



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

ALEXANDRE JOSÉ LOBATO WANGHON

ENERGIA DO HIDROGÊNIO

Palhoça

2018

ALEXANDRE JOSÉ LOBATO WANGHON

ENERGIA DO HIDROGÊNIO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade do Sul de Santa Catarina
como requisito parcial à obtenção do título
de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Djan de Almeida do Rosário, Esp.

Palhoça
2018

ALEXANDRE JOSÉ LOBATO WANGHON

ENERGIA DO HIDROGÊNIO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 07 de Novembro de 2018.



Professor e orientador Djan de Almeida do Rosário, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Prof. Fernanda Soares de Souza Oliveira, MSc.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Eng. Marcelo Oliveira Barcaro, Eng Civil
SETEP Construções S.A.

Dedico este trabalho aos meus familiares, pelo total incentivo ao longo desses anos de graduação. E também às pessoas queridas que de alguma forma contribuíram para o êxito dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Alexandre e Zuila, que não mediram esforços para me incentivar e apoiar ao longo desses 7 anos de graduação. Poder ser o segundo filho a entregar um diploma de graduação a eles é motivo de orgulho e satisfação.

À minha irmã Zuila, companheira de todas as horas, e responsável direta pelo sucesso dessa caminhada. Obrigado pela oportunidade de compartilhar momentos especiais da tua vida.

Ao meu irmão Zé e minha cunhada Caroline, pelo sentido extra que deram a minha vida, minha afilhada Juju. As dores de cabeça da faculdade eram resolvidas a cada vídeo da princesa.

Ao meu Orientador Djan e aos professores Romson e Oscar, por toda a disposição e compreensão dos problemas enfrentados ao longo desse ano. Fica minha gratidão eterna por nunca negarem apoio.

Por fim, um agradecimento especial a todos os amigos que fizeram parte dessa jornada. Foram 7 anos, 3 universidades e 3 cidades percorridas para que esse momento chegasse. Independentemente do rumo que a vida tome, foi uma etapa que valeu a pena e que guardarei com muito carinho e boas recordações.

“Não existe conquista indolor. Você escolhe os desafios e renúncias que te conduzem à prosperidade ou os prazeres medíocres e fugazes que te levarão ao fracasso” (Abel Ribeiro).

RESUMO

O aumento dos impactos ambientais resultantes da queima de combustíveis fósseis pressionou a comunidade internacional a buscar fontes energéticas renováveis e limpas. A consolidação de alternativas como as energias eólica e solar esbarraram nos obstáculos de baixa eficiência e incapacidade de armazenamento. Nesse contexto, ascendeu a cadeia energética comandada pelas células a combustível e pelo hidrogênio, o elemento mais abundante do planeta. Com eficiência semelhante aos combustíveis derivados de petróleo, mínimo impacto ambiental e vasta gama de aplicações, foram fortalecidos os esforços pela “Era do Hidrogênio”, na qual o hidrogênio substituiria o petróleo como principal vetor energético do planeta. Por meio de uma minuciosa revisão bibliográfica, esse trabalho busca apresentar essa tecnologia, com o objetivo de incentivar novos esforços acadêmicos futuros, tendo em vista que o conteúdo é pouco aprofundado na literatura brasileira. Serão apresentados os principais conceitos para o entendimento da cadeia energética do hidrogênio, bem como o seu atual estágio e as perspectivas para os próximos anos, comprovando que a energia do hidrogênio já é uma realidade e que a sua popularização é apenas uma questão de tempo.

Palavras-chave: Energia Renovável. Hidrogênio. Célula a Combustível.

ABSTRACT

The increased environmental impacts resulting from the burning of fossil fuels have pressed the international community to seek clean and renewable energy sources. The consolidation of alternatives such as wind and solar energy have hampered the obstacles of low efficiency and inability to store. In this context, it ascended the energy chain commanded by hydrogen, the most abundant element of the planet. With similar efficiency to petroleum-based fuels, minimal environmental impact and a wide range of applications, efforts were strengthened for the "Hydrogen Age", in which hydrogen would replace petroleum as the planet's main energy vector. Through a thorough bibliographical review, this work seeks to present this technology, with the aim of encouraging future academic efforts, considering that the content is not deepened in Brazilian literature. It will present the main concepts for the understanding of the hydrogen energy chain, as well as its current stage and perspectives for the coming years, proving that hydrogen energy is already a reality and that its popularization is only a matter of time.

Keywords: Renewable Energy. Hydrogen. Fuel Cell.



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA - UNISUL

ALEXANDRE WANGHON

ENERGIA DO HIDROGÊNIO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Palhoça

2018

ALEXANDRE WANGHON

ENERGIA DO HIDROGÊNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Djan de Almeida do Rosário

Palhoça
2018

ALEXANDRE JOSÉ LOBATO WANGHON

ENERGIA DO HIDROGÊNIO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 07 de Novembro de 2018.

Professor e orientador Djan de Almeida do Rosário, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Fernanda Soares de Souza Oliveira, MSc.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Eng. Marcelo Oliveira Barcaro, Eng Civil
SETEP Construções S.A.

Dedico este trabalho aos meus familiares, pelo total incentivo ao longo desses anos de graduação. E também às pessoas queridas que de alguma forma contribuíram para o êxito dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Alexandre e Zuila, que não mediram esforços para me incentivar e apoiar ao longo desses 7 anos de graduação. Poder ser o segundo filho a entregar um diploma de graduação a eles é motivo de orgulho e satisfação.

À minha irmã Zuila, companheira de todas as horas, e responsável direta pelo sucesso dessa caminhada. Obrigado pela oportunidade de compartilhar momentos especiais (e alguns nem tanto hahaha) da tua vida.

Ao meu irmão Zé e minha cunhada Caroline, pelo sentido extra que deram a minha vida, minha afilhada Juju. As dores de cabeça da faculdade eram saradas a cada vídeo da princesa.

Ao meu Orientador Djan e aos professores Romson e Oscar, por toda a disposição e compreensão dos problemas enfrentados ao longo dessa caminhada. Fica minha gratidão eterna por nunca negarem apoio.

Por fim, um agradecimento especial a todos os amigos que fizeram parte dessa jornada. Foram 7 anos, 3 universidades e 3 cidades percorridas para que esse momento chegasse. Independente de qualquer rumo que a vida tome, foi uma etapa que valeu a pena e que guardarei com muito carinho e boas recordações.

“Não existe conquista indolor. Você escolhe os desafios e renúncias que te conduzem à prosperidade ou os prazeres medíocres e fugazes que te levarão ao fracasso” (Abel Ribeiro).

RESUMO

O aumento dos impactos ambientais resultantes da queima de combustíveis fósseis pressionou a comunidade internacional a buscar fontes energéticas renováveis e limpas. A consolidação de alternativas como as energias eólica e solar esbarraram nos obstáculos de baixa eficiência e incapacidade de armazenamento. Nesse contexto, ascendeu a cadeia energética comandada pelas células a combustível e pelo hidrogênio, o elemento mais abundante do planeta. Com eficiência semelhante aos combustíveis derivados de petróleo, mínimo impacto ambiental e vasta gama de aplicações, foram fortalecidos os esforços pela “Era do Hidrogênio”, na qual o hidrogênio substituiria o petróleo como principal vetor energético do planeta. Por meio de uma minuciosa revisão bibliográfica, esse trabalho busca apresentar essa tecnologia, com o objetivo de incentivar novos esforços acadêmicos futuros, tendo em vista que o conteúdo é pouco aprofundado na literatura brasileira. Serão apresentados os principais conceitos básicos para o entendimento da cadeia energética do hidrogênio, bem como o seu atual estágio e as perspectivas para os próximos anos, comprovando que a energia do hidrogênio já é uma realidade e que a sua popularização é apenas uma questão de tempo.

Palavras-chave: Energia Renovável. Hidrogênio. Célula a Combustível.

ABSTRACT

The increased environmental impacts resulting from the burning of fossil fuels have pressed the international community to seek clean and renewable energy sources. The consolidation of alternatives such as wind and solar energy have hampered the obstacles of low efficiency and inability to store. In this context, it ascended the energy chain commanded by hydrogen, the most abundant element of the planet. With similar efficiency to petroleum-based fuels, minimal environmental impact and a wide range of applications, efforts were strengthened for the “Hydrogen Age”, in which hydrogen would replace petroleum as the planet’s main energy vector. Through a thorough bibliographical review, this work seeks to present this technology, with the aim of encouraging future academic efforts, considering that the content is not deepened in Brazilian literature. It will present the main concepts for the understanding of the hydrogen energy chain, as well as its current stage and perspectives for the coming years, proving that hydrogen energy is already a reality and that its popularization is only a matter of time.

Keywords: Renewable Energy. Hydrogen. Fuel Cell.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Repartição da oferta interna nacional de energia | 19 |
| Figura 2 – Comparação da participação das fontes renováveis na matriz energética | 20 |
| Figura 3 – Combustíveis usados pela nossa sociedade desde a Revolução Industrial, mostrando sua progressiva descarbonização e aumento no teor de hidrogênio e na densidade energética, com indicações e projeções de períodos correspondentes ao pico de utilização. | 21 |
| Figura 4 – Comparação de capacidades entre métodos de armazenamento de energia sem emissões de carbono. | 22 |
| Figura 5 – Representação do processo de hidrólise | 23 |
| Figura 6 – Cilindros contendo hidrogênio gasoso | 26 |
| Figura 7 – Número de estações de abastecimento de hidrogênio nos Estados Unidos, Europa e Ásia | 29 |
| Figura 8 – Esquema da montagem de uma célula a combustível | 30 |
| Figura 9 – Esquema de funcionamento de uma célula a combustível | 31 |
| Figura 10 – Bombeamento do gás hidrogênio | 32 |
| Figura 11 – Separação do gás hidrogênio | 32 |
| Figura 12 – Bombeamento do gás oxigênio | 33 |
| Figura 13 – Produto final do processo | 33 |
| Figura 14 – Representação de uma Pilha a Combustível | 38 |
| Figura 15 – Membros da Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio | 39 |
| Figura 16 – Membros do Conselho do Hidrogênio | 40 |
| Figura 17 – Etapas de funcionamento de um carro a hidrogênio | 45 |
| Figura 18 – Toyota Mirai sendo abastecido em um posto de hidrogênio | 47 |
| Figura 19 – Interior de um Toyota Mirai | 47 |
| Figura 20 – Principais componentes do Toyota Mirai | 48 |
| Figura 21 – Audi H-tron Quattro, SUV movido a hidrogênio | 48 |
| Figura 22 – Nissan e-Bio, movido a célula a combustível, que rodará no Brasil . | 49 |
| Figura 23 – Veículo da Nissan movido a célula a combustível sendo apresentado ao Presidente Michel Temer | 49 |
| Figura 24 – Ônibus movido a hidrogênio que circula em São Paulo | 50 |
| Figura 25 – Trem movido a célula de hidrogênio que iniciou operação na Alemanha | 51 |
| Figura 26 – Esquema do sistema de produção de “hidrogênio solar” | 53 |
| Figura 27 – Avião Helios, protótipo da NASA | 54 |
| Figura 28 – Da extração ao uso do hidrogênio como fonte energética | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação entre tipos de células a combustível | 37 |
| Tabela 2 – Recomendações para o Inventivo à Economia do Hidrogênio, segundo o CGEE | 42 |
| Tabela 3 – Diferenças entre os motores elétrico e a combustão | 58 |
| Tabela 4 – Semelhanças e diferenças entre as células a combustível e as baterias | 59 |
| Tabela 5 – Oportunidades e ameaças da opção pelo hidrogênio como principal fonte energética | 60 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|---|
| ABH2 | Associação Brasileira do Hidrogênio |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AFC | Célula a Combustível Alcalina |
| CEO | Chefe Executivo de Ofício |
| CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos |
| CH4 | Metano |
| CO2 | Dióxido de Carbono |
| DBD | Descarga de Barreira Dielétrica |
| DEFC | Célula a Combustível de Etanol Direto |
| DMFC | Célula a Combustível de Metanol Direto |
| EMTU | Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo |
| H2 | Hidrogênio |
| H2O | Água |
| IPHE | International Partnership for the Hydrogen Economy |
| LTP | Laboratório de Tecnologias a Plasma |
| MCFC | Célula a Combustível de Carbonato Fundido |
| MCT | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NUPHI | Núcleo de Pesquisa de Hidrogênio |
| O2 | Oxigênio |
| PAFC | Célula a Combustível de Ácido Fosfórico |
| PEMFC | Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PNUD | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento |

| | |
|--------|--|
| ProH2 | Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio |
| SOFC | Célula a Combustível de Óxido Sólido |
| TCC | Trabalho de Conclusão de Curso |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |
| UNISUL | Universidade do Sul de Santa Catarina |
| WHEC | Conferência Mundial de Energia do Hidrogênio |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 15 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 16 |
| 1.2.1 | Objetivos gerais | 16 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 16 |
| 1.3 | PROBLEMA DE PESQUISA | 16 |
| 1.4 | LIMITAÇÕES DE PESQUISA | 17 |
| 1.5 | METODOLOGIA DE PESQUISA | 17 |
| 1.6 | ESTRUTURA DE TRABALHO | 17 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1 | FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA | 19 |
| 2.2 | A ERA DO HIDROGÊNIO | 20 |
| 2.2.1 | Extração do Hidrogênio | 22 |
| 2.2.1.1 | Eletrólise | 23 |
| 2.2.1.2 | Reforma a vapor | 24 |
| 2.2.1.3 | Lixo Urbano | 24 |
| 2.2.1.4 | Biomassa | 24 |
| 2.2.1.5 | Pirólise a plasma | 24 |
| 2.2.1.6 | Métodos inovadores | 25 |
| 2.2.1.7 | Armazenamento de hidrogênio | 25 |
| 2.2.1.7.1 | <i>Hidrogênio gasoso</i> | 25 |
| 2.2.1.7.2 | <i>Hidrogênio líquido</i> | 26 |
| 2.2.1.7.3 | <i>Hidretos metálicos</i> | 27 |
| 2.2.2 | Vantagens da Economia do Hidrogênio | 27 |
| 2.2.3 | Infraestrutura do Hidrogênio | 28 |
| 2.3 | CÉLULA A COMBUSTÍVEL | 29 |
| 2.3.1 | Componentes de uma Célula a Combustível | 30 |
| 2.3.2 | Funcionamento de uma Célula a Combustível | 31 |
| 2.3.3 | Características de uma célula a combustível | 34 |
| 2.3.4 | Tipos de célula a combustível | 34 |
| 2.3.4.1 | PEMFC (Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons) | 34 |
| 2.3.4.2 | DMFC (Célula a Combustível de Metanol Direto) | 35 |
| 2.3.4.3 | PAFC (Célula a Combustível de Ácido Fosfórico) | 35 |
| 2.3.4.4 | SOFC (Célula a Combustível de Óxido Sólido) | 35 |
| 2.3.4.5 | MCFC (Célula a Combustível de Carbonato Fundido) | 36 |
| 2.3.4.6 | AFC (Célula a Combustível Alcalina) | 36 |
| 2.3.4.7 | DEFC (Célula a Combustível de Etanol Direto) | 36 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.5 | Pilha de Células a Combustível | 37 |
| 3 | ESFORÇOS PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ECONOMIA DO HIDROGÊNIO | 39 |
| 3.1 | PARCERIA INTERNACIONAL PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO | 39 |
| 3.2 | OUTROS ESFORÇOS INTERNACIONAIS | 40 |
| 3.3 | ESFORÇOS NACIONAIS | 40 |
| 4 | A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO NA PRÁTICA | 44 |
| 4.1 | APLICAÇÕES PARA AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL | 44 |
| 4.1.1 | Veículos movidos a hidrogênio | 44 |
| 4.1.1.1 | Automóveis | 44 |
| 4.1.1.2 | Ônibus | 50 |
| 4.1.1.3 | Aviões | 51 |
| 4.1.1.4 | Suporte industrial | 51 |
| 4.1.1.5 | Trens | 51 |
| 4.1.2 | Equipamentos portáteis | 52 |
| 4.1.3 | Geração de energia estacionária | 52 |
| 4.1.4 | Aplicação espacial | 53 |
| 4.2 | PARCERIA ENTRE CÉLULA A COMBUSTÍVEL E CÉLULA FOTO-VOLTAICA | 53 |
| 4.3 | OBSTÁCULOS PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO | 55 |
| 5 | CONCLUSÕES | 57 |
| 5.1 | RESUMO DO PROCESSO | 57 |
| 5.2 | HIDROGÊNIO VERSUS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS | 58 |
| 5.3 | CÉLULA A COMBUSTÍVEL VERSUS BATERIA | 58 |
| 5.4 | OPORTUNIDADES E AMEAÇAS | 59 |
| 5.5 | PERSPECTIVAS PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO | 60 |
| 5.6 | MELHORIAS PARA O PROCESSO | 62 |
| 5.7 | PROPOSTA DE TRABALHO PRÁTICO | 63 |
| | REFERÊNCIAS | 64 |

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país, seja ele econômico ou social, está diretamente relacionado ao seu potencial energético. Historicamente, as nações que souberam utilizar suas fontes de energia tornaram-se grandes potências mundiais. Com um desenvolvimento baseado no carvão, por exemplo, a Inglaterra liderou a Primeira Revolução Industrial. Posteriormente, com o surgimento dos motores à explosão, os Estados Unidos, a partir do aproveitamento energético do petróleo, no século XX, tornaram-se a maior potência do planeta (GOMES NETO, 2005).

