economia mundial da energia**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1992.

MARTIN, Jean-Marie. Energy Technologies: systemic aspects, technological trajectories, and institutional frameworks. **Technological Forecasting and Social Change**.53, 81-95 (1996)

MARTIN, Jean-Marie. Le changement des technologies de l'énergie: gen~ese, modalités et hypothèses explicatives. In: BOURGEOIS, Bernard; FINON, Dominique; MARTIN, Jean-Marie. **Énergie et changement technologique: une approche évolutionniste**. Paris : Economica, 2000.

MATTOS, M. C. **National hydrogen energy program in Brazil**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 10, N. 9, pp. 601-606, 1985. Printed in Great Britain.

MCT – Ministério da Ciência & Tecnologia. **Programa Brasileiro de Sistemas Célula Combustível**. Disponível em www.mct.gov.br. Acesso em 07 de março de 2005.

MCT – Ministério da Ciência & Tecnologia. **Programa de Hidrogênio**. Disponível em www.mct.gov.br. Acesso em 19 de junho de 2006.

MCT HIDROGÊNIO. Disponível em: <http://hidrogenio.mct.gov.br/>. Acesso em: 10 de julho de 2007.

MCT – Ministério da Ciência & Tecnologia. **Sobre o MCT**. Disponível em: www.mct.gov.br. Acesso em 2007.

MME – Ministério das Minas e Energia. Plano do longo prazo. **Projeção da matriz 2022**. Sumário executivo. Dezembro de 2002. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 19 de fevereiro de 2005.

MME – Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional (BEN): exercício de 2006. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 02 de setembro de 2007.

MME – Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional: exercício de 2007. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 26 de abril de 2008.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Roteiro para a estruturação da economia do hidrogênio no Brasil Versão Beta**. Março de 2005. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 24 de janeiro de 2006.

MME - Ministério das Minas e Energia. **O ministério**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 2007.

MOORE, R. B.; RAMAN, V. **Hydrogen infrastructure for fuel cell transportation**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 23, N. 7, pp. 617-620, 1998. Printed in Great Britain.

MOWERY, David C.; ROSENBERG, Nathan. **Trajetórias da inovação: a mudança tecnológica nos Estados Unidos da América no século XX**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2005.

MYTELKA, Lynn K. **New wave technologies:** their emergence, diffusion and impact: the case of hydrogen fuel cell technology and the developing world. Institute for new technologies. United Nations University. July, 2003.

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

NAKICENOVIC, Nebojsa. **Long- term strategies for mitigation global warming**. Pergamon Press. International Institute for Applied Systems Analysis, Luxemburg, 1993.

NELSON, R., WINTER, N. **An Evolutionary Theory of Economic Change**. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press, 1982. 437p.

NICOLETTI, G. **The hydrogen option for energy: a review of technical, environmental and economic aspects**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 20, N. 10, pp. 759-765, 1995. Printed in Great Britain.

ODELL, PETER R. **Why carbon fuels will dominate the 21 st century's global energy economy**. Peter Odell: London, 2004.

PEREIRA, Newton Muller. **O fim do petróleo e outros mitos**. ComCiência, N. 38, dez. 02/jan. 03. disponível em www.comciencia.com.br. Acesso em: 11/11/2005.

PIORE, M. J.; SABEL, C. F. The second industrial divide – Possibilities for prosperity, Basic Books, EUA, 1984.

POSSAS, M. L. (1987). **A dinâmica da economia capitalista:** uma abordagem teórica. Brasiliense, São Paulo, 1987.

RIFKIN, Jeremy. **A economia do hidrogênio**. São Paulo: MBooks, 2003.

REDDY, Amulya K. N. **Energy and social issues**. In: World energy assessment: energy and the challenge of sustainability. UNDP, 2000.

ROGNER, H. H. **Fuel cells, energy system evolution and electric utilities**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 19, N. 10, pp. 853-861, 1994. Printed in Great Britain.

ROGNER, H.H. **Hydrogen technologies and the technology learning curve**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 23, N. 9, pp. 833-840, 1998. Printed in Great Britain.

ROGNER, Hans-Holger; POPESCU, Anca. **An introduction to energy**. In: World energy assessment: energy and the challenge of sustainability. UNDP, 2000.