Os avanços tecnológicos ao longo dos anos possibilitaram a utilização do petróleo como fonte energética nas mais diversas atividades, o que resultou em uma verdadeira corrida ao “ouro negro”, que tornou-se o principal recurso energético do mundo. Em 2015, cerca de 87% da energia consumida no mundo era resultado da queima de combustíveis fósseis derivados do petróleo (VIANA; TAVARES; LIMA, 2015). No Brasil, em 2017, esses derivados representavam 36,5% da oferta interna de energia, o dobro da segunda maior fonte, que é a biomassa de cana com 17,5% (BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (Ministério de Minas e Energias), 2017).

No entanto, o aproveitamento energético a partir do petróleo sempre esteve no centro de polêmicas e incertezas. Primeiramente, por ser um recurso natural, ele não está distribuído de maneira homogênea entre os países. Assim, a segurança energética global depende de um número reduzido de atores, que, na maioria das vezes, sobrepõem interesses próprios sobre os globais, resultando em instabilidades políticas, religiosas e econômicas. Além disso, por ser um recurso natural não-renovável, a exploração excessiva resultou em uma drástica redução das reservas de petróleo e o risco de esgotamento nas próximas décadas ligou o sinal de alerta (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2012). Se não bastassem os riscos em termos de oferta, o uso do petróleo tem encarado, cada vez mais, pressões por seu impacto ambiental na atmosfera, como a potencialização do efeito estufa. Como bem afirma Miranda (2017), “(. . .) a era do petróleo não terminará por falta dele, mas por causa dos efeitos deletérios do uso de combustíveis fósseis.” Por exemplo, de 1992 a 2017, ocorreu um aumento de 167,6% na temperatura global, com um acréscimo anual das emissões de CO₂ de 62,1% (RIPPLE et al., 2017).

O constante aumento na demanda energética global, aliado aos problemas resultantes da exploração do petróleo, fez surgir a necessidade da busca por fontes alternativas de energia, em especial fontes renováveis a um custo viável e baixo impacto ambiental (VARGAS, 2017). Como bem afirma o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento na sua Avaliação Mundial de Energia:

A energia é essencial para que se atinjam os objetivos econômicos, sociais e ambientais inter-relacionados do desenvolvimento sustentável. Mas para alcançar essa importante meta, os tipos de energia que produzimos e as

formas como os utilizamos terão de mudar. Do contrário, danos ao meio ambiente ocorrerão mais rapidamente, a desigualdade aumentará e o crescimento econômico global será prejudicado (PNUD, 2000 apud TOLMASQUIM, 2003).

O Brasil é líder mundial no uso de fontes renováveis de energia. Enquanto a média global é de 13,5%, a participação de renováveis na oferta energética brasileira é de 43,5% (BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (Ministério de Minas e Energias), 2017). Inclusive, o protagonismo brasileiro em energias limpas continua aumentando. Em 2016, por exemplo, houve um aumento de 55% na geração de energia eólica do Brasil. No entanto, ainda assim, a insegurança energética nacional é pauta constante de debates e a busca pela diversificação de fontes continua sendo um imperativo.

Esse trabalho abordará uma importante fonte renovável e limpa que tem ganhado protagonismo científico nos últimos anos, o aproveitamento energético do hidrogênio a partir de células a combustível. A chamada “Energia do Hidrogênio” é conhecida há muitos séculos, mas a sua aplicação, tanto acadêmica quanto comercial, ainda encontra-se em fase de consolidação. Assim, esse trabalho buscará apresentar os principais conceitos que envolvem essa tecnologia, bem como o atual estágio de desenvolvimento em que ela se encontra.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os impactos ambientais, sociais e econômicos gerados pela exploração dos combustíveis fósseis pressionou a comunidade mundial a buscar fontes energéticas limpas capazes de substituir o modelo energético vigente. Essa busca por alternativas energéticas sustentáveis exige uma participação acadêmica ativa. Inclusive, o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é o primeiro passo para a integração científica do aluno no caminho das pesquisas necessárias para a consolidação de novas tecnologias. Nesse sentido, buscou-se o aproveitamento desse TCC em um assunto que pudesse proporcionar um resultado efetivo, uma real contribuição para a sociedade e para o meio acadêmico.

A partir desse pressuposto, buscaram-se alternativas energéticas não convencionais e pouco aprofundadas, que pudessem colocar a Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL) como uma referência no estado, visto que fontes energética sustentáveis tradicionais, como a solar e a eólica, já estão consolidadas na estrutura das demais universidades, em especial na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Dessa forma, foi identificado o potencial do hidrogênio, encarado como o futuro energético do mundo, mas pouco estudado no Brasil.

A estrutura da UNISUL, principalmente com o Laboratório de Tecnologias a Plasma (LTP), permite um considerável aprofundamento nesse assunto. Assim, a proposta desse trabalho era aproveitar essa estrutura da universidade e fazer uma abordagem prática da teoria a ser abordada nas próximas páginas. No entanto, em

virtude de impedimentos pessoais, adaptou-se esse trabalho para uma abordagem bibliográfica, objetivando servir de base e inspiração para pesquisas futuras.

Sendo assim, esse trabalho busca apresentar a cadeia energética do hidrogênio, explicando o porquê de ele ser considerado o substituto do petróleo no futuro e apresentando o status atual dessa tecnologia nos planos internacional e nacional.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos estão descritos de forma dividida, entre os objetivos gerais e os objetivos específicos.

1.2.1 Objetivos gerais

Apresentar o estágio atual do aproveitamento do hidrogênio a partir de células a combustível, descrevendo seus tipos e suas características com base na literatura relacionada.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar os motivos da ascensão da energia do hidrogênio;
- Descrever a cadeia do hidrogênio e os seus benefícios;
- Identificar as formas de extração do hidrogênio;
- Descrever o funcionamento de uma célula a combustível;
- Comparar o modelo energético a partir de célula a combustível e hidrogênio com o modelo vigente a partir de combustíveis fósseis;
- Apresentar o estágio atual da tecnologia do hidrogênio no Brasil e os esforços nacionais para o seu desenvolvimento;
- Apresentar o estágio atual da tecnologia do hidrogênio no plano internacional e os esforços internacionais para o seu desenvolvimento;
- Buscar possíveis melhorias para a Era do Hidrogênio.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

- O atual estágio do uso do hidrogênio como fonte energética limpa está cumprindo as expectativas criadas sobre a tecnologia de ser o futuro energético sustentável do mundo?

1.4 LIMITAÇÕES DE PESQUISA

O conhecimento do hidrogênio como potencial fonte energética é antigo, porém o efetivo interesse dos estudiosos e das empresas envolvidas com energia é recente. Assim, a quantidade de obras literárias sobre o assunto é escassa, especialmente em língua portuguesa.

Os resultados das pesquisas são tão recentes que há poucos estudos realmente detalhados, na maioria dos casos, os dados foram divulgados de maneira bruta. Assim, a maior parte do conteúdo coletado para esse trabalho é parte de publicações governamentais e de publicações científicas sobre as descobertas.

1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA

A pesquisa bibliográfica presente neste trabalho aborda temas relacionados à Energia do Hidrogênio, que buscam compreender os princípios da tecnologia e entender a sua evolução, e foi realizada através de pesquisas em artigos científicos, livros, publicações governamentais e materiais disponíveis online. A pesquisa bibliográfica “é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos” (GIL, 2010).

Assim, a pesquisa realizada neste trabalho pode ser identificada como do tipo exploratória, ainda que também apresente características descritivas e explicativas. Isto porque, segundo Boente e Braga (2004), a pesquisa exploratória pode ser caracterizada como aquela que busca propiciar uma maior compreensão de um problema sobre o qual há poucas informações, assumindo, geralmente, a forma de pesquisas bibliográficas ou estudos de caso. No caso deste trabalho, a técnica utilizada é essencialmente de revisão bibliográfica.

1.6 ESTRUTURA DE TRABALHO

O trabalho será apresentado em cinco capítulos. O primeiro abordará os princípios introdutórios, como os objetivos gerais e específicos, o problema a ser solucionado, as limitações da pesquisa, a metodologia adotada e a estrutura.

O segundo capítulo apresentará os conceitos necessários para o entendimento do funcionamento da Era do Hidrogênio, a partir de uma minuciosa revisão bibliográfica. Nele, será abordada a importância da ascensão do hidrogênio como fonte energética, as formas de extração do hidrogênio, os métodos de armazenamento, os pressupostos de funcionamento das células a combustível e as diferentes tecnologias existentes.

O terceiro capítulo tratará dos esforços das comunidades internacional e nacional para a efetivação do hidrogênio como protagonista energético, tanto do ponto

de vista governamental como do civil.

O quarto capítulo trará as principais aplicações das células a combustível, exemplificando como elas têm alterado o atual modelo energético. Além disso, será apresentada a importante parceria entre as células a combustível e fotovoltaica.

O último capítulo abordará as conclusões das propostas apresentadas, por meio de comparações entre as tecnologias e de perspectivas para o futuro do tema pesquisado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

Denomina-se fonte renovável aquela capaz de produzir energia de maneira inesgotável, ou seja, que possui uma taxa de utilização menor que a sua taxa de renovação. Os principais exemplos de fontes renováveis são as energias: da biomassa, hidráulica, geotérmica, solar e eólica (TOLMASQUIM, 2003).

A matriz energética brasileira ainda é composta majoritariamente por fontes não renováveis de energia, principalmente a partir de petróleo e seus derivados. No entanto, quando realizada uma comparação com a realidade internacional, observa-se que o País possui um grande destaque com o uso de fontes energéticas renováveis em relação às demais nações, como observado nas figuras 1 e 2 (BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (Ministério de Minas e Energias), 2017).



Figura 1 – Repartição da oferta interna nacional de energia

Fonte: Adaptada de Balanço Energético Nacional (2017)

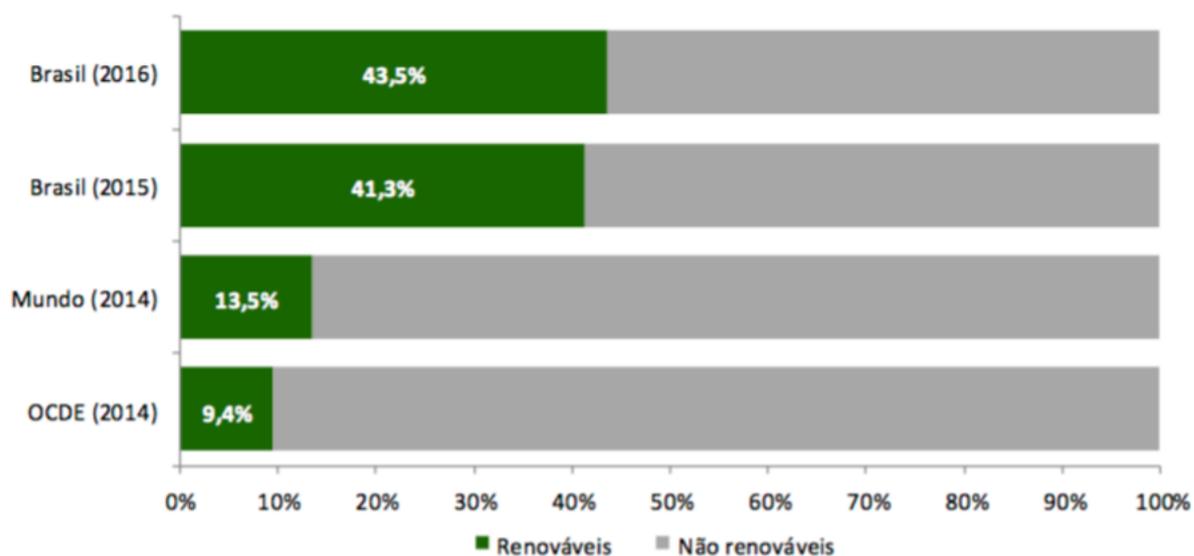


Figura 2 – Comparação da participação das fontes renováveis na matriz energética

Fonte: Adaptada de Balanço Energético Nacional (2017)

Na constante busca por alternativas renováveis e sustentáveis de energia, um recurso natural em especial tem chamado a atenção de pesquisadores, empresários e governos, o hidrogênio. Os avanços tecnológicos das últimas décadas possibilitaram que o hidrogênio, o elemento mais simples e abundante do universo, fosse utilizado como fonte energética, inaugurando a chamada “Era do Hidrogênio” ou “Economia do Hidrogênio” (KENSKI, 2016). Neste paradigma econômico, o hidrogênio substituiria o petróleo como principal vetor energético do planeta.

2.2 A ERA DO HIDROGÊNIO

Seja por comodidade, seja por preocupação ambiental, a evolução da humanidade tem passado pelo Processo de Descarbonização (figura 3), que é o aumento da quantidade de moléculas de hidrogênio em relação ao carbono nas alternativas energéticas. Na lenha, por exemplo, a relação é de 10 átomos de carbono para 1 de hidrogênio. No carvão, é de 2 de carbono para 1 de hidrogênio. Já no petróleo, a proporção de hidrogênio já é o dobro da de carbono, o que lhe confere uma consistência líquida. A etapa seguinte da descarbonização foi o gás natural, também conhecido como metano (CH_4), com a relação de 4 átomos de hidrogênio para 1 de carbono (MIRANDA, 2013). Assim, a etapa atual consiste na utilização de hidrogênio puro para produção de energia. Isso significa que cada fonte sucessiva de energia emite menos CO_2 que sua predecessora.

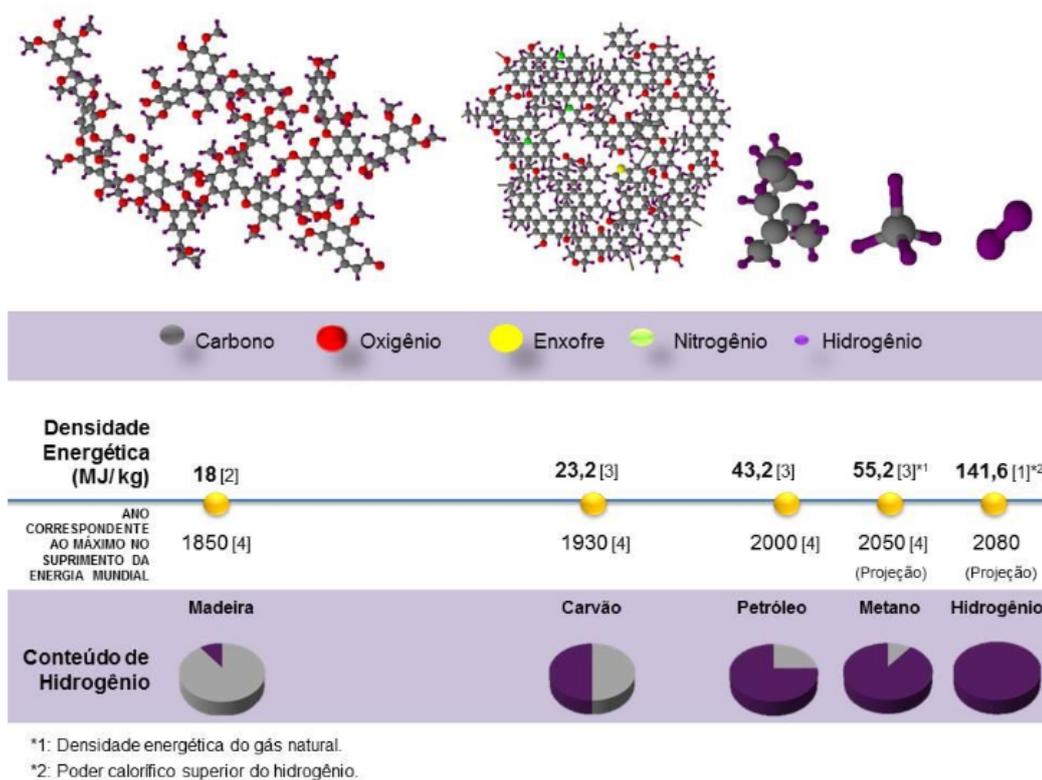


Figura 3 – Combustíveis usados pela nossa sociedade desde a Revolução Industrial, mostrando sua progressiva descarbonização e aumento no teor de hidrogênio e na densidade energética, com indicações e projeções de períodos correspondentes ao pico de utilização.

Fonte: Miranda (2013)

Segundo afirma Rifkin (2003), o hidrogênio é encarado como a grande solução sustentável para o avanço contínuo da humanidade na Terra, pois pode substituir o petróleo sem decréscimo de capacidade energética ou grandes modificações de tecnologias existentes na geração de energia. “Ele é a mais leve e mais imaterial de todas as formas de energia e a mais eficiente quando queimada”. Em discurso para o Comitê de Ciências da Casa de Representantes dos Estados Unidos, o executivo da petrolífera Texaco, Frank Ingriselli (2001 apud RIFKIN, 2003, p. 182), afirmou que:

[...] o verde, a inovação e as forças do mercado estão moldando o futuro de nossa indústria, propulsionando-nos inexoravelmente rumo à energia do hidrogênio [...] arrependimento daquele que não a acompanhar.

Além disso, o hidrogênio pode ser interpretado como a solução para um dos grandes problemas enfrentados pelas fontes de energia renovável, que é o armazenamento de energia. Isso ocorre pois a energia gerada atualmente deve ser consumida imediatamente, visto que decorre de um processo momentâneo, como o sol brilhando, o vento soprando ou a água fluindo. Assim, o hidrogênio torna-se um meio muito atrativo e interessante de armazenamento desse potencial energético (NASTARI EDITORES, 2018).