ROGNER, Hans-Holger. **Energy resources**. In: World energy assessment: energy and the challenge of sustainability. UNDP, 2000.

ROSENBERG, Nathan. Ciência e tecnologia no século XX. In: DOSI, Giovanni; GIANNETTI, Renato; TONINELLI, Pier Angelo. **Technology and enterprise in a historical perspective**. Oxford : Clarendon, 1992 .

SACHS, Ignacy. **Ecodesenvolvimento** : crescer sem destruir. São Paulo : Vértice, 1986.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável** / organização: Paula Yone Stroh – Rio de Janeiro: Garamond, 2000.

SCHMIDHEINY, Stephan. **Mudando o rumo**. Rio de Janeiro : FGV, 1992.

SCHUMPETER, J. A. (1912). **Teoria do Desenvolvimento Econômico**. Col. Os Economistas. Abril Cultural, São Paulo, 1983.

SILVA, Ennio Peres da; CAMARGO, João Carlos; SORDI, Alexandre; SANTOS, Ana Maria Resende, O futuro dos recursos. Revista Multiciência: Revista Interdisciplinar do Centros e Núcleos da UNICAMP. 1, novembro de 2003. Disponível em: http://www.multiciencia.unicamp.br/intro_01.htm. Acesso em 05 de julho de 2007.

SUNKEL, Osvaldo. La interacion entre los estilos de desarrollo y el medio ambiente en la America Latina. In: Sunkel, O., ed, **Estilos de desarrollo y medio ambiente in la América Latina**. México: Fondo de Cultura Económica, 1980. p. 9-63.

TIGRE, Paulo Bastos. **Gestão da inovação**: a economia da tecnologia no Brasil. Rio de Janeiro: elsevier, 2006.

TIGRE, Paulo Bastos. **Paradigmas tecnológicos e teorias econômicas da firma**. Revista Brasileira de Inovação. Vol 4. N.1. Janeiro/junho 2005.

THOMAS, C. E.; JAMES B.D.; LOMAX, Jr. F. D. **Market penetration scenarios for fuel cell vehicles**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 23, N. 10, pp. 949-966, 1998. Printed in Great Britain.

TURKENBURG. Wim C. **Renewable energy technologies**. In: World energy assessment: energy and the challenge of sustainability. UNDP, 2000.

USDOE, Departamento de Energia dos Estados Unidos . **International Total Primary Energy Consumption and Energy Intensity**. Disponível em: [www. Energy.gov](http://www.energy.gov). Acesso em 20 de maio de 2007.

VERSPAGEN, Bart. **Mapping technological trajectories as patent citation networks**. A study on the history of fuel cell research. Eindhoven Centre for Innovation Studies, The Netherlands. Working Paper, july, 2005.

VEZIROGLU, T. Nejat. **Hydrogen technology for energy needs of human settlements**. International journal of hydrogen energy, vol 12, n. 2, pp. 99-129, 1987. Printed in great britain.

VEZIROGLU, T. Nejat. **Twenty years of the hydrogen movement:** 1974-1994. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 20, N. 1, pp. 1-7, 1995. Printed in Great Britain.

WINTER, Carl-Jochen. **The hydrogen energy economy:** an address to the World Economic Forum 2004. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 29, N. 11, pp. 1095-1097, 2004.

APÊNDICES

1. ENTREVISTADOS

Nome	Instituição	Participação no Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil
Adriano Duarte Filho	MCT	Coordenador de Grupo de Trabalho.
Ennio Peres da Silva	CENEH e LH2/UNICAMP	Coordenador de Grupo de Trabalho e Colaborador Convidado
Gilson Paulillo	LACTEC	Coordenador de Grupo de Trabalho.
Mauricio Pereira Cantão	LACTEC	Operador das Atividades do Roteiro Diretor de operações do LACTEC
Symone Christine de Santana Araújo	MME	Coordenadora de Grupo de Trabalho e Responsável pela Consolidação das Informações e Edição do Roteiro. Atual Coordenadora Geral do Roteiro.
Paulo Emilio Valadão de Miranda	COPPE/UFRJ	Coordenador de Grupo de Trabalho.
Sérgio Pinheiro de Oliveira	INMETRO	Coordenador de Grupo de Trabalho.

FONTE: Elaborado pela autora.

2. ROTEIRO DE ENTREVISTAS

IDENTIFICAÇÃO DO RESPONDENTE:

Nome da Instituição:
Nome dos Respondentes:
Cargo e função:
Formação acadêmica:

- 1) Quais os principais projetos em andamento, já realizados ou previstos pela instituição envolvendo o hidrogênio e(ou) a célula a combustível?
- 2) Como são obtidos os recursos financeiros para o financiamento dos projetos?
- 3) Qual o envolvimento da Instituição com a Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio e com o Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio? Como esses dois documentos estão relacionados?
- 4) Como tem sido a participação do Brasil na IPHE? Comente a respeito da inserção do Brasil nessa parceria e quais os potenciais riscos e benefícios para o país.
- 5) O gás natural e o etanol estão presentes em todos os debates a respeito da economia do hidrogênio no Brasil. Qual destes recursos seria mais adequado para o país e como isso está se desenvolvendo?

O ROTEIRO PARA ESTRUTURAÇÃO DA ECONOMIA DO HIDROGENIO E O PROGRAMA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

- 1) Como tem se dado a evolução dos projetos estruturantes que compõem subprogramas para a Estruturação da Economia do Hidrogênio?
 - a) Etanol
 - b) Eletrólise da água
 - c) Gás natural
 - d) Biomassa e processos alternativos
- 2) Como foram coletadas as informações e opiniões dos 115 colaboradores para elaboração do Roteiro do Hidrogênio?
- 3) Quem está financiando o Roteiro do Hidrogênio? Qual a origem dos recursos?
- 4) Que tipo de interação tem sido promovida pelo Roteiro entre as Universidades, Empresas, Órgãos governamentais e Institutos de Pesquisa? Como acontecem as discussões e são tomadas as decisões?

ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

- 1) O motor de combustão promoveu uma inovação transformadora única. Tais mudanças foram interpretadas como uma **nova trajetória tecnológica**, o mesmo poderá acontecer com o hidrogênio e com a célula a combustível? É possível afirmar que o hidrogênio e a célula a combustível promoverão uma **ruptura tecnológica**?
- 2) A célula a combustível e o hidrogênio provocariam mudanças no estilo de vida dos brasileiros em relação ao consumo de energia? Em que sentido?
- 3) A transição para a economia do hidrogênio aparece fundamentada em dois argumentos principais, **a exaustão das fontes fósseis e a descarbonização**. Em sua opinião qual dos dois será o argumento para esta transição no Brasil.
- 4) No Brasil, quais os principais **obstáculos e oportunidades** para o hidrogênio e para a célula a combustível? Comente a respeito dos principais obstáculos e oportunidades enfrentados pelas instituições que estão se inserindo nesse novo contexto econômico.
- 5) Muitos autores argumentam que existe um **gap** entre o desenvolvimento do hidrogênio e das células a combustível de modo que as células se encontrariam em um estágio bem mais avançado de desenvolvimento. O Brasil também apresenta esse gap? É possível considerar que o desenvolvimento da célula a combustível já está consolidado no país, caso contrário ainda conseguiremos competir internacionalmente em relação à célula? E o hidrogênio, qual a posição do país em comparação com a perspectiva internacional? O status do desenvolvimento deste combustível no país é compatível com o panorama internacional?
- 6) Quais os tipos de células a combustível que prevalecerão no mercado brasileiro e para quais aplicações?
- 7) O aprendizado brasileiro alcançado através do pro-álcool na década de 1970 está sendo aproveitado para a produção do hidrogênio a partir do etanol? Como o Brasil está inserindo o etanol na economia do hidrogênio? De que maneira as políticas públicas estão favorecendo a inserção do etanol?
- 8) A infra-estrutura e os problemas denominados dilemas **“chicken or egg”** requerem investimentos na cadeia produtiva para a economia do hidrogênio. No Brasil, qual dos aspectos a seguir possui os maiores problemas de desenvolvimento:
 - a) Produção do hidrogênio
 - b) Transporte
 - b) Armazenagem
 - c) Distribuição.
- 9) Agência Internacional de Energia aborda que a produção distribuída do hidrogênio está baseada na eletrólise da água ou reforma do gás, aproveitando a infra-estrutura existente para a distribuição do gás. Na produção centralizada seria necessária uma infra-estrutura para produção do hidrogênio em larga escala, incluindo dutos e(ou) transporte rodoviário. Qual das duas formas prevalecerá no Brasil? Quais as vantagens e desvantagens dessa opção? Quais os investimentos e inovações necessários na área?
- 10) Em vários momentos o Roteiro para a economia do hidrogênio aborda a necessidade de desenvolvimento de recursos humanos qualificados, o que o LACTEC tem feito a respeito? Participa de cursos de graduação e pós graduação sobre o tema?