O hidrogênio é um vetor energético. Trata-se de um portador de energia versátil, limpo e seguro, que pode ser usado para produzir eletricidade, calor, potência e ainda encontra aplicação como matéria prima na indústria. O hidrogênio pode ser armazenado e transportado com alta densidade energética nos estados líquido ou gasoso (...) (MIRANDA, 2017)

Dentre todas as opções de armazenamento de energia sem emissões de carbono, o hidrogênio representa a de maior viabilidade comercial, tendo em vista que consegue aliar alta potência e durabilidade prolongada de uso, como mostra a figura 4 abaixo (HYDROGEN COUNCIL, 2017a).



Figura 4 – Comparação de capacidades entre métodos de armazenamento de energia sem emissões de carbono.

Fonte: Hydrogen Council (2017)

Segundo afirma Hoffmann (2012), autor de uma das obras referências sobre o uso do hidrogênio, o livro *Tomorrow's Energy*, é inevitável o futuro energético baseado no hidrogênio. “A não ser que apareça uma enorme revolução tecnológica nos próximos anos, o hidrogênio é o único combustível capaz de resolver esses problemas [ambientais, sociais e econômicos]”.

2.2.1 Extração do Hidrogênio

Ainda que componha 75% da massa do universo e 90% de suas moléculas, raramente o hidrogênio é encontrado sozinho na natureza. Geralmente, ele está na composição química dos elementos, como na água, nos combustíveis fósseis, no lixo orgânico e nos produtos plásticos. Dessa forma, é necessário que ele seja extraído

e separado dos demais elementos para que seja usado na geração de eletricidade a partir de células a combustível (RIFKIN, 2003). A seguir, estão os principais métodos de extração do hidrogênio.

2.2.1.1 Eletrólise

Produzir hidrogênio a partir de eletrólise consiste na separação da molécula de água em seus constituintes (hidrogênio e oxigênio) a partir da aplicação de energia elétrica, geralmente em valor maior que 1,23 volts (GOMES NETO, 2005). Conforme Rifkin explica o processo (2003):

Dois eletrodos, um positivo e outro negativo, são submergidos em água pura, à qual se deu maior condutibilidade pela adição de um eletrólito. Quando a eletricidade – a corrente contínua – é aplicada, o hidrogênio borbulha em direção ao eletrodo de carga negativa (o cátodo), e o oxigênio rumo ao eletrodo de carga positiva (o ânodo) (Rifkin, 2003)

Ainda que seja uma das maneiras mais simples e limpas de extração de hidrogênio, apenas 4% do hidrogênio mundial é produzido dessa forma (HYDROGEN COUNCIL, 2017a). Isto porque o custo da eletricidade necessária encarece o processo – a eletricidade pode custar de três a quatro vezes mais que o gás natural reformado a vapor. No entanto, nos últimos anos, os desenvolvimentos científicos e tecnológicos tem caminhado para a utilização da eletrólise conjuntamente com outras fontes renováveis de produção de energia, como a eólica, fotovoltaica e hidrelétrica. Assim, o barateamento da produção de hidrogênio a partir da eletrólise (figura 5) já é uma realidade e tende a aumentar o uso desse processo (SANTOS JUNIOR, 2004).

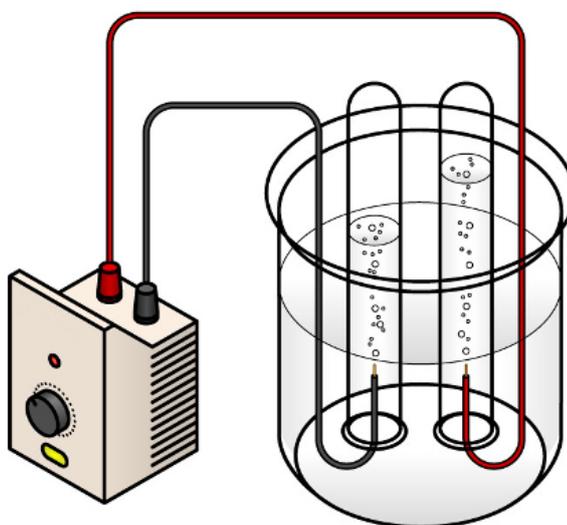


Figura 5 – Representação do processo de hidrólise

Fonte: Santos Junior (2004)

2.2.1.2 Reforma a vapor

Segundo Miranda (2017), a maior parte das 60 milhões de toneladas de hidrogênio consumidas a cada ano no mundo é produzida a partir da reforma a vapor do metano, sendo assim a forma de extração mais usada e mais econômica atualmente. Consiste no processo que submete o gás natural a grandes temperaturas, reagindo com o vapor em um transformador catalítico, extraindo o hidrogênio e produzindo dióxido de carbono (CO₂) como subproduto. Dessa forma, ainda que seja a maneira mais barata e mais comum de produção de hidrogênio, essa não é uma maneira limpa, contribuindo para grandes impactos ambientais. Inclusive, esse sempre foi o grande desafio e objetivo da Era do Hidrogênio: a produção da molécula do hidrogênio a partir de processos limpos, que não agridam o meio ambiente (TOLMASQUIM, 2003).

No entanto, a utilização de gás natural continuará sendo uma realidade durante as próximas décadas e os cientistas vêm pesquisando formas de limpar seus impactos ambientais (BRASIL. Ministério das Relações Exteriores, 2011). Assim, existem os defensores da utilização da reforma a vapor a partir de um processo que recolheria o dióxido de carbono e o depositaria em depósitos subterrâneos, como em campos esgotados de petróleo (SILVA, 2017a). O fortalecimento dessa tecnologia manteria a reforma a vapor como a maneira mais eficiente e viável de produção de hidrogênio.

2.2.1.3 Lixo Urbano

A decomposição do lixo urbano em aterros sanitários resulta na produção de, dentre outros gases, gás metano (CH₄), rico em hidrogênio. A reforma a vapor desse gás, além de resultar na produção de hidrogênio, impede que ele cause problemas de ordem ambiental, como o efeito estufa.

2.2.1.4 Biomassa

Sendo o Brasil um dos principais países que utilizam a biomassa (bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo) como fonte energética renovável, ela torna-se também um importante exemplo de extração de hidrogênio (GUERRA; YOUSSEF, 2012).

Para a produção de hidrogênio, essa biomassa deve ser transformada em biogás, que posteriormente será filtrado.

2.2.1.5 Pirólise a plasma

É uma das formas mais limpas de produção de hidrogênio, visto que não há emissão de gases como o dióxido de carbono. Nesse processo, há a aplicação de

um arco elétrico em um hidrocarboneto gasoso, como o gás natural, resultando na separação de hidrogênio e carbono puros.

2.2.1.6 Métodos inovadores

Além do uso de tecnologias já consolidadas para a extração do hidrogênio, como as citadas anteriormente, há de se destacar propostas inovadoras que cada vez mais são aprofundadas por pesquisadores e cientistas. Por exemplo, existem estudos com algas e bactérias com capacidade de fotossíntese, tendo o hidrogênio como subproduto do processo. A partir dessa habilidade, os pesquisadores trabalham para conseguir manipular esses seres para que produzam hidrogênio de forma controlada e em escala industrial.

2.2.1.7 Armazenamento de hidrogênio

Como o hidrogênio é um dos elementos com menor densidade na natureza, apresentando uma molécula muito pequena, que pode escapar dos tanques de armazenamento mais facilmente, a sua estocagem sempre esteve no cerne das pesquisas. Outrossim, por ser um elemento altamente inflamável, houve a necessidade de um cuidado maior na busca de meios de armazená-lo de maneira segura e efetiva (DUNN, 2001).

Se não bastassem as questões de segurança, outra preocupação é a capacidade de armazenamento. Isso porque é necessária uma autonomia considerável para que a tecnologia seja comercialmente viável para uso em veículos, e em aplicações portáteis, estacionárias e espaciais (PADRÓ; LAU, 2002).

Assim, as maneiras mais utilizadas para estocar hidrogênio são nas formas gasosa e líquida. Quando em forma de gás, faz-se mister um sistema de armazenamento de grande pressão. Já em forma líquida, em virtude do seu baixíssimo ponto de ebulição ($-252,8^{\circ}\text{C}$), é necessário um sistema criogênico (com baixíssima temperatura: -253°C) (VIOLA, 2017). Porém, devido às particularidades já mencionadas sobre o hidrogênio, os estudos vêm buscando maneiras alternativas e complementares de armazenamento, como os hidretos metálicos.

2.2.1.7.1 Hidrogênio gasoso

Os sistemas de armazenamento de hidrogênio comprimido à alta pressão são os mais comuns e aprimorados. Grande parte dos veículos movidos por célula a combustível utiliza cilindros (figura 6) para armazenar este combustível (GOMES NETO, 2005).

O desafio atual é diminuir o volume e o peso dos cilindros, e paralelamente aumentar a capacidade de armazenamento, o que exige um aumento considerável da pressão interna do sistema. Assim, as pesquisas buscam materiais mais resistentes e adequados para a composição dos tanques de armazenamento. O destaque fica por conta das fibras de carbono ultra-resistentes, que chegam a ser 5 vezes mais leves e resistentes que os cilindros de metal (MOREIRA et al., 2013).

Os riscos de segurança relacionados à alta pressão envolvida, outrora existentes, não mais representam uma ameaça ao desenvolvimento da tecnologia, pois os cilindros de alta pressão têm uma estatística de segurança excelente.

No entanto, o ponto negativo relacionado à compressão do hidrogênio é o grande consumo de energia utilizado no processo. Em um momento em que a sociedade busca maneiras cada vez mais sustentáveis e limpas para a utilização dos recursos, o uso excessivo de energia para o início do processo de compressão reforça a busca de novas alternativas para o armazenamento de hidrogênio.



Figura 6 – Cilindros contendo hidrogênio gasoso

Fonte: Rosa (2017)

2.2.1.7.2 Hidrogênio líquido

Para evitar a necessidade de altas pressões no armazenamento de gás comprimido, há a possibilidade de armazenar o hidrogênio sob a forma líquida. Inclusive, essa alternativa apresenta maior capacidade de armazenamento que a opção gasosa, o que resulta em maior autonomia energética e maior economia no transporte.

O grande problema dessa forma de armazenamento é a necessidade de manutenção em baixíssima temperatura (-253°C), o que exige um grande gasto

energético e um elaborado sistema de isolamento que impeça a troca de calor entre o tanque e o meio ambiente.

2.2.1.7.3 Hidretos metálicos

Diversas ligas metálicas possuem a capacidade de absorver o gás hidrogênio, semelhante ao caso de uma esponja absorvendo água. Sob alta pressão, o hidrogênio se mistura ao metal, formando uma estrutura sólida conhecida como hidreto metálico (BUSTAMANTE, 2005).

Esse é um processo altamente seguro, visto que a incidência de alta pressão ocorre apenas no processo de mistura dos elementos, podendo a estrutura com hidrogênio ser mantida sob pressão ambiente, posteriormente. A liberação do hidrogênio como fonte energética ocorre a partir do aquecimento do hidreto metálico.

O principal desafio dessa tecnologia era o grande peso e volume do composto metálico, o que interferia na sua capacidade de armazenamento (CABRAL et al., 2014). No entanto, estudos recentes destacam o hidreto a base de magnésio como a forma mais eficiente de armazenamento de hidrogênio, visto que possui alta capacidade de armazenamento, elevada resistência à contaminação do ar, além de peso e custo mais baixos que outros hidretos (CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO, 2018a).

2.2.2 Vantagens da Economia do Hidrogênio

A utilização do hidrogênio como fonte energética, a partir das células a combustível, resulta em benefícios de ordens ambiental, social e econômico. Tendo a água como resíduo descartável final, suplanta-se os riscos de contaminação de rios, mares e lençóis freáticos com derramamento de combustíveis poluidores. Do escapamento dos veículos sairia apenas vapor de água, reduzindo a poluição do ar. Outro benefício é a segurança em caso de vazamento, pois o hidrogênio não entra em combustão ao ar livre, visto que é mais leve que o ar e por isso dispersa facilmente.

Além dos ganhos ambientais, há que se identificar os ganhos em eficiência e economia, e a redução da dependência energética da importação de petróleo. Ademais, a adoção dessa tecnologia abre um novo horizonte para o desenvolvimento industrial de países em desenvolvimento, uma verdadeira oportunidade de mercado para fabricantes de componentes, integradores de sistemas, fornecedores, comerciantes e empresas de manutenção.

Dessa forma, pode-se listar como os principais benefícios da Economia do Hidrogênio:

- Redução da emissão de poluentes na atmosfera;

- Redução do lixo tóxico causado pelas pilhas e baterias;
- Redução da contaminação dos lençóis freáticos;
- Redução da poluição sonora, visto que a operação das células a combustível ocorre silenciosamente;
- Crescimento econômico e criação de empregos em diversas áreas, devido à abrangência multidisciplinar (Engenharias: Elétrica, Química, Civil, Mecânica e Ambiental; Física; Biologia; Informática);
- Melhor eficiência;
- Segurança energética, visto que a existência de hidrogênio em grande parte das matérias permite que cada região faça uso de suas fontes locais;
- Aproveitamento do excedente energético produzido por fontes renováveis, como eólica, solar e hidrelétrica;
- Possibilidade de distribuir energia limpa entre diferentes regiões. Por exemplo, o Japão possui poder econômico, mas sua posição geográfica impede a geração de energia eólica e solar em grande escala. Assim, importar esse potencial energético de países melhores posicionados geograficamente, a partir do hidrogênio gerado, seria mais viável;
- Centrais de produção de hidrogênio podem ser implementadas junto aos pontos de fornecimento, reduzindo os custos e as perdas energéticas do transporte;
- Recurso ilimitado.

2.2.3 Infraestrutura do Hidrogênio

O já conhecido potencial energético do hidrogênio, principalmente como combustível automobilístico, encontra barreiras na falta de infraestrutura que possa atender a demanda. A baixa incidência de estruturas de abastecimento com hidrogênio, por exemplo, impede uma produção em massa de automóveis dotados dessa tecnologia. Entretanto, essa realidade vem sendo alterada, especialmente na Europa, Japão e Estados Unidos, onde governos, montadoras de automóveis e empresas de energia estão investindo bilhões de dólares na busca de soluções que possibilitem a consolidação dessa infraestrutura.

Na figura 7 abaixo, produzida a partir de relatório apresentado pelo Hydrogen Council em 2017, aparecem as quantidades de postos de abastecimento de hidrogênio existentes em 2016 e as perspectivas para 2020 e 2025.

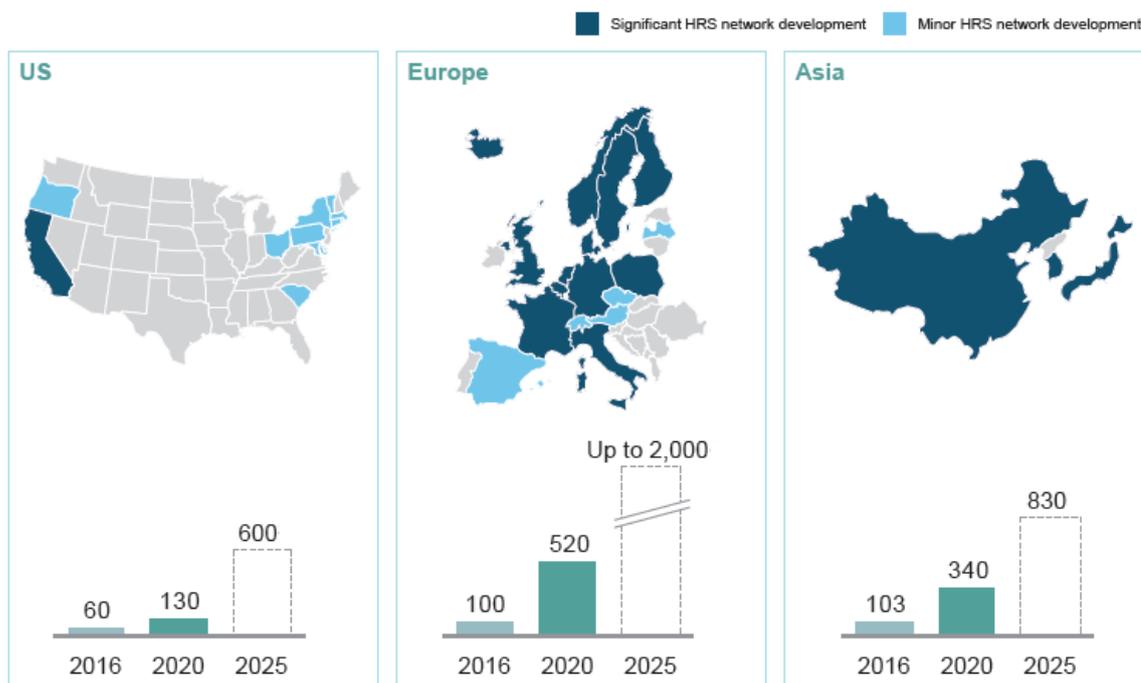


Figura 7 – Número de estações de abastecimento de hidrogênio nos Estados Unidos, Europa e Ásia

Fonte: Hydrogen Council (2017)

2.3 CÉLULA A COMBUSTÍVEL

A busca por alternativas energéticas não resume-se apenas à descoberta de novas fontes, mas abrange também avanços tecnológicos que resultem em equipamentos mais eficientes, que utilizem menos combustível, e com menores impactos ambientais. Nesse contexto, inserem-se as células a combustível, o equipamento capaz de utilizar o hidrogênio como fonte energética limpa, convertendo energia química em energia elétrica. Como destaca Gomes Neto (2005, p. 51), “a célula a combustível é capaz de produzir energia com alta eficiência, silenciosamente [...], emitindo na atmosfera apenas vapor d’água quando utiliza o hidrogênio puro”.

Desenvolvida em 1839 pelo físico inglês William Grove, a célula a combustível é uma tecnologia que aplica o princípio inverso da hidrólise, utilizando a combinação química entre um combustível (geralmente o hidrogênio) e o oxidante (o gás oxigênio) para gerar energia elétrica, calor e água (LINARDI, 2010).

Assim, pode-se perceber que a tecnologia das células a combustível é conhecida há muito tempo, porém, com o apogeu da economia do petróleo, ela foi relegada a segundo plano. Com os impactos ambientais que passaram a acometer a sociedade e com o fortalecimento da preocupação com a preservação do meio ambiente, as pesquisas com as células foram reativadas (HYDROGEN COUNCIL, 2017a).

Estudos do Departamento de Energia dos Estados Unidos mostram que o custo das células a combustível no país reduziu de 275 dólares por quilowatt em 2002 para 52 dólares por quilowatt em 2016, enquanto a durabilidade das mesmas quadruplicou nesse mesmo período. Essa redução de valor foi possível, principalmente, pela diminuição da quantidade de platina (metal nobre e raro) utilizada no sistema (ESTADOS UNIDOS. Departamento de Energia, 2016).

2.3.1 Componentes de uma Célula a Combustível

Didaticamente, é possível detalhar a célula a combustível como um sanduíche, como mostra a figura 8 abaixo. Ela é formada por fatias, cada qual com uma função específica no funcionamento da célula.

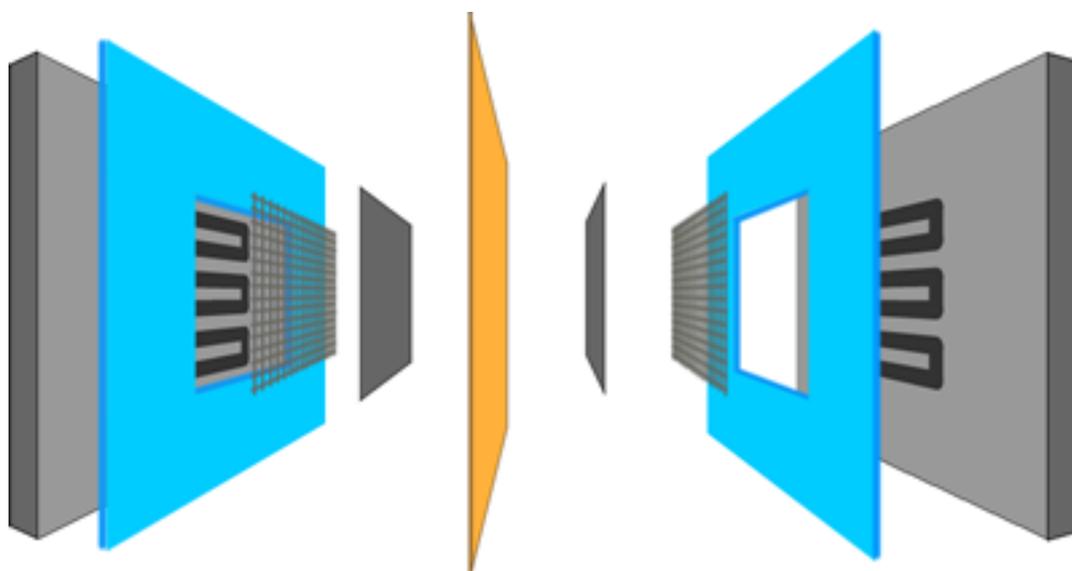


Figura 8 – Esquema da montagem de uma célula a combustível

Fonte: Stefanelli (2017)

As partes de uma célula a combustível (figura 9) são:

- 1) Eletrodo do Hidrogênio (Ânodo): placa porosa pela qual ocorre a entrada e a passagem do gás hidrogênio para dentro do sistema. Ele é o terminal negativo, chamado de ânodo.
- 2) Eletrodo do Oxigênio (Cátodo): placa porosa pela qual ocorre a entrada e a passagem do gás oxigênio para dentro do sistema. Ele é o terminal positivo, chamado de cátodo.
- 3) Eletrólito: parte responsável por forçar a passagem dos elétrons por um circuito elétrico externo. Isso porque o eletrólito, que pode ser líquido ou gasoso, tem a propriedade de permitir movimento aos prótons (H^+), mas impedir a passagem dos elétrons por meio dele.

- 4) Catalisador: parte do sistema que cobre o eletrólito e que tem a função de acelerar as reações e quebrar as moléculas de hidrogênio (H_2) em íons H^+ e elétrons. O principal exemplo de catalisador é a platina;

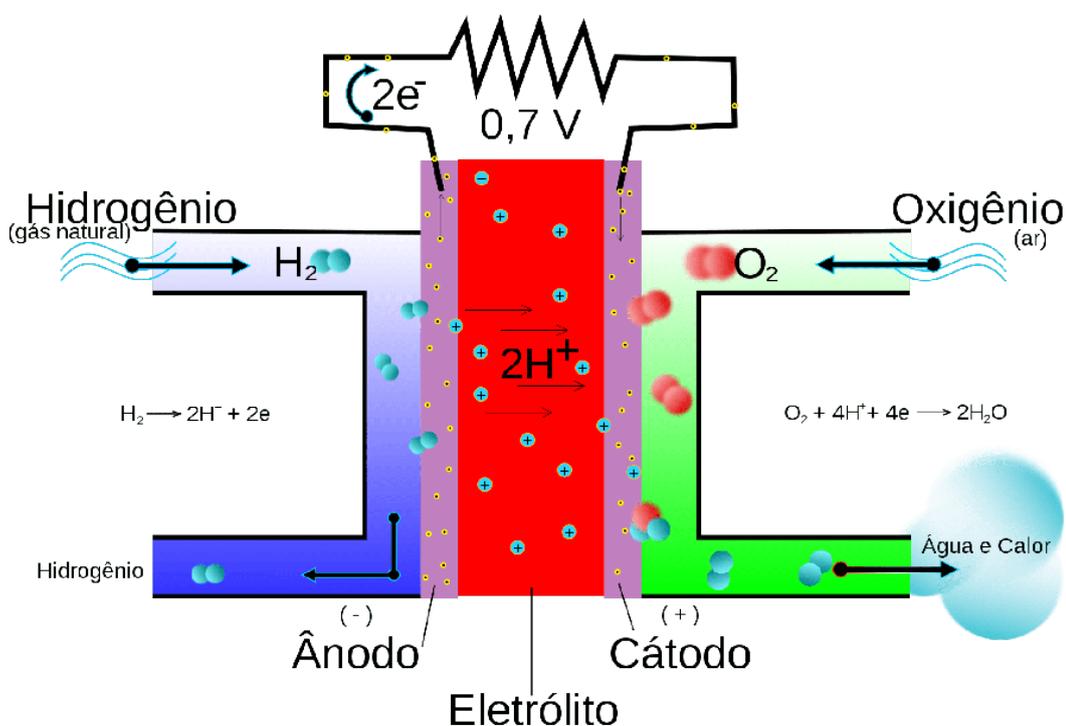


Figura 9 – Esquema de funcionamento de uma célula a combustível

Fonte: Caram (2015)

2.3.2 Funcionamento de uma Célula a Combustível

Para o correto aproveitamento do hidrogênio como fonte energética, a célula a combustível necessita que de um lado entre o hidrogênio e do outro entre o oxigênio. No meio, entre os eletrodos, existem o eletrólito e o catalisador, que são a lógica de todo o funcionamento da estrutura (RODRIGUES, 2010). A seguir, está um passo a passo do processo:

- 1) Inicialmente, a célula a combustível recebe de um lado o hidrogênio, comprimido em direção ao terminal negativo do eletrodo, conhecido como ânodo, como mostra a figura 10 abaixo. Sendo essa uma região porosa, o gás hidrogênio é induzido a percorrer os canais desses poros até chegar ao catalisador;

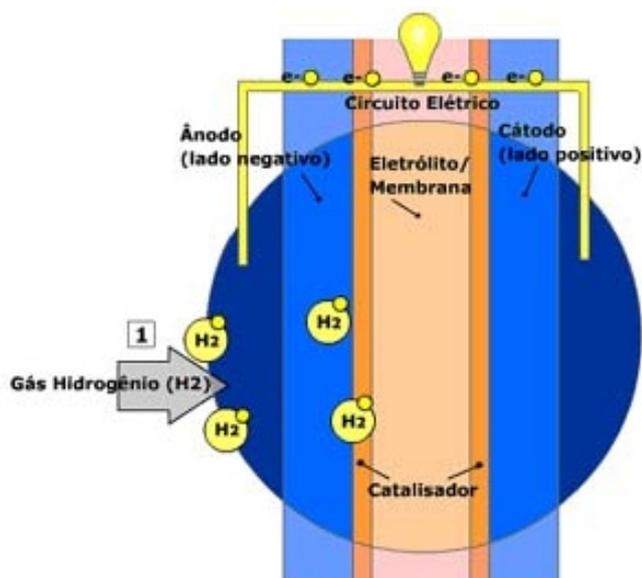


Figura 10 – Bombeamento do gás hidrogênio

Fonte: Gomes Neto (2005)

2) Ao entrar em contato com o catalisador, a partícula de hidrogênio é dividida em dois íons de hidrogênio (H^+) e dois elétrons (e^-) (figura 11);

3) Esses elétrons produzidos não conseguem penetrar no eletrólito, sendo induzidos pelo sistema a chegar ao circuito elétrico, ocorrendo o fluxo de elétrons - a corrente elétrica - em direção ao eletrodo positivo. A corrente elétrica produzida é a fonte responsável pelo funcionamento de um motor elétrico, por exemplo;

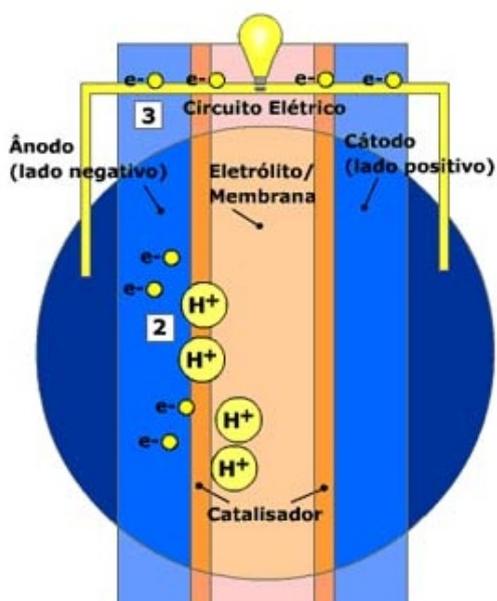


Figura 11 – Separação do gás hidrogênio

Fonte: Gomes Neto (2005)

4) Na entrada oposta da célula a combustível, ocorre o bombeamento de gás oxigênio (O_2) em direção ao terminal positivo do eletrodo, o cátodo. Semelhante ao que ocorre com o hidrogênio, as moléculas de oxigênio são induzidas a percorrer os canais dos poros até chegar ao catalisador, onde ocorre a separação da molécula de oxigênio (O_2) em dois átomos de oxigênio (O^-), que vão atrair os íons de hidrogênio (figura 12).

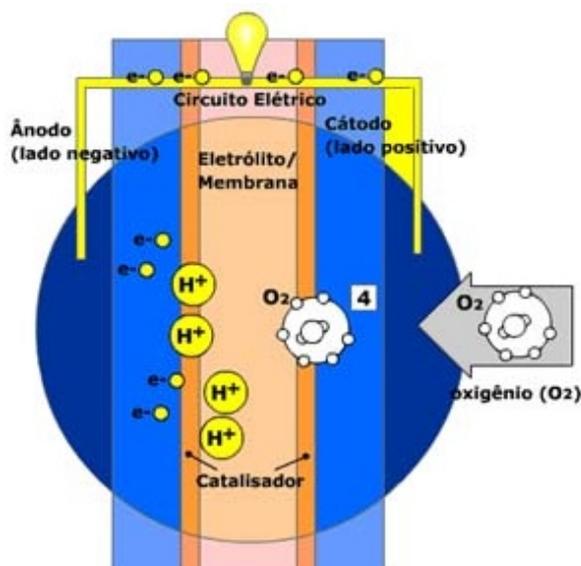


Figura 12 – Bombeamento do gás oxigênio

Fonte: Gomes Neto (2005)

5) No catalisador do lado positivo, ocorre a combinação dos átomos de oxigênio com os íons H^+ que penetraram pelo eletrólito e com os elétrons provenientes do circuito elétrico. Dessa combinação, há a formação da molécula de água e liberação de calor (vapor de água), como mostra a figura 13 abaixo.

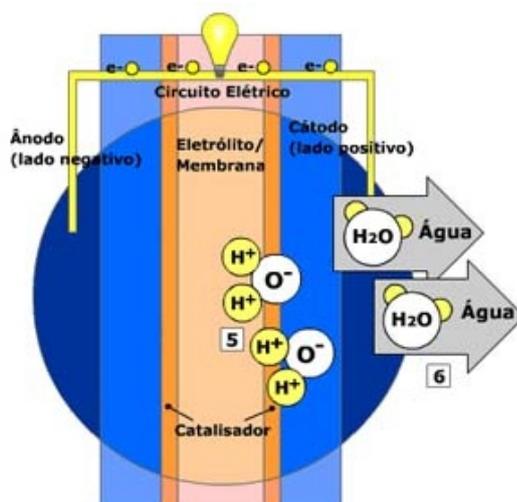


Figura 13 – Produto final do processo

Fonte: Gomes Neto (2005)

2.3.3 Características de uma célula a combustível

- Alta eficiência;
- Ausência de emissão de gases poluentes, quando abastecida com hidrogênio puro;
- Segundo Hydrogen Council (2017), ainda que o hidrogênio seja obtido a partir de fontes não renováveis como o petróleo, a emissão de gases poluentes cai de 25 a 50%, e a fumaça gerada, quando comparada com equipamentos tradicionais, reduz em até 98%;
- O subproduto do processo, o vapor de água (calor + água), pode ser utilizado para aquecimento ou ainda para produzir mais eletricidade ao alimentar uma microturbina a vapor (cogeração);
- Em média, 25% mais eficiente que motores à combustão

2.3.4 Tipos de célula a combustível

Ainda que exista um modelo básico de funcionamento das células a combustível com eletrodos, eletrólitos e catalisadores, há diferentes tecnologias capazes de replicar o processo. A diferença entre elas diz respeito aos materiais utilizados como eletrólito (membrana), à possibilidade de utilizar um combustível diferente do hidrogênio puro e à diferença de temperatura em que cada uma consegue operar, identificando assim as mais indicadas para cada tipo de aplicação, como mostra a tabela 1. Essas tecnologias, no geral, se assemelham ao funcionamento do principal tipo que é a PEMFC (ALDABÓ, 2004).

2.3.4.1 PEMFC (Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons)

É a tecnologia mais consolidada, principalmente em automóveis, aparelhos portáteis e para geração de energia em residências. No cerne do sistema, no eletrólito, a célula conta com uma membrana plástica, sólida, que tem a capacidade de transportar as cargas positivas quando está úmida (VILLULLAS; TICIANELLI; GONZÁLEZ, 2002).

A PEMFC opera em baixas temperaturas, entre 60 e 140°C, o que a torna viável para uso em veículos, já que o início de funcionamento da célula a combustível é mais rápido que em outras tecnologias.

O grande obstáculo para a consolidação e disseminação desse tipo é a necessidade do uso da platina como catalisador, pois em baixas temperaturas as reações são mais lentas sendo necessário um excelente catalisador para acelerar o

processo. Assim, ocorre o encarecimento da tecnologia, visto que a platina é um metal nobre, raro e caro.

2.3.4.2 DMFC (Célula a Combustível de Metanol Direto)

Bastante similar à Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons, essa tecnologia se diferencia principalmente pelo uso do metanol (CH_3OH) diluído em água como combustível ao invés de hidrogênio puro. Além disso, sua temperatura de funcionamento fica entre 50 e 200°C.

Esta tecnologia não é viável para uso em veículos pois, no final do processo, ocorre a formação de dióxido de carbono (CO_2), responsável por inúmeros problemas ambientais. Ela é a preferida para uso em equipamentos portáteis, como celulares, laptops e câmeras digitais, visto que o subproduto, em menor quantidade, pode ser coletado na própria estrutura. O metanol utilizado fica armazenado em cartuchos que podem ser trocados ou reabastecidos com este combustível diluído em água.

2.3.4.3 PAFC (Célula a Combustível de Ácido Fosfórico)

Como o próprio nome diz, a substância utilizada como eletrólito da célula é o ácido fosfórico líquido. Essa é a tecnologia mais disseminada para a geração de energia estacionária, sendo aplicada em hospitais, escolas, aeroportos, centros comerciais e estações de tratamento esgoto. Inclusive, os estudos práticos realizados pelas universidades brasileiras, como a Universidade Federal do Paraná, fazem uso de exemplares da PAFC.

Ela possui em sua estrutura um reformador capaz de extrair hidrogênio de diferentes combustíveis e um purificador capaz de eliminar excessos de impurezas. Dessa forma, essa célula a combustível pode ser abastecida por diferentes combustíveis, como o gás natural.

2.3.4.4 SOFC (Célula a Combustível de Óxido Sólido)

Essa tecnologia apresenta funcionamento diferente das citadas anteriormente, pois seu funcionamento ocorre a altas temperaturas, entre 600 e 1000°C. A vantagem em operar em altíssima temperatura é a possibilidade de empregar materiais mais baratos, como o níquel, na estrutura dos catalisadores. Isso porque a temperatura elevada já acelera as reações químicas, sendo desnecessário um catalisador nobre como a platina. Além disso, as altas temperaturas também funcionam como reformadores dos combustíveis, abrindo a possibilidade de alimentar a célula com gás natural e etanol.