11) O LACTEC têm participado de alguma forma da criação/implementação de um marco regulatório para disciplinar o exercício das atividades que serão objeto de regulamentação no modelo de produção, logística, comercialização e uso energético da hidrogênio?

12) Em que ano o Brasil poderá adotar efetivamente a utilização do hidrogênio como combustível e ter o seu uso comercial, assim como ocorre com o etanol e o biodiesel? Essa transição ocorrerá da mesma forma para os outros países da IPHE? Explique.

3. PROJETOS ESTRUTURANTES

1) Subprograma Etanol: Estruturação da Economia do Hidrogênio produzido a partir da Reforma do Etanol

Prazo: 15 anos - 2005 a 2020

Coordenação: MME

Neste Subprograma o MME contará com a colaboração das seguintes instituições, entre outras:

- Governo: MCT, MDIC, MMA, MF, MAPA, MT e Agências Reguladoras (ANP, ANEEL e ANTT).
- Empresas: PETROBRAS, ELETROBRAS, CHESF, COPEL, CEMIG, ELETROCELL, UNITECH, NOVOCELL.
- Universidades: UFRJ, UNICAMP, UFPR, USP, UEM, UFU.
- Associações: ÚNICA e CTC – Centro de Tecnologia Canavieira

PROJETOS ESTRUTURANTES / ETANOL

ÁREA: DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – ETANOL
Nº 1 – COMPETÊNCIAS DO BRASIL NO HIDROGÊNIO Consolidação dos resultados já alcançados em pesquisa tanto nas universidades brasileiras como nas empresas.
Nº 2 – REDES DE BASE TECNOLÓGICA EM HIDROGÊNIO Redes de Pesquisa, Desenvolvimento e Suporte Tecnológico para Formação e Consolidação de Base de Conhecimento no Brasil
Nº 3 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 4 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO/ETANOL
Nº 5 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO/ETANOL
Nº 6 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE DISTRIBUIÇÃO DE HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 7 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM SISTEMAS DE CONVERSÃO DO HIDROGÊNIO / ETANOL Células de membrana polimérica, óxido sólido e etanol direto, além do desenvolvimento de motores de combustão interna aptos a consumir hidrogênio puro ou misturado ao gás natural.
ÁREA: CONSTRUÇÃO DE PILOTOS DE DEMONSTRAÇÃO HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 8 – PILOTOS DE DEMONSTRAÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS E EQUIPAMENTOS Definir elenco de projetos piloto de demonstração
ÁREA: MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DE MERCADO – HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 9 – IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS MERCADOS POTENCIAIS PARA O USO DO HIDROGÊNIO / ETANOL Baseados na infra-estrutura instalada de produção e distribuição de etanol, nas demandas de consumidores potenciais e na projeção dos custos da tecnologia e da energia produzida