A célula recebe esse nome pois seu eletrólito é formado por um material cerâmico e sólido, feito geralmente de óxido de zircônio e de ítrio.

2.3.4.5 MCFC (Célula a Combustível de Carbonato Fundido)

Semelhante ao tipo anterior, essa tecnologia funciona a altas temperaturas (entre 600 e 800°C), descartando a necessidade de uso de um catalisador caro e de reformadores. O eletrólito é formado por carbonato fundido, que são sais como o carbonato de sódio, lítio ou potássio, que se fundem (ficam no estado líquido) em altas temperaturas.

Devido às altas temperaturas envolvidas, a MCFC é flexível quanto aos combustíveis, suportando por exemplo gás natural, biogás e etanol. Outro benefício do seu funcionamento em temperaturas elevadas diz respeito à eficiência do sistema, podendo alcançar 85% de eficiência total.

2.3.4.6 AFC (Célula a Combustível Alcalina)

Utilizando uma solução alcalina e aquosa de hidróxido de potássio, essa é a tecnologia mais utilizada pela NASA em aplicações espaciais. Uma de suas principais vantagens é a utilização de materiais de baixo custo. No entanto, apresenta como grande ponto negativo a necessidade de utilização de hidrogênio e oxigênio extremamente puros. Pois caso o hidróxido de potássio reaja com impurezas, como o monóxido de carbono (CO), haverá a formação de carbonatos (sais insolúveis em água), dificultando a locomoção dos íons pelo eletrólito.

2.3.4.7 DEFC (Célula a Combustível de Etanol Direto)

Diferentemente de todos os casos anteriores, essa tecnologia é abastecida, exclusiva e diretamente, por etanol (que possui hidrogênio na sua composição), não sendo necessário que o combustível seja reformado previamente. O grande problema é a baixa eficiência desse processo, representando metade da eficiência de uma célula alimentada por hidrogênio puro. No entanto, os avanços dos estudos que possibilitem o aumento dessa eficiência possibilitarão que essa seja a principal opção de célula a combustível, visto que poderá ser aproveitada a infraestrutura já existente para produção, transporte e fornecimento de etanol nos postos de combustíveis.

Inclusive, essa deve ser a principal tecnologia a se consolidar no Brasil, em virtude da importância que o etanol representa no cenário energético nacional. A reduzida disponibilidade desse combustível em outros países incentiva o desenvolvimento nacional dessa tecnologia.

| Tipo de Célula | Eficiência Elétrica | Densidade de Potência | Reforma de Combustível | Combustível |
|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Membrana de Troca De Prótons (PEMFC) | 35 - 55% | 3,8 - 3,5 kW/m ² | Externo | Hidrogênio |
| Alcalina (AFC) | 45 - 65% | 0,7 - 8,1 kW/m ² | Externo | Hidrogênio puro |
| Ácido Fosfórico (PAFC) | 40 - 50% | 0,8 - 1,9 kW/m ² | Externo | Gás Natural, biogás |
| Óxido Sólido (SOFC) | 50 - 65% | 1,5 - 5 kW/m ² | Externo ou interno | Gás Natural, biogás, etanol, etc. |
| Carbonato Fundido (MCFC) | 50 - 85% | 0,1 - 1,5 kW/m ² | Externo ou interno | Gás Natural, biogás, etanol, etc. |
| Metanol Direto (DMFC) | 40 - 50% | 1 - 6 kW/m ² | Não Requer | Metanol diluído em água |

Tabela 1 – Comparação entre tipos de células a combustível

Fonte: Brasil H2 Fuel Cells (2010)

2.3.5 Pilha de Células a Combustível

Uma única célula a combustível é capaz de produzir uma tensão de 1,16 volts, o que não é suficiente para colocar em funcionamento equipamentos potentes, como o motor elétrico de um carro, que funciona em tensões de aproximadamente 300 volts. Assim, a solução é conectar várias células a combustível em sequência (figura 14), formando a chamada pilha ou bateria a combustível. A conexão das células é realizada por um tipo de placa especial, a “placa bipolar”, pois serve tanto para transportar hidrogênio como o oxigênio (BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO, 2000).

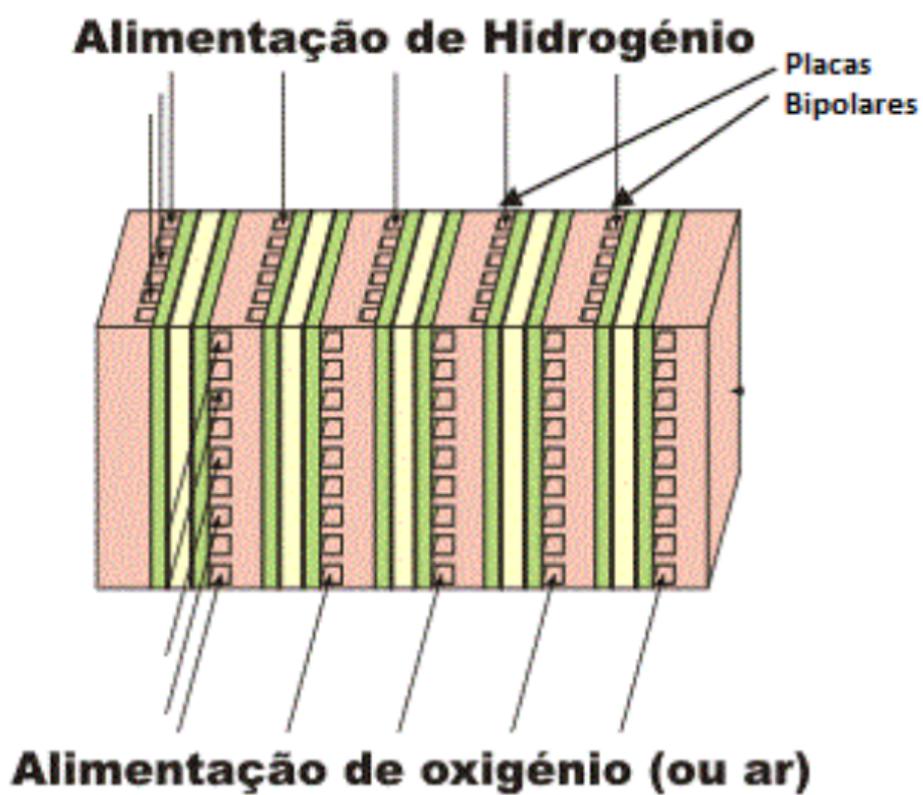


Figura 14 – Representação de uma Pilha a Combustível

Fonte: Bocchi, Ferracin & Biaggio (2000)

3 ESFORÇOS PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

3.1 PARCERIA INTERNACIONAL PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

Para que seja efetivamente instalada uma Economia do Hidrogênio, é necessário um verdadeiro esforço internacional de cooperação entre os países, com vistas a acelerar o processo de desenvolvimento da tecnologia. Nesse sentido, desde 2003, 18 países (figura 15), incluindo o Brasil, e a Comissão Europeia formam a Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE), do inglês International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE WEBSITE, 2017).



Figura 15 – Membros da Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio

Fonte: IPHE website

O objetivo desses países é acelerar o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e de células a combustível, em busca de um melhor aproveitamento da energia, menores impactos ambientais e maior segurança econômica para cada país. Com a integração tecnológica desses países e o incentivo para a criação de políticas públicas nacionais e regionais sobre energia do hidrogênio, busca-se a viabilidade necessária de uma infraestrutura internacional capaz de produzir, armazenar, exportar, distribuir e utilizar o hidrogênio como fonte energética limpa (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015).

A relevância dessa parceria está no fato de os países membros serem os principais consumidores energéticos e poluidores do mundo:

- Mais de 3/4 do consumo mundial de energia elétrica;
- Mais de 2/3 do consumo global de energia;
- Mais de 2/3 da emissão de CO₂.

3.2 OUTROS ESFORÇOS INTERNACIONAIS

Em 2017, durante o Fórum Econômico Mundial de Davos, foi formado o Conselho do Hidrogênio (Hydrogen Council), um grupo formado por 39 empresas dos ramos de energia, transporte e indústria (figura 16), dispostas a promover cooperativamente o desenvolvimento do hidrogênio como a fonte chave para um fortalecimento energético mundial limpo (HYDROGEN COUNCIL, 2018). Um exemplo dos esforços de cooperação é o caso de a Toyota ter liberado para o Conselho, em 2018, cerca de 5.680 patentes relacionadas à energia do hidrogênio.

Nesse curto período de existência, o grupo preparou importantes relatórios na identificação dos potenciais da energia do hidrogênio e da situação atual da tecnologia. Além disso, o grupo investirá mais de dois bilhões de euros nos próximos cinco anos para intensificar a consolidação da Economia do Hidrogênio no mundo (HYDROGEN COUNCIL, 2017b). A expectativa do Conselho é que, em 2050, 18% da demanda energética mundial seja contemplada pela energia do hidrogênio, o que contribuiria com 20% da redução necessária para limitar o aquecimento global em dois graus Celsius (ROSA, 2017).



Figura 16 – Membros do Conselho do Hidrogênio

Fonte: Hydrogen Council (2017)

3.3 ESFORÇOS NACIONAIS

O Brasil é duplamente beneficiário com a consolidação da Economia do Hidrogênio. Primeiramente, o País é detentor de uma vasta variedade de recursos naturais renováveis abundantes. Além disso, a matriz energética brasileira já é composta por uma elevada participação de fontes energéticas renováveis, podendo ser melhores

aproveitadas com a complementaridade do hidrogênio (VERAS, 2015). Desta forma, “o engajamento do país na corrida para a implantação da economia do hidrogênio é altamente estratégico dos pontos de vista econômico, tecnológico e ambiental”.

Em função das competências já existentes no Brasil, a tendência é que os estudos sejam concentrados nas PEMFC, SOFC e, principalmente, nos sistemas reformadores de etanol. Primeiramente, em virtude da infraestrutura já existente para atender esse combustível. Além disso, o País está entre os maiores produtores de etanol do mundo, com tendência de crescimento nos próximos anos. Assim, as principais pesquisas nacionais para aproveitamento do potencial energético do hidrogênio envolvem o desenvolvimento de células a combustível com reformadores, a serem abastecidas com etanol. Ainda que o subproduto do etanol no processo seja o dióxido de carbono (CO₂), essa não é uma fonte de poluição primária, visto que a quantidade gerada é a mesma que havia sido retirado da atmosfera pela cana de açúcar (LORENZI, 2012).

Visando uma ação coordenada dos tomadores de decisão do País, a equipe técnica do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Organização Social supervisionada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, elaborou, em 2010, proposições a serem adotadas para posicionar o Brasil entre as principais nações envolvidas com a Era do Hidrogênio entre os anos de 2010 e 2025, como mostra a tabela 2 abaixo. O estudo oferece aos formuladores de políticas públicas “elementos e instrumentos que podem balizar as ações governamentais que estão em fase de estruturação e que tem o foco nas tecnologias do hidrogênio” (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

O objetivo dessas proposições é propiciar os seguintes benefícios ao País:

- Diminuição de impactos ambientais na geração e utilização de energia;
- Aumento da segurança energética;
- Melhoria do aproveitamento dos recursos naturais;
- Desenvolvimento regional;
- Desenvolvimento de parque industrial competitivo;
- Geração de empregos.

| Recomendações | Prioridade | Curto Prazo (0 a 5 anos) | Médio Prazo (5 a 10 anos) | Longo Prazo (10 a 15 anos) |
|--|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Incentivar o desenvolvimento tecnológico em células a combustível visando a redução de custos de membranas separadoras e catalisadores mais resistentes | Muito Alta | X | X | |
| Incentivar o desenvolvimento tecnológico, em eletrólise da água, reforma de hidrocarbonetos e gaseificação de biomassa | Muito Alta | X | X | |
| Promover educação e treinamento apropriado em NCP (normas, códigos e padrões) e segurança para autoridade, reguladores, estudantes, usuários e público em geral | Muito Alta | X | | |
| Dar continuidade à formação de Recursos Humanos por meio de bolsas de estudos em todos os níveis | Muito Alta | X | X | X |
| Consolidar a infraestrutura de laboratórios de hidrogênio | Alta | X | | |
| Aumentar a carga tributária sobre a importação de sistemas completos de produção de hidrogênio e células a combustível | Alta | X | | |
| Abertura de editais de subvenção econômica para empresas localizadas em todo o território nacional com a indicação de temas relacionados à tecnologia do hidrogênio como área de interesse | Muito Alta | X | X | |
| Adicionar 1% a 10% m ³ /m ³ de hidrogênio produzido a partir de energias renováveis ao gás natural utilizado no país | Muito Alta | | X | |
| Fomento à pesquisa para desenvolvimento de materiais e métodos para fabricação de cilindros para armazenamento de hidrogênio gasoso a altas pressões | Média | X | X | X |

Tabela 2 – Recomendações para o Incentivo à Economia do Hidrogênio, segundo o CGEE

Fonte: Adaptado de Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010)

Dentre os esforços oficiais do governo brasileiro, destacam-se os projetos: Roteiro para a Estruturação da Economia no Brasil (2005), do Ministério de Minas e Energia, e Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2, 2002), do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). As principais diretrizes constantes nesses documentos são:

- Criação e operação de redes cooperativas abrangendo universidades, institutos de pesquisa, centros de pesquisa, incubadoras e empresas;
- Apoio para a revitalização e melhoria da infraestrutura de pesquisa das instituições envolvidas no ProH2;
- Fomento à formação e treinamento de recursos humanos, com ênfase à pós-graduação no Brasil e aperfeiçoamento em centros de excelência no Brasil e no exterior;
- Implementação de projetos de demonstração integrados que privilegiem o uso de combustíveis renováveis nacionais, com ênfase especial à reforma do etanol;
- Fomentar o estabelecimento de normas e padrões para certificação dos produtos, processos e serviços relativos às tecnologias de hidrogênio e células a combustível.

Nos últimos anos, depois de um longo período de estagnação, o Brasil intensificou os esforços pelo desenvolvimento dessa tecnologia. Recentemente, foi criada a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) e, em junho de 2018, o País sediou a Conferência Mundial de Energia do Hidrogênio (WHEC 2018), a mais importante do ramo (BRASIL. Secretaria de Energia e Mineração do Estado de São Paulo, 2018). A WHEC acontece a cada dois anos, desde 1976, e teve como tema a “Transformação de biomassas e de energia elétrica em hidrogênio” (WHEC, 2018).

Outro esforço brasileiro pode ser identificado na hidrelétrica de Itaipu, por meio do Núcleo de Pesquisa de Hidrogênio (NUPHI). O superintendente de energias renováveis da Itaipu Binacional, Paulo Afonso Schmidt, afirma que a “NUPHI já domina a produção de Hidrogênio, que perpassa todo o ciclo de obtenção do gás até seu armazenamento para posterior uso em pilhas de combustível”. Sendo Itaipu a segunda maior hidrelétrica do mundo, observa-se a relevância da produção de hidrogênio a partir da matriz hidrelétrica brasileira (CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO, 2018e).

4 A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO NA PRÁTICA

4.1 APLICAÇÕES PARA AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Cada vez mais as células a combustível fazem parte do dia a dia das pessoas e a tendência é que a popularização do seu uso se expanda para as mais diversas aplicações possíveis. Em uma macro visão, pode-se classificar as aplicações em transportes, equipamentos portáteis, geração de energia estacionária e utilização espacial.

4.1.1 Veículos movidos a hidrogênio

Sendo o transporte um dos principais consumidores de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, poluidores do meio ambiente, ele é também um dos principais nichos onde busca-se a aplicação de células a combustível.

Segundo Gomes Neto (2005), para que haja viabilidade comercial para células a combustível em veículos, é necessário que se atenda especificações básicas:

- 1) Ter baixo custo e peso;
- 2) Ter boa confiabilidade e eficiência;
- 3) Fornecer alta densidade e potência;
- 4) Serem seguras e flexíveis para diferentes combustíveis;
- 5) Serem fáceis de usar e de manter;
- 6) Serem compactas;
- 7) Devem entrar em funcionamento logo que for dada a partida.

4.1.1.1 Automóveis

Com a pressão ambiental existente no mundo nas últimas décadas, as montadoras de automóveis passaram a buscar soluções que combatessem a emissão de gases poluentes. Assim, consolidou-se a produção de carros elétricos em busca da dita sustentabilidade. No entanto, não pode-se relacionar o uso de baterias elétricas com uma plena sustentabilidade, visto que carros elétricos, ainda que silenciosos e limpos, dependem de baterias carregadas com energia suja e que, geralmente, são despejadas sem tratamento em aterros sanitários (KOIFMAN, 2017).

A partir da confirmação dos benefícios e da eficiência das células a combustível, e da certeza que poderiam ser utilizadas como fonte energética no transporte,

iniciou-se uma verdadeira “corrida verde”, na qual as empresas automobilísticas investiram bilhões de dólares no desenvolvimento de carros a hidrogênio.

Esses veículos contam com um motor elétrico para funcionar, mas diferente de um carro elétrico, não é necessário ser recarregado em tomadas e sim abastecido com hidrogênio para alimentação da pilha a combustível. Ao pisar no acelerador, a energia elétrica, resultante das células a combustível, é enviada ao motor, que produz energia mecânica para o movimento do carro, como mostra a figura 17 abaixo (SILVA FILHO et al., 2016).

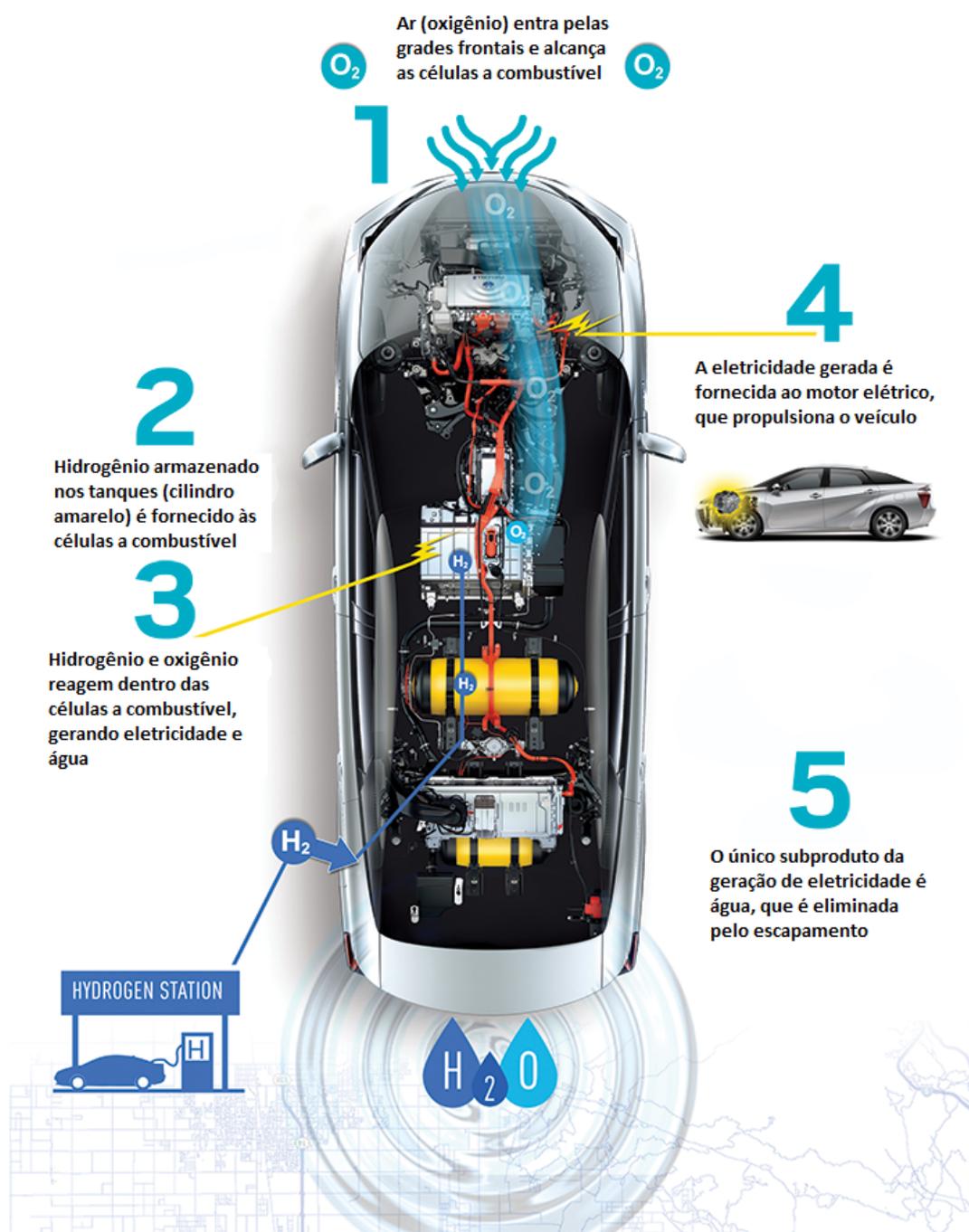


Figura 17 – Etapas de funcionamento de um carro a hidrogênio

Fonte: Adaptado de Kenski (2016)

Atualmente, todas as montadoras de carros do mundo já possuem modelos movidos a célula a combustível. Além disso, já existem no mundo mais de 300 estações de abastecimento de hidrogênio, devendo ultrapassar a marca de 1000 unidades em 2020. Isso explica as audaciosas estimativas dos governos japonês e chinês para os próximos anos. A China planeja ter 50.000 veículos movidos a célula a combustível em 2025 e 1 milhão em 2030. Já o Japão estima 200.000 veículos até 2025 e 800.000 unidades em 2030 (HYDROGEN COUNCIL, 2017a). O território japonês é o com maior infraestrutura de suporte, com mais de 100 postos de abastecimento de hidrogênio em funcionamento (CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO, 2018f).

Outro destaque no setor de carros elétricos movidos a hidrogênio, é o estado da Califórnia nos Estados Unidos, onde estão os maiores entusiastas americanos sobre tecnologias limpas e ecologicamente corretas. O governo local concede uma série de benefícios para os usuários, além de proporcionar uma das mais completas infraestruturas da tecnologia no mundo. É possível percorrer todo o estado da Califórnia sem problemas de abastecimento, visto que lá estão 32 dos 35 postos de abastecimento existentes no país (KOIFMAN, 2017). A expectativa é que até 2020 o estado conte com 200 estações de abastecimento de hidrogênio (CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO, 2018d).

O primeiro automóvel movido a célula a combustível comercializado em larga escala foi o Toyota Mirai (figuras 18, 19 e 20). Lançado em 2014, o veículo já está presente no Japão, Estados Unidos e países europeus, pois são as nações que saíram na frente na consolidação da infraestrutura. O modelo vai de 0 a 100 Km/h em cerca de 9 segundos, leva cinco minutos para um total abastecimento e pode rodar cerca de 550 km com um tanque cheio. Segundo Edson Orikassa, gerente da Toyota Brasil, “a meta da empresa é chegar a 30 mil unidades anuais até 2020, dez vezes mais do que as três mil produzidas ano passado” (CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO, 2018b).



Figura 18 – Toyota Mirai sendo abastecido em um posto de hidrogênio

Fonte: Toyota website (2018)



Figura 19 – Interior de um Toyota Mirai

Fonte: Toyota website (2018)

Carro a hidrogênio

Os principais componentes do Mirai, da Toyota, que é movido a hidrogênio



Figura 20 – Principais componentes do Toyota Mirai

Fonte: Toyota (2015)

Em 2016, a Audi apresentou o H-tron Quattro (figura 21), seu veículo completamente movido a hidrogênio. Segundo o website da montadora (2017, tradução nossa), “o modelo é capaz de rodar quase 600 quilômetros com um “tanque” cheio e vai de 0 a 100 km/h em menos de 7 segundos”. Além disso, o modelo se destaca pela velocidade de recarga do combustível, alcançando apenas três minutos, tempo semelhante para um abastecimento tradicional em um posto de gasolina (AUDI WEBSITE, 2016).



Figura 21 – Audi H-tron Quattro, SUV movido a hidrogênio

Fonte: Audi website (2018)

Também em 2016, a Nissan apresentou ao governo brasileiro, durante o lançamento do programa “Renova Bio 2030”, o “primeiro protótipo de veículo em todo o mundo a ser movido por uma Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC)”, alimentada por bioetanol (figura 22). A montadora japonesa, que já possui o carro elétrico mais vendido do mundo, o LEAF, planeja usar o Brasil como referência na popularização de veículos movidos a célula a combustível, aproveitando a infraestrutura já existente do etanol. A tecnologia, batizada como “Célula de Combustível e-Bio” e que proporciona autonomia superior a 600 km, foi apresentada ao Presidente da República, Michel Temer, (figura 23) e será testada nas vias públicas brasileiras (REDAÇÃO AUTOESPORTE, 2017).



Figura 22 – Nissan e-Bio, movido a célula a combustível, que rodará no Brasil
Fonte: Redação Autoesporte (2017)



Figura 23 – Veículo da Nissan movido a célula a combustível sendo apresentado ao Presidente Michel Temer
Fonte: Campo Grande News (2017)

4.1.1.2 Ônibus

Todos os benefícios de uma célula a combustível (ser eficiente, silenciosa e sustentável, por exemplo) são otimizados nos transportes de massa, principalmente nos ônibus, em virtude da simplificação da infraestrutura necessária. Havendo a estruturação de uma garagem com abastecimento centralizado, torna-se viável comercial e economicamente a utilização de ônibus movidos a hidrogênio (NADALETI, 2017).

“A União Europeia lançou edital de compra de mais de 600, a China busca adquirir 2.000 e o Brasil desenvolveu a sua própria tecnologia” (MIRANDA, 2017). O diferencial brasileiro é o fato de ser um grande fabricante e usuário de ônibus, tornando o hidrogênio um grande aliado no combate à poluição nos grandes centros do País.

O Brasil, inclusive, vai de encontro às tendências internacionais de foco em aplicações de células a combustível em veículos de passeio. Os esforços nacionais privilegiam o uso no transporte coletivo rodoviário de passageiros. (NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2017) “Essa tendência vem ao encontro do grande potencial industrial brasileiro na produção de ônibus urbanos e à necessidade de melhoria do trânsito e a redução de emissões poluentes em grandes cidades” (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

Em São Paulo, a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU), em parceria com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), desenvolve o projeto Estratégia Energético-Ambiental, que consiste na aquisição, operação e manutenção de ônibus (figura 24) com células a combustível alimentadas por hidrogênio, além da construção de estações de produção e abastecimento de hidrogênio (NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2016).



Figura 24 – Ônibus movido a hidrogênio que circula em São Paulo
Fonte: Vargas (2017)

4.1.1.3 Aviões

De acordo com estudos realizados pela Boeing, as células a combustível podem diminuir o consumo de combustível em até 75% em aviões, além de diminuir a poluição nos aeroportos. A tecnologia utilizada é a Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC) que, por operar em altíssimas temperaturas, é alimentada por querosene (combustível de avião), havendo extração de hidrogênio internamente. Além disso, as células a combustível também podem substituir as tradicionais e pesadas baterias dos aviões.

4.1.1.4 Suporte industrial

Uma das grandes aplicações atuais das células a combustível, já produzida em escala comercial, é para o funcionamento de equipamentos para fins industriais. Em solo americano, grandes empresas como Apple, Microsoft e Walmart, fazem uso dessa tecnologia para produzir energia a partir do biogás para as empilhadeiras elétricas (BENELLI, 2016).

4.1.1.5 Trens

No último dia 17 de setembro de 2018, entraram em operação, na Alemanha, “os primeiros dois trens do mundo equipados com células de combustível que convertem hidrogênio e oxigênio em eletricidade” (figura 25). Os silenciosos trens têm emissão zero de gases poluentes e possuem autonomia total de 1000 quilômetros. A empresa responsável pelo seu desenvolvimento, a Alstom, afirmou que o modelo está pronto para ser produzido em série (TOLEDO, 2018).



Figura 25 – Trem movido a célula de hidrogênio que iniciou operação na Alemanha
Fonte: Toledo (2018)

4.1.2 Equipamentos portáteis

As aplicações portáteis das células a combustível podem ser a de substituir as tradicionais pilhas e baterias usadas em equipamentos eletrônicos, como telefones celulares e laptops, e a de gerar energia de forma remota, como em um acampamento.

4.1.3 Geração de energia estacionária

Refere-se à capacidade das células de produzir hidrogênio que pode ser usado para abastecer eletricamente estruturas fixas, como indústrias, hospitais, escolas e residências, ou ainda como combustível para o veículo familiar.

O Japão é o país mais avançado em relação à tecnologia aplicada nas residências. A partir de uma parceria público-privada e aproveitando a já existente distribuição de gás natural, mais de 250.000 residências são abastecidas com eletricidade gerada por células a combustível de baixa potência (HYDROGEN COUNCIL, 2017b). Aproveitando o apelo internacional dos Jogos Olímpicos de 2020 a serem realizados no Japão, o governo japonês espera expandir a rede para 1,4 milhão de residências, formalizando “as primeiras Olimpíadas da Era do Hidrogênio” (MIRANDA, 2017).

O princípio adotado nessas residências japonesas é uma verdadeira revolução a ser disseminada pelo mundo. Todo o processo ocorre no próprio estabelecimento, inclusive em vários hotéis do país. Inicialmente, o hidrogênio, canalizado por uma estatal japonesa pelos antigos dutos de gás natural, abastece a pilha a combustível responsável pela eletricidade do estabelecimento. O subproduto dessa reação é água aquecida (água + calor liberado), que é reaproveitada para o banho, reduzindo, ou em muitos casos eliminando, a necessidade de chuveiros elétricos e de piscinas com sistemas de aquecimento. Toda a água despejada pelos usuários é captada pela Central de Abastecimento do Japão, onde ela irá ser tratada e resultará em hidrogênio puro, reiniciando o processo (JAPÃO. JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY AGENCY, 2016).

Outro caso que demonstra a importância da Era do Hidrogênio para a sociedade é do Primeiro Banco Nacional de Omaha, nos Estados Unidos. Um estudo realizado pelo banco constatou que uma falta de fornecimento elétrico por uma hora resultaria em um prejuízo de seis milhões de dólares. Visando conceder segurança energética para o seu funcionamento, foi instalado um sistema de células a combustível. Semelhante a esse caso, várias instalações críticas, como bases militares, hospitais e centros de pesquisa, têm investido em sistemas alternativos alimentados por hidrogênio (STEEVES, 2014).

4.1.4 Aplicação espacial

Atualmente, uma das principais aplicações do hidrogênio é como combustível dos foguetes espaciais. Isso ocorre pois ele apresenta um maior potencial energético que a gasolina ou diesel: 1 litro de hidrogênio equivale a 2,75 litros de gasolina ou diesel. Todos os lançamentos realizados pela NASA, nas últimas décadas, tiveram hidrogênio e oxigênio como combustíveis propulsores (TECMUNDO, 2017).

4.2 PARCERIA ENTRE CÉLULA A COMBUSTÍVEL E CÉLULA FOTOVOLTAICA

Como visto anteriormente, é necessária uma fonte primária para a produção de hidrogênio, tendo em vista que a sua disponibilidade bruta é escassa. Sendo a hidrólise uma das mais simples e limpa, o desafio é encontrar formas sustentáveis de se fornecer a energia necessária para a ocorrência do processo. Nesse propósito, destaca-se a célula fotovoltaica.

Os painéis fotovoltaicos são a principal forma de conversão da energia emitida pelo sol (os fótons) em eletricidade. Dessa forma, a parceria entre as células fotovoltaica e a combustível resulta em um sistema completamente sustentável (figura 26), no qual a energia necessária para a separação de água em hidrogênio, batizado de “hidrogênio solar”, é proveniente dos raios solares (SILVA, 2017b).

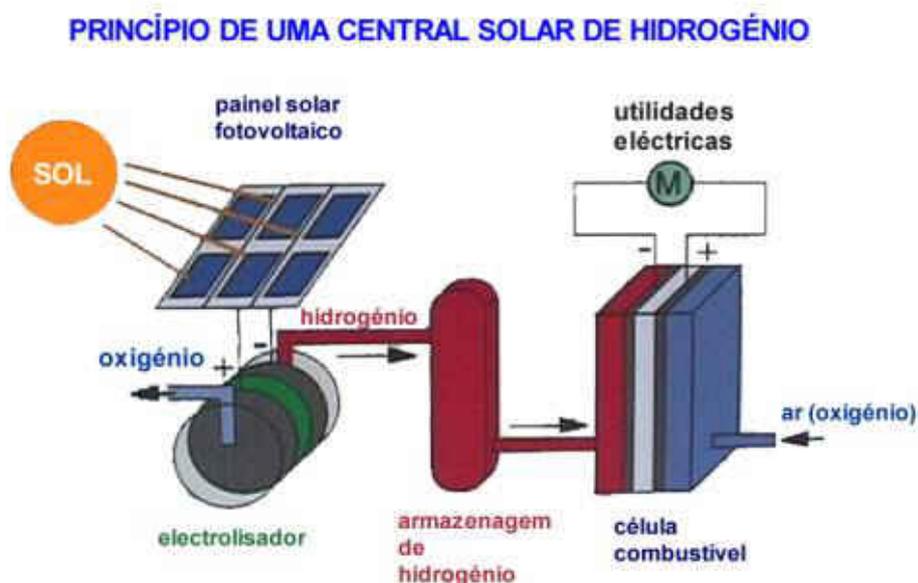


Figura 26 – Esquema do sistema de produção de “hidrogênio solar”

Fonte: Adaptado de Silva (2017)

O HyperSolar H2 Generator foi um dos primeiros modelos a aliar os benefícios dessas células, permitindo que em um único sistema houvesse o aproveitamento da luz solar pelas nanopartículas responsáveis pela hidrólise e a consequente extração de hidrogênio. Segundo o website da empresa, o equipamento é capaz de aproveitar qualquer fonte de água no processo de quebra para obtenção de hidrogênio, inclusive as proveniente de oceanos ou aquelas descartadas pela indústria (HYPER SOLAR, 2012).

Em 2001, a NASA lançou um avião protótipo, o Helios (figura 27), que exemplifica perfeitamente os benefícios da união dessas tecnologias. O avião era equipado com painéis solares e com células a combustível. Durante o dia, os painéis fotovoltaicos forneciam a energia elétrica necessária para o funcionamento das hélices, bem como para a produção de hidrogênio e oxigênio através da eletrólise da água, que podia ser captada das chuvas e armazenada em pequenos tanques. Durante a noite, sem as emissões solares, a eletricidade era produzida a partir das células a combustível, alimentadas pelos hidrogênio e oxigênio previamente captados. Inclusive, sendo água o subproduto das células a combustível, esta era reaproveitada no processo, resultando em um sistema autônomo (ESTADOS UNIDOS. NASA, 2010).