ÁREA: DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA DE BENS E SERVIÇOS – ETANOL
Nº 10 – FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS
Nº 11 – CRIAÇÃO DE BASE INDUSTRIAL DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / ETANOL Incubação de empresas e formação de parcerias estratégicas com empresas estrangeiras, interessadas em atividades relacionadas à indústria do hidrogênio produzido a partir da reforma do etanol.
Nº 12 – SISTEMAS DE CONVERSÃO DO ETANOL AO HIDROGÊNIO EM ESCALA COMERCIAL
Nº 13 – INFRA-ESTRUTURA LOGÍSTICA DO HIDROGÊNIO / ETANOL: TRANSPORTE, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO Ênfase em vasos e cilindros pressurizados sobre carretas e caminhões assim como gasodutos dedicados ao hidrogênio.
Nº 14 – PRODUÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM ESCALA COMERCIAL
Nº 15 – PRODUÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA EM ESCALA COMERCIAL Para consumir hidrogênio puro ou misturado ao gás natural.
ÁREA: CONSTITUIÇÃO DO ARCABOUÇO REGULATÓRIO PARA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 16 – ELABORAÇÃO DE MARCO REGULATÓRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / ETANOL Base legal para regulamentação da cadeia de suprimento do hidrogênio produzido a partir da reforma do Etanol
Nº 17 – ELABORAÇÃO DE NORMAS E PADRÕES DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO Rede de verificação metrológica capaz de assegurar, aos consumidores, segurança e qualidade em toda a cadeia de suprimento
ÁREA: CONSTITUIÇÃO DE LINHAS DE FINANCIAMENTO – HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 18 – AVALIAÇÃO DOS PROGRAMAS E FUNDOS EXISTENTES Ênfase nos Programas de Financiamento do Governo Federal
Nº 19 – FORMATAÇÃO DE MODELOS DE FINANCIAMENTO -ETANOL Avaliar, e se necessário desenvolver, modelos de financiamento
ÁREA: TRIBUTAÇÃO E FORMAÇÃO DE PREÇOS – HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 20 – DEFINIÇÃO DO MODELO TRIBUTÁRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 21 – DEFINIÇÃO POLÍTICA DE PREÇOS DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / ETANOL
ÁREA: MEIO AMBIENTE – HIDROGÊNIO / ETANOL
Nº 22 – ESTUDOS AMBIENTAIS PARA A CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / ETANOL

2) Subprograma Água: Estruturação da Economia do Hidrogênio produzido a partir da Eletrólise da Água

Prazo: 10 anos

Período: 2005 a 2015

Neste Subprograma o MME contará com a colaboração das seguintes instituições, entre outras:

- Governo: MCT, MDIC, MMA, MF, MAPA, MT e Agências Reguladoras (ANP, ANEEL e ANTT)
- Empresas: PETROBRAS, ELETROBRAS, ITAIPU, CEMIG, COPEL, ELETROCELL, UNITECH, NOVOCELL
- Universidades: COPPE, UNICAMP, UFPR
- Associações: ABRAGE

PROJETOS ESTRUTURANTES / ELETRÓLISE DA ÁGUA

ÁREA: DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 23 – COMPETÊNCIAS DO BRASIL NO HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA Consolidação dos resultados já alcançados em pesquisa tanto nas universidades brasileiras como nas empresas.
Nº 24 – REDES DE BASE TECNOLÓGICA EM HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA Redes de Pesquisa, Desenvolvimento e Suporte Tecnológico para Formação e Consolidação de Base de Conhecimento no Brasil
Nº 25 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 26 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 27 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 28 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE DISTRIBUIÇÃO DE HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 29 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL A PARTIR DE HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
ÁREA: CONSTRUÇÃO DE PILOTOS DE DEMONSTRAÇÃO – HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 30 – PILOTOS DE DEMONSTRAÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS E EQUIPAMENTOS Elenco de projetos piloto de demonstração a serem construídos nos 10 anos próximos. Levantamento da viabilidade técnica e custos associados à produção da energia.
ÁREA: MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DE MERCADO – HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº31 – IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS MERCADOS POTENCIAIS PARA O USO DO HIDROGÊNIO PRODUZIDO A PARTIR DA ELETRÓLISE DA ÁGUA Baseados na infra-estrutura instalada de produção e distribuição de eletricidade, na disponibilidade de energia solar e eólica, nas demandas de consumidores potenciais e na projeção dos custos da tecnologia e da energia produzida.
ÁREA: DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA DE BENS E SERVIÇOS – HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 32 – FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS
Nº 33 – CRIAÇÃO DE BASE INDUSTRIAL DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA Incubação de empresas e formação de parcerias estratégicas com empresas estrangeiras
Nº 34 – SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE EM ESCALA COMERCIAL

Nº 35 – INFRA-ESTRUTURA LOGÍSTICA DO HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA: TRANSPORTE, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO Ênfase em vasos e cilindros pressurizados sobre carretas e caminhões assim como gasodutos dedicados ao hidrogênio.
Nº 36 – PRODUÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM ESCALA COMERCIAL
Nº 37 – PRODUÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA EM ESCALA COMERCIAL Consumir hidrogênio em sistemas híbridos compostos por eletrolisador e gerador.