Figura 27 – Avião Helios, protótipo da NASA

Fonte: Vinholes (2016)

Em 2017, cientistas da Universidade da Flórida, nos Estados Unidos, afirmaram que o melhor caminho para a Era do Hidrogênio envolve produzir hidrogênio a partir da água do mar usando energia solar. Eles desenvolveram um catalisador duplo, que gera hidrogênio de um lado e oxigênio do outro, formado por titânio e molibdênio, metais mais baratos que os nobres, como a platina. Assim, observa-se que os contínuos

e promissores estudos mostram que a consolidação da tecnologia a hidrogênio com auxílio da energia solar é uma questão de tempo (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2017).

As grandes dificuldades para a consolidação da parceria dessas tecnologias são o custo e a eficiência energética do sistema. Entretanto, se realizada uma análise mais minimalista, é possível identificar as viabilidades ambiental, social e econômica. Primeiramente, os custos relacionados a painéis solares estão cada vez menores. Além disso, a possibilidade de produção em locais pontuais, como no próprio veículo ou na própria residência, elimina a energia que seria perdida no transporte.

4.3 OBSTÁCULOS PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

Sendo o hidrogênio um elemento conhecido há tanto tempo, assim como os seus benefícios para a humanidade, por que então o seu uso não está popularizado? Segundo Kenski (2016), “as principais tecnologias necessárias para que essa revolução aconteça já existem, mas ainda há um longo caminho até que elas se tornem comercialmente viáveis”.

Inicialmente, é preciso considerar que, ainda que o hidrogênio seja encontrado em grande parte dos elementos e matérias existentes, é rara a sua disponibilidade como uma fonte primária, necessitando um processo adicional de extração. Além disso, a falta de recursos humanos qualificados e preparados para lidar com a cadeia do hidrogênio é outra barreira para o desenvolvimento da tecnologia. Nesse sentido, o grande problema, principalmente quando observada a realidade brasileira, é que grande parte dos trabalhos relacionados é realizada por alunos de mestrado e doutorado que, geralmente, deixam suas instituições após a conclusão de sua pós-graduação.

Outro obstáculo à popularização do hidrogênio é o custo elevado para execução do processo. Esse é, inclusive, o grande desafio atual para a consolidação da tecnologia. Os cientistas e pesquisadores envolvidos buscam, exatamente, formas de baratear a produção e distribuição do hidrogênio, pois é necessário, por exemplo, uma infraestrutura específica para o abastecimento de veículos movidos a célula de combustível. Atualmente, o custo de um sistema de Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons, o mais comum, é de 52 dólares por quilowatt, enquanto que estudos apresentados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos apontam o valor de 30 dólares por quilowatt para que a tecnologia torne-se viável comercialmente (WALLIS, 2018).

Outrossim, a falta da confiança da sociedade na necessidade dessa transição energética é outro empecilho. O consumidor já está propenso a adotar tecnologias sustentáveis no seu dia a dia. Por exemplo, em pesquisa divulgada em 2018 pela montadora de automóveis Nissan, oito em cada dez pessoas na América do Sul conhecem e estão dispostas a comprar carros elétricos, alegando motivos econômicos e

ambientais (FAUSTINO, 2018). É necessária uma conscientização coletiva para que os agentes públicos e privados entendam que os altos investimentos de agora resultarão em benefícios duradouros no futuro. Assim, é preciso uma ação coordenada entre os países para uma atuação de complementaridade e com padrões internacionais unitários.

5 CONCLUSÕES

5.1 RESUMO DO PROCESSO

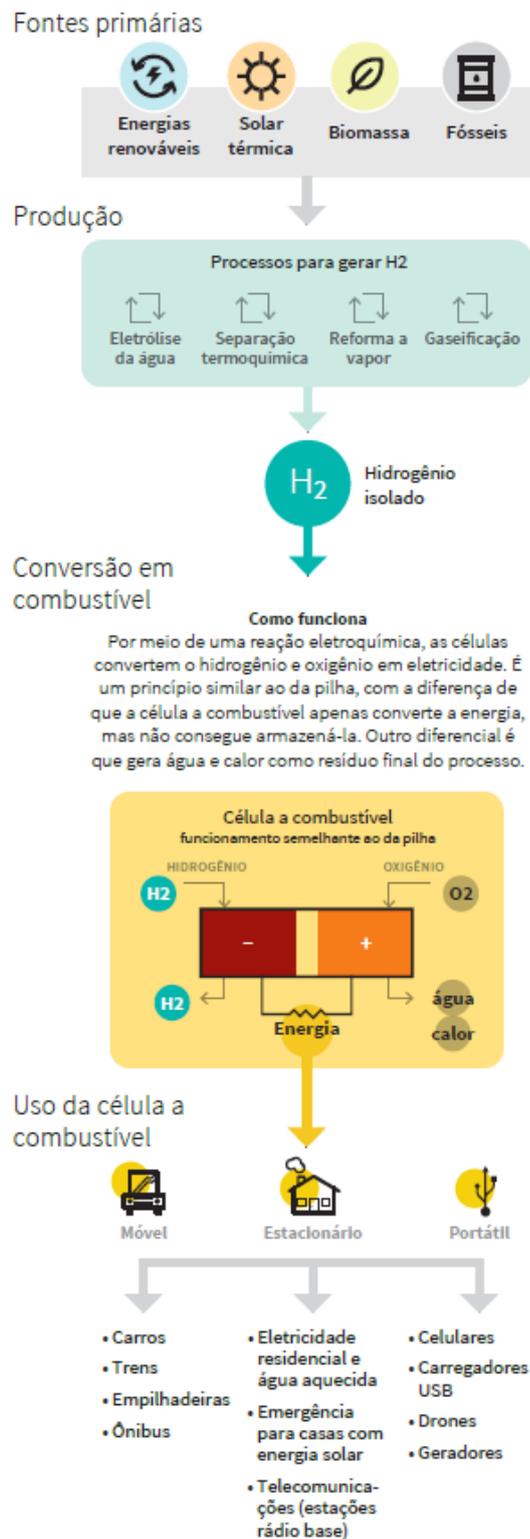


Figura 28 – Da extração ao uso do hidrogênio como fonte energética

Fonte: Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (2016)

5.2 HIDROGÊNIO VERSUS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

Uma das principais necessidades energéticas do mundo é o funcionamento de veículos automotores. Tradicionalmente, estes são alimentados por combustíveis derivados do petróleo, com alto impacto ambiental. No entanto, a Revolução Verde ocorrida nas últimas décadas impulsionou a busca por fontes renováveis e limpas, como o hidrogênio, sempre buscando conciliar o quesito ambiental com eficiência.

Na comparação do uso do hidrogênio com o dos combustíveis fósseis, é possível estabelecer algumas diferenças, como mostra a tabela 3 abaixo. A primeira diz respeito aos motores utilizados em cada processo. Enquanto o primeiro alimenta motores elétricos, o segundo é fonte de energia para motores a combustão. De maneira geral, o motor elétrico apresenta claras vantagens sobre o motor a combustão, como pode ser observado no quadro comparativo abaixo:

| Motor Elétrico | Motor a Combustão |
|---|--|
| Silencioso | Barulhento |
| Praticamente não usa óleo lubrificante | Necessita de óleo lubrificante, um grande agente poluidor |
| Manutenção simples | Manutenção cara e complexa |
| Freio regenerativo, capaz de transformar energia mecânica em elétrica | Sem possibilidade de freio regenerativo |
| Economia de espaço, em virtude da simplicidade dos processos | Motor de grandes proporções, necessitando de espaço considerável |
| A partir do hidrogênio, tem água como subproduto | A partir dos combustíveis fósseis, tem gases poluentes como subproduto |
| Eficiência de até 95% | Eficiência máxima de 40% |

Tabela 3 – Diferenças entre os motores elétrico e a combustão

Fonte: Adaptado de Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010)

5.3 CÉLULA A COMBUSTÍVEL VERSUS BATERIA

Um motor elétrico também pode ser alimentado por uma bateria. No entanto, esta também apresenta pontos negativos em relação à célula a combustível. O principal diz respeito ao custo ambiental das baterias, pois quando a energia interna é utilizada, ela deve ser descartada, o que geralmente ocorre de maneira inadequada, resultando em boa parte do lixo tóxico jogado nos aterros sanitários. Por outro lado, as células a combustível necessitam apenas que a quantidade de hidrogênio seja recarregada, sem precisar trocar todo o sistema (ALEMANHA. Instituto de Engenharia Elétrica, 2018).

Além da questão ambiental, pode-se destacar outras características vantajosas dos carros movidos a célula a combustível em detrimento dos carros elétricos alimentados por bateria, quais sejam: maior autonomia (mais tempo antes de necessitar de um novo abastecimento), reabastecimento mais rápido e custo inicial mais baixo (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2016).

A tabela 4 abaixo identifica as semelhanças e diferenças entre as células a combustível e as baterias:

| Semelhanças | Diferenças |
|--|--|
| Se conectarmos várias células a combustível umas às outras nós aumentamos a potência. Da mesma forma como ocorre nas baterias. | Na célula a combustível, o ânodo e o cátodo são feitos basicamente de carbono e platina, e não são consumidos. Apenas os combustíveis hidrogênio e oxigênio/ar o são, logo, enquanto existir hidrogênio e oxigênio, a célula a combustível irá funcionar. Quando terminar o combustível, basta recarregar e imediatamente a célula recomeça a funcionar. |
| Ambas as tecnologias consistem de eletrodos - um ânodo e um cátodo - em contato com um eletrólito e produzem energia elétrica através de uma reação eletroquímica. | Já durante as reações químicas na bateria, o ânodo e o cátodo são consumidos até acabarem. Depois, devem ser substituídos ou recarregados. |
| As reações químicas ocorrem no ânodo e no cátodo, com a transferência de elétrons sendo feita por um circuito elétrico externo, para que ocorra a reação completa. | Se compararmos a quantidade de energia por peso, veremos que as células a combustível apresentam vantagens, ou seja, são mais leves. |

Tabela 4 – Semelhanças e diferenças entre as células a combustível e as baterias

Fonte: Gomes Neto (2005)

5.4 OPORTUNIDADES E AMEAÇAS

A tabela 5 abaixo apresenta as principais oportunidades e ameaças da adoção do hidrogênio como fonte energética em detrimento das fontes tradicionais utilizadas atualmente.

| Oportunidades | Ameaças |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Disponível em qualquer parte do mundo - Rendimento elevado de energia (2,75 vezes maior do que os combustíveis de hidrocarbonetos) - Geração distribuída de energia - Ruptura do atual regime energético - Uso em horários de pico do consumo elétrico - Produção através de vários insumos (flexibilidade de obtenção) - Independência externa de combustíveis fósseis - Redução na emissão de gases causadores de efeito estufa - Diversificação da matriz energética - Redução da demanda de combustíveis fósseis, diminuindo o impacto ao meio ambiente - Uso veicular, com maior eficiência para geração de energia que motores a combustão convencionais | <ul style="list-style-type: none"> - Alto custo operacional - Ausência de Mercado Consumidor - Ausência de infraestrutura no armazenamento e distribuição - Insuficiência de normas de segurança específicas - Ausência de recursos humanos qualificados - Ausência de empresas de serviço e produção de equipamentos - Ausência de produção de hidrogênio direcionada para fins energéticos - O mercado mundial de células a combustível oferece poucos produtos comerciais |

Tabela 5 – Oportunidades e ameaças da opção pelo hidrogênio como principal fonte energética

Fonte: Veras (2015)

5.5 PERSPECTIVAS PARA A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

Pesquisas apresentadas pela Universidade de Birmingham, no Reino Unido, demonstram que, se avaliado o “custo total de propriedade”, o hidrogênio é mais barato que o diesel. Nesse custo, está embutido o custo total da vida útil de um dispositivo e os custos adicionais com hospitais, doenças em geral e poluição ambiental, causados pela queima de combustível fóssil. Dessa forma, o professor Robert Steinberger-Wilckens, responsável pelo estudo britânico, afirma que a atual barreira da Economia do Hidrogênio diz respeito aos elevados custos iniciais das células a combustível e da infraestrutura necessária, pois o funcionamento da estrutura, com maior eficiência energética, menor custo do combustível de hidrogênio e menores custos de manutenção, já apresenta viabilidade econômica (CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO, 2018g).

Devido às suas proporções continentais em população e PIB, as estratégias adotadas pela China apresentam relevante impacto no cenário internacional. Por isso, é possível vislumbrar uma rápida adaptação do mundo à Economia do Hidrogênio. Durante a WHEC 2018, o CEO da Companhia Chinesa de Investimento Energético, Wen Ling, afirmou que o governo chinês está ciente e comprometido com o potencial

transformador do hidrogênio no panorama energético global, almejando alcançar 1 milhão de carros movidos a célula a combustível até 2030.

A indústria do Hidrogênio e células de combustível da China entrou em uma nova era de padronização e desenvolvimento acelerado. O processo de construção de uma sociedade de energia do Hidrogênio chinesa aumentará em qualidade e velocidade (Ling, 2018 apud WHEC, 2018).

As iniciativas europeias também servem para impulsionar as perspectivas em relação à Era do Hidrogênio. Bart Biebuyck, diretor executivo da JTI, parceria público-privada entre a Comissão Europeia, a indústria europeia de células de combustível e Hidrogênio e organizações de investigação, destacou que o foco do grupo está em três pilares: competitividade, sustentabilidade e segurança energética. A expectativa do diretor é que até 2025 a Europa tenha produção em grande escala de veículos a hidrogênio.

No Japão, a consolidação da energia a hidrogênio é vista como uma grande oportunidade. Isso porque o país importa 94% dos combustíveis fósseis que consome, com uma baixíssima autossuficiência energética de 6%. Além do apelo ambiental, a Era do Hidrogênio é encarada como uma questão social e econômica pelos japoneses. A perspectiva de se tornar um país autossuficiente pode ser a explicação para o Japão ser o país com a tecnologia de pilhas de combustível mais avançada do mundo, com casos de sucesso e modelos a serem seguidos pelos demais países. Assim, a estratégia japonesa é que até 2050 o transporte japonês seja completamente alimentado por hidrogênio (CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO, 2018b).

O professor Maurício Tolmasquim, um dos maiores especialistas brasileiros em energia renovável, durante palestra proferida na WHEC 2018, afirmou que o Brasil possui alto potencial de se tornar importante produtor mundial de hidrogênio. Isso porque a posição geográfica privilegiada do Brasil permite um grande aproveitamento energético de fontes renováveis. Quando observada a energia solar, por exemplo, pesquisas recentes da Agência Internacional de Energias Renováveis apontaram que o Brasil possui o dobro de radiação solar que a Alemanha, país europeu líder mundial em energia solar, ou seja, um mesmo painel solar produziria o dobro de energia se localizado em solo brasileiro (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2018).

Semelhante ao potencial solar, o professor aponta o potencial do País para as energias eólica e hidrelétrica, a última já amplamente consolidada na matriz energética nacional. Na opinião de Tolmasquim, “o Brasil precisa investir nas hidroelétricas, pois seus reservatórios podem produzir Hidrogênio através da eletrólise e estocá-lo para diversos fins” (WHEC, 2018).

Além disso, investigações geológicas recentes realizadas pelas empresas GEO4U e Engie Brasil apresentaram um novo horizonte para o hidrogênio brasileiro.

Foram descobertas reservas de hidrogênio natural em quatro estados: Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Gerais. O geólogo Alain Prinzhofer, responsável pelo estudo, destacou a importância da descoberta, pois o hidrogênio natural é mais barato que o industrializado e só há um único caso de produção industrial de hidrogênio natural no mundo, em Mali, o que coloca o Brasil em um elevado patamar de competitividade. Além disso, esse caso de Mali é um exemplo de sucesso, visto que essa experiência é responsável por criar 100% da energia limpa em um vilarejo pobre que não tinha acesso à eletricidade (CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO, 2018c).

Assim, semelhante à tendência mundial, avalia-se uma perspectiva muito positiva para o futuro do hidrogênio na cadeia energética brasileira, seja passando pela união das células a combustível com outras fontes energéticas, como energia eólica, solar, hidrelétrica e reforma do etanol, seja pela exploração comercial do hidrogênio natural (FONSECA; SERUDO; SANTOS, 2018).

Respondendo ao problema de pesquisa identificado no início desse trabalho, é possível afirmar que sim, o atual estágio do uso do hidrogênio como fonte energética limpa está cumprindo as expectativas criadas sobre a tecnologia de ser o futuro energético sustentável do mundo e deverá consolidar o seu papel de protagonista nas próximas décadas.

5.6 MELHORIAS PARA O PROCESSO

Para o hidrogênio assumir o papel de protagonista no desenvolvimento energético do planeta, é necessária a viabilidade comercial e econômica da união entre células a combustível e produção de eletricidade a partir de fontes inteiramente limpas, como o vento, luz solar, as marés e os rios. Estudos divulgados pelo Hydrogen Council em 2017 mostram que muito se avançou no barateamento da produção de energia renovável, mas ainda são necessários novos avanços para tornar o sistema renovável. Por exemplo, o kw/h de energia eólica reduziu de 40 centavos de dólar no início dos anos 80 para 5 centavos atualmente. Caso se alcance o valor de 1,5 centavo de dólar, o hidrogênio gerado a partir do sistema energia eólica-célula a combustível será competitivo com a gasolina (PINHO, 2017).

Assim, os desafios a serem superados para que haja a consolidação da Economia do Hidrogênio são:

- Descoberta de novos materiais capazes de baratear o sistema;
- Descoberta de novas formas de extração, que possam ser adaptadas às particularidades regionais, visando a redução dos custos;

- Qualificação acadêmica e profissional de mão de obra capaz de manusear a cadeia do hidrogênio;
- Incentivos governamentais capazes de direcionar os países em uma nova direção energética;
- Conscientização da sociedade sobre os benefícios da transição energética;
- Desenvolvimento da infraestrutura necessária;
- Parceria entre os países para uma interação tecnológica capaz de potencializar as descobertas;
- Adoção universal de normas internacionais.