ÁREA: CONSTITUIÇÃO DO ARCABOUÇO REGULATÓRIO PARA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO OBTIDO PELA ELETRÓLISE DA ÁGUA
No 38 – ELABORAÇÃO DE MARCO REGULATÓRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO Base legal que permita a comercialização, o uso e o controle da qualidade do hidrogênio para uso energético e de sua mistura com o gás natural, em diferentes percentuais.
Nº 39 – ELABORAÇÃO DE NORMAS E PADRÕES DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO Rede de verificação metrológica capaz de assegurar, aos consumidores, segurança e qualidade em toda a cadeia de suprimento
ÁREA: CONSTITUIÇÃO DE LINHAS DE FINANCIAMENTO – HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 40 – AVALIAÇÃO DOS PROGRAMAS E FUNDOS EXISTENTES Ênfase nos Programas de Financiamento do Governo Federal
Nº 41 – FORMATAÇÃO DE MODELOS DE FINANCIAMENTO -ELETRÓLISE DA ÁGUA Avaliar, e se necessário desenvolver, modelos de financiamento
ÁREA: TRIBUTAÇÃO E FORMAÇÃO DE PREÇOS
Nº 42 – DEFINIÇÃO DO MODELO TRIBUTÁRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO
Nº 43 – DEFINIÇÃO POLÍTICA DE PREÇOS DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
ÁREA: MEIO AMBIENTE – HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA
Nº 44 – ESTUDOS AMBIENTAIS PARA A CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / ELETRÓLISE DA ÁGUA

3) Subprograma Gás Natural: Estruturação da Economia do Hidrogênio produzido a partir da Reforma do Gás Natural

Prazo: 5 anos

Período: 2005 a 2010

Coordenação: MME

Neste Subprograma o MME contará com a colaboração das seguintes instituições, entre outras:

— Governo: MCT, MDIC, MMA, MF, MAPA, MT e Agências Reguladoras (ANP, ANEEL e ANTT)

— Empresas: PETROBRAS, ELETROBRAS, ELETROCELL, UNITECH, NOVOCCELL (fornecedores potenciais de células a combustível)

— Universidades: COPPE, UNICAMP, UFPR, UFPE

PROJETOS ESTRUTURANTES / GÁS NATURAL

ÁREA: CONSTRUÇÃO DE PILOTOS DE DEMONSTRAÇÃO – HIDROGÊNIO/GÁS NATURAL
Nº 45– PILOTOS DE DEMONSTRAÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS E EQUIPAMENTOS Definir o elenco de projetos piloto de demonstração a serem construídos nos próximos anos
ÁREA: MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DE MERCADO – HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL
Nº 46 – IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS MERCADOS POTENCIAIS PARA O USO DO HIDROGÊNIO PRODUZIDO A PARTIR DO GÁS NATURAL Baseados na infra-estrutura instalada de produção e distribuição de gás natural, nas demandas de consumidores potenciais e na projeção dos custos da tecnologia e da energia produzida
ÁREA: DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA DE BENS E SERVIÇOS – GÁS NATURAL
Nº 47 – FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS
Nº 48 – CRIAÇÃO DE BASE INDUSTRIAL DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL Incubação de empresas e formação de parcerias estratégicas com empresas estrangeiras
Nº 49 – SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR REFORMA DO GÁS NATURAL EM ESCALA COMERCIAL
Nº 50 – INFRA-ESTRUTURA LOGÍSTICA DO HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL: TRANSPORTE, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO Infra-estrutura logística de transporte, armazenamento e distribuição de hidrogênio produzido a partir da reforma do gás natural.
Nº 51 – PRODUÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM ESCALA COMERCIAL
Com ênfase nas células de membrana polimérica e óxido sólido.
Nº 52 – PRODUÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA EM ESCALA COMERCIAL
Estruturar projetos voltados ao desenvolvimento de motores de combustão interna em escala comercial, para consumir hidrogênio puro ou misturado a outros gases.
ÁREA: CONSTITUIÇÃO DO ARCABOUÇO REGULATÓRIO PARA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO OBTIDO A PARTIR DO GÁS NATURAL
No 53 – ELABORAÇÃO DE MARCO REGULATÓRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL Base legal que permita a comercialização, o uso e o controle da qualidade do hidrogênio para uso energético e de sua mistura com o gás natural, em diferentes percentuais.
Nº 54 – ELABORAÇÃO DE NORMAS E PADRÕES DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO Rede de verificação metrológica capaz de assegurar, aos consumidores, segurança e qualidade em toda a cadeia de suprimento
ÁREA: CONSTITUIÇÃO DE LINHAS DE FINANCIAMENTO – HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL
Nº 55 – AVALIAÇÃO DOS PROGRAMAS E FUNDOS EXISTENTES Ênfase nos Programas de Financiamento do Governo Federal
Nº 56 – FORMATAÇÃO DE MODELOS DE FINANCIAMENTO -ELETRÓLISE DA ÁGUA – HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL Avaliar, e se necessário desenvolver, modelos de financiamento
ÁREA: TRIBUTAÇÃO E FORMAÇÃO DE PREÇOS – HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL
Nº 57 – DEFINIÇÃO DO MODELO TRIBUTÁRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL
Nº 58 – DEFINIÇÃO POLÍTICA DE PREÇOS DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL

ÁREA: MEIO AMBIENTE – HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL
Nº 59 – ESTUDOS AMBIENTAIS PARA A CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / GÁS NATURAL

4) Subprograma Biomassa e Processos Alternativos: Estruturação da Economia do Hidrogênio produzido a partir da Gaseificação da Biomassa e Processos Alternativos

Prazo: 20 anos

Período: 2005 a 2025

Coordenação: MME

Neste Subprograma o MME contará com a colaboração das seguintes instituições, entre outras:

- Governo: MCT, MDIC, MMA, MF, MAPA, MT e Agências Reguladoras (ANP, ANEEL e ANTT)
- Empresas: PETROBRAS, ELETROBRAS, ELETROCELL, UNITECH, NOVOCCELL
- Universidades: COPPE, UNICAMP, UFPR, UFPE

PROJETOS ESTRUTURANTES / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS

ÁREA: DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS
Nº 60 – COMPETÊNCIAS DO BRASIL NO HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS Consolidação dos resultados já alcançados em pesquisa tanto nas universidades brasileiras como nas empresas.
Nº 61 – REDES DE BASE TECNOLÓGICA EM HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS Formação de Redes de Pesquisa, Desenvolvimento e Suporte Tecnológico para Formação e Consolidação de Base de Conhecimento no Brasil considerando a busca de parcerias estratégicas no exterior.
Nº 62 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS
Nº 63 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS
Nº 64 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS
Nº 65 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D EM INFRA-ESTRUTURA DE DISTRIBUIÇÃO DE HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS
Nº 66 – CARTEIRA DE PROJETOS DE P&D PARA SISTEMAS DE CONVERSÃO HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS Os projetos estarão voltados ao desenvolvimento de células a combustível e motores de combustão interna.
ÁREA: CONSTRUÇÃO DE PILOTOS DE DEMONSTRAÇÃO – HIDROGÊNIO/ BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS
Nº 67 – PILOTOS DE DEMONSTRAÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS E EQUIPAMENTOS Definir o elenco de projetos piloto de demonstração a serem construídos nos próximos anos
ÁREA: CONSTITUIÇÃO DO ARCABUÇO REGULATÓRIO PARA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO OBTIDO A PARTIR DO GÁS NATURAL
No 68 – ELABORAÇÃO DE MARCO REGULATÓRIO DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO HIDROGÊNIO / BIOMASSA E PROCESSOS ALTERNATIVOS Base legal que permita a comercialização, o uso e o controle da qualidade do hidrogênio para uso energético e de

sua mistura com o gás natural, em diferentes percentuais.

**Nº 69 – ELABORAÇÃO DE NORMAS E PADRÕES DA CADEIA DE SUPRIMENTO DO
HIDROGÊNIO**

Rede de verificação metrológica capaz de assegurar, aos consumidores, segurança e qualidade em toda a cadeia de suprimento