5.7 PROPOSTA DE TRABALHO PRÁTICO

Uma das formas mais inovadoras e com potencial sustentável de extração do hidrogênio é pela pirólise a plasma. A Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL) possui um Laboratório de Tecnologias a Plasma (LTP), que desenvolve pesquisas de separação do gás metano (CH_4) em hidrogênio e carbono, utilizando processo a plasma gerado por descarga de barreira dielétrica (DBD).

A proposta é de um futuro Trabalho de Conclusão de Curso que auxilie a equipe do LTP nesse processo de extração do hidrogênio e aproveite esse gás extraído para o funcionamento de uma célula a combustível, visando a comprovação prática de toda a teoria proposta ao longo desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALDABÓ, R. **Célula Combustível a Hidrogênio**. São Paulo: Artliber, 2004.
- ALEMANHA. Instituto de Engenharia Elétrica. Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. Jülich, 2018. Disponível em: <<https://www.ieafuelcell.com/documents/ComparativeAnalysisofInfrastructures-HydrogenFuelingandElectricChargingofVehicles.pdf>>. Acesso em: 25/08/2018.
- AUDI WEBSITE. Audi h-tron quattro concept. 2016. Disponível em: <https://www.audi.com/en/innovation/futuredrive/h-tron_quattro.html>. Acesso em: 03/09/2018.
- BENELLI, A. C. “Novo petróleo”, hidrogênio funciona como um coringa das fontes renováveis. **Gazeta do Povo**, p. 32 – 32, 2016. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/novo-petroleo-hidrogenio-funciona-como-um-coringa-das-fontes-renovaveis-1tzp2da3n1u7ildhq6ogdbfxj/>>. Acesso em: 22/08/2018.
- BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. **Pilhas e Baterias**: Funcionamento e impacto ambiental. [S.l.]: Química Nova Escola, 2000.
- BOENTE, A.; BRAGA, G. P. **Manual para Elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso**. Rio de Janeiro: FAETEC, 2004.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (Ministério de Minas e Energias). Balanço Energético Nacional 2017. Ano base: 2016. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em: 03/09/2018.
- BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. Relações Brasil-Estados Unidos no setor de energia: do mecanismo de consultas sobre cooperação energética do memorando de entendimento sobre biocombustíveis (2003-2007). Fundação Alexandre de Gusmão, Brasília, 2011. Disponível em: <http://funag.gov.br/loja/download/823-Relacoes_Brasil-Estados_Unidos_no_Setor_de_Energia.pdf>. Acesso em: 25/08/2018.
- BRASIL. Secretaria de Energia e Mineração do Estado de São Paulo. Hidrogênio em busca do seu espaço no Brasil. Junho 2018. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/2018/06/hidrogenio-em-busca-do-seu-espaco-no-brasil/>>. Acesso em: 01/09/2018.
- BUSTAMANTE, L. A. da C. **Produção de Ligas de Magnésio para Armazenamento Embarcado de Hidrogênio**. 2005. 237 p. Tese (Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.metalmat.ufrrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/teses/2005/69--60/file>>. Acesso em: 15/09/2018.
- CABRAL, A. C. et al. Hidrogênio: Uma Fonte de Energia para o Futuro. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 128 – 135, 2014. Disponível em: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:8fDDOBTc3lgJ:https://revistas.ufpr.br/rber/article/download/38240/pdf_18+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 25/08/2018.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Energias Renováveis e o Brasil +20**. Brasília: Edições Câmara, 2012.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025. In: **Série Documentos Técnicos**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5>. Acesso em: 03/09/2018.

CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO. **Estudo aponta a forma de armazenamento de Hidrogênio mais eficiente**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://whec2018rio.com/2018/06/19/pesquisa-aponta-a-forma-de-armazenamento-de-hidrogenio-mais-eficiente/>>. Acesso em: 25/08/2018.

CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO. **Gigantes de automóveis se juntam em parceria para construir postos de hidrogênio no Japão**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://whec2018rio.com/2018/06/21/gigantes-de-automoveis-se-juntam-em-parceria-para-construir-postos-de-hidrogenio-no-japao/>>. Acesso em: 25/08/2018.

CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO. **Hidrogênio natural é descoberto em quatro estados brasileiros**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://whec2018rio.com/2018/06/18/hidrogenio-natural-e-descoberto-em-quatro-estados-brasileiros/>>. Acesso em: 25/08/2018.

CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO. **Interesse pela energia do Hidrogênio cresce nos EUA**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://whec2018rio.com/2018/06/20/interesse-pela-energia-do-hidrogenio-cresce-nos-eua/>>. Acesso em: 25/08/2018.

CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO. **Itaipu Binacional mostra suas iniciativas de energia renovável**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://whec2018rio.com/2018/06/18/itaipu-binacional-mostra-suas-iniciativas-de-energia-renovavel/>>. Acesso em: 25/08/2018.

CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO. **Japão já utiliza energia do Hidrogênio em larga escala**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://whec2018rio.com/2018/06/20/japao-ja-utiliza-energia-do-hidrogenio-em-larga-escala/>>. Acesso em: 25/08/2018.

CONFERÊNCIA MUNDIAL DE ENERGIA DO HIDROGÊNIO. **Pesquisa revela real diferença de preço entre diesel e Hidrogênio**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://whec2018rio.com/2018/06/19/pesquisa-revela-real-diferenca-de-preco-entre-diesel-e-hidrogenio/>>. Acesso em: 25/08/2018.

DUNN, S. **Hydrogen Futures**: Toward a sustainable energy system. Washington, DC: Worldwatch Institute, 2001. Disponível em: <<http://www.worldwatch.org/system/files/EWP157.pdf>>. Acesso em: 22/08/2018.

ESTADOS UNIDOS. Departamento de Energia. Progress and Accomplishments in Hydrogen and Fuel Cells. Abril 2016. Disponível em: <<https://www.energy.gov/sites/>>

prod/files/2017/01/f34/fcto-progress-accomplishments-april-2016.pdf>. Acesso em: 01/09/2018.

ESTADOS UNIDOS. NASA. Helios Prototype. **NASA website**, 2010. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/centers/dryden/news/ResearchUpdate/Helios/>>. Acesso em: 02/10/2018.

FAUSTINO, R. **80% dos Sul-Americanos testariam carros elétricos, diz pesquisa**. 2018. Disponível em: <<http://goinggreen.com.br/2018/03/28/80-dos-sul-americanos-testariam-carros-eletricos-diz-pesquisa/>>. Acesso em: 22/08/2018.

FONSECA, J. S. da; SERUDO, R. L.; SANTOS, M. C. dos. Matriz Energética Brasileira: Tecnologias Complementares. **Revista Scientia Amazonia**, v. 7, n. 1, p. 74 – 88, 2018. Disponível em: <<http://scientia-amazonia.org/wp-content/uploads/2017/08/v7-n1-74-88-2018.pdf>>. Acesso em: 25/08/2018.

GIL, A. C. **Como elaborar Projetos de Pesquisa**. 5ª. ed. [S.l.]: Atlas, 2010.

GOMES NETO, E. H. **Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir**: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005.

GUERRA, J. B. S. O. de A.; YOUSSEF, Y. A. **As energias renováveis no Brasil**: entre o mercado e a universidade. Palhoça: Unisul, 2012.

HOFFMANN, P. **Tomorrow's Energy**: Hydrogen, fuel cells, and the prospects for a cleaner planet. 2. ed. Londres: MIT Press, 2012.

HYDROGEN COUNCIL. How hydrogen empowers the energy transition. Janeiro 2017. Disponível em: <<http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/Hydrogen-Council-Vision-Document.pdf>>. Acesso em: 22/08/2018.

HYDROGEN COUNCIL. Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition. Novembro 2017. Disponível em: <<http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>>. Acesso em: 25/08/2018.

HYDROGEN COUNCIL. The Hydrogen Council - An Introduction. 2018. Disponível em: <<http://hydrogencouncil.com/>>. Acesso em: 03/09/2018.

HYPERSOLAR. Using Sunlight to Make Renewable Hydrogen. 2012. Disponível em: <<http://www.hypersolar.com/solutions.php>>. Acesso em: 01/09/2018.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Carros elétricos: a bateria ou a célula de combustível?** 2016. Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=carros-eletricos-bateria-ou-celula-combustivel&id=010170161216>>. Acesso em: 22/08/2018.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Catalisadores baratos produzem hidrogênio solar da água do mar**. 2017. Disponível em: <<https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2017/10/23/catalisadores-baratos-produzem-hidrogenio-solar-da-agua-do-mar/>>. Acesso em: 03/09/2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells. Paris, 2015. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>>. Acesso em: 02/10/2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Global Energy Transformation: A roadmap to 2050. IRENA, Abu Dhabi, 2018. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf>. Acesso em: 03/09/2018.

IPHE WEBSITE. Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio: An International Vision for Hydrogen and Fuel Cells. 2017. Disponível em: <<https://www.iphe.net/>>. Acesso em: 25/08/2018.

JAPÃO. JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY AGENCY. Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program: Energy Carriers. 2016. Disponível em: <http://www.jst.go.jp/sip/pdf/SIP_energycarriers2015_en.pdf>.

KENSKI, R. **O futuro começa com H**. 2016. Revista Superinteressante. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/o-futuro-comeca-com-h/>>. Acesso em: 03/09/2018.

KOIFMAN, H. **Carros movidos a hidrogênio deixam de ser ficção e viram realidade**. 2017. Disponível em: <<https://projetocolabora.com.br/mobilidade-urbana/acelerando-limpo/>>. Acesso em: 25/08/2018.

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

LORENZI, B. R. **Em busca de alternativas energéticas**: estudo sobre as pesquisas em células combustíveis no Brasil. 2012. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência, Tecnologia e Sociedade) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/1090/4319.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 01/09/2018.

MIRANDA, P. E. V. de. Combustíveis – materiais essenciais para prover energia à nossa sociedade. **Revista Matéria**, v. 18, n. 03, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v18n3/00.pdf>>. Acesso em: 05/10/2018.

MIRANDA, P. E. V. de. O Alvorecer da Energia do Hidrogênio. **Boletim de Conjuntura do Setor Energético**, FGV Energia, Dezembro 2017. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opinioao_dezembro_-_energia_do_hidrogenio.pdf>. Acesso em: 25/08/2018.

MOREIRA, R. et al. Patentes Depositadas em Âmbito Nacional como Indicador de Desenvolvimento das Tecnologias de Produção de Hidrogênio. **Química Nova**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, v. 36, n. 5, p. 748 – 751, 2013. Disponível em: <<http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/22-AG12482.pdf>>. Acesso em: 03/09/2018.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Com apoio do PNUD, ônibus movidos a hidrogênio entram em circulação em São Paulo**. 2016. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/com-apoio-do-pnud-onibus-movidos-a-hidrogenio-entram-em-circulacao-em-sao-paulo/>>. Acesso em: 03/09/2018.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Ônibus movido a hidrogênio é solução sustentável para problemas de mobilidade urbana do Brasil, diz PNUD**. 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/onibus-movido-a-hidrogenio-solucao-sustentavel-para-problemas-de-mobilidade-urbana-do-brasil-diz-pnud/>>. Acesso em: 03/09/2018.

NADALETI, W. C. **Aproveitamento de Biogás, Hidrogênio e Gás de Síntese no Setor de Transporte Público e Agroindustrial de Arroz: Estudo de Potencial Energético de Resíduos e Emissões de Poluentes**. 2017. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188088/PGEA0589-T.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01/09/2018.

NASTARI EDITORES. Abastecendo com hidrogênio: O desafio de armazenar hidrogênio em veículos com célula a combustível numa quantidade que permita viagens longas. **Scientific American Brasil**, Setembro 2018. Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/abastecendo_com_hidrogenio.html>. Acesso em: 02/10/2018.

PADRÓ, C. E. G.; LAU, F. **Advances in Hydrogen Energy**. Nova Iorque, Boston, Dordrecht, Londres, Moscou: Kluwer Academic, 2002.

PINHO, L. L. R. de. **Avaliação da Produção de Hidrogênio a partir de Excedentes de Energia Eólica Utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo**. 2017. 234 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/lucaspinho.pdf>>. Acesso em: 25/08/2018.

REDAÇÃO AUTOESPORTE. Nissan testa célula de combustível de bioetanol no Brasil. **Auto Esporte**, maio 2017. Disponível em: <<https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2017/05/nissan-testa-celula-de-combustivel-de-bioetanol-no-brasil.html>>. Acesso em: 02/10/2018.

RIFKIN, J. **A Economia do Hidrogênio**. São Paulo: M. Books, 2003.

RIPPLE, W. J. et al. World Scientists Warning to Humanity: A Second Notice. **BioScience**, v. 67, n. 12, p. 1026 – 1028, novembro 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321159576_World_Scientists'_Warning_to_Humanity_A_Second_Notice>. Acesso em: 05/10/2018.

RODRIGUES, R. A. Célula de Hidrogênio: Construção, Aplicações e Benefícios. **Revista Brasileira de Gestão e Engenharia**, Centro de Ensino Superior de São Gotardo, p. 47 – 62, 2010. Disponível em: <<http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia/article/viewFile/25/19>>. Acesso em: 15/08/2018.

ROSA, M. **Hidrogênio pode contribuir com 20% da meta de redução das emissões de CO₂ até 2050**. 2017. Disponível em: <<http://ciclovivo.com.br/planeta/energia/hidrogenio-pode-contribuir-com-20-da-meta-de-reducao-das-emissoes-de-co2-ate-2050/>>. Acesso em: 01/09/2018.

SANTOS JUNIOR, A. C. F. **Análise da Viabilidade Econômica da Produção de Hidrogênio em Usinas Hidrelétricas: Estudo de caso em Itaipu**. 2004. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de

Santa Catarina (UFSC), Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87403/224378.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 03/09/2018.

SILVA FILHO, J. A. R. D. et al. Automóveis Movidos a Base de Água, através da Célula Produtora de Combustível Hidrogênio. **Cadernos de Graduação - Ciências exatas e tecnológicas**, v. 3, n. 3, p. 65 – 72, Novembro 2016. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/index.php/fitsexatas/article/view/3614/2038>>. Acesso em: 22/08/2018.

SILVA, G. N. da. **Produção de Hidrogênio Renovável via Power to Gas para Mitigação de Emissões de CO₂ do Refino do Petróleo e Maior Aproveitamento da Energia Eólica**. 2017. 189 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/gnsilva.pdf>>. Acesso em: 03/09/2018.

SILVA, M. G. P. L. M. da. **Produção de H₂ a partir de água, em pequena escala, utilizando elétrodos de Ni foam e com recurso a energia fotovoltaica**. 2017. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) — Universidade de Lisboa, Lisboa. Disponível em: <http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/28280/1/ulfc121699_tm_Maria_Gabriela_Silva.pdf>. Acesso em: 25/08/2018.

STEEVES, B. **A Competição em Segurança Energética na Transição Hegemônica: a china, os estados unidos e a divergência na energia renovável**. 2014. 84 p. Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais) — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/128819/331435.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 25/08/2018.

TECMUNDO. **Tecnologias Espaciais da NASA**. [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/nasa/8120-tecnologias-espaciais-da-nasa-para-o-futuro.htm>>. Acesso em: 05/10/2018.

TOLEDO, M. Alemanha estreia trem movido a célula de hidrogênio; saiba como ele funciona. **Folha de São Paulo**, São Paulo, Setembro 2018. Disponível em: <<https://sobretrilhos.blogfolha.uol.com.br/2018/09/19/alemanha-estreia-trem-movido-a-celula-de-hidrogenio-saiba-como-ele-funciona/>>. Acesso em: 02/10/2018.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

VARGAS, R. **A Tecnologia Do Hidrogênio E A Geração De Energia Elétrica De Forma Sustentável**. 2017. Disponível em: <<http://universonerd.net/portal/ensino/tecnologia/hidrogenio-energia-sustentavel/>>. Acesso em: 03/09/2018.

VERAS, T. da S. **Análise da Competitividade da Cadeia Produtiva do Hidrogênio no Brasil e a Proposição de uma Agenda de Trabalho Setorial**. 2015. 200 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) — Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda. Disponível em: <<http://www.pgta.uff.br/images/stories/dissertacoes/PGTA006.TatianedaSilvaVeras.pdf>>. Acesso em: 15/08/2018.

VIANA, M. B.; TAVARES, W. M.; LIMA, P. C. R. Sustentabilidade e as Principais Fontes de Energia. Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, Brasília, 2015. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/estudos-e-notas-tecnicas/areas-da-conle/tema14/sustentabilidade-e-as-fontes-de-energia_varios-autores_politicas-setoriais>. Acesso em: 02/10/2018.

VILLULLAS, H. M.; TICIANELLI, E. A.; GONZÁLEZ, E. R. Células a Combustível: Energia Limpa a Partir de Fontes Renováveis. **Atualidades em Química**, Química Nova Escola, v. 15, p. 28 – 34, 2002. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc15/v15a06.pdf>>. Acesso em: 25/08/2018.

VIOLA, L. **Planejamento de curto prazo da operação de baterias e armazenamento de hidrogênio em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2017. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/330973/1/Viola_Luigi_M.pdf>. Acesso em: 25/08/2018.

WALLIS, O. F. It's a no-brainer: are hydrogen cars the future? **The Guardian**, Janeiro 2018. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/technology/2018/jan/20/hydrogen-cars-hugo-spowers-future>>. Acesso em: 25/08/2018.

WHEC. **Notícias sobre a 22ª Conferência Mundial de Energia do Hidrogênio (WHEC)**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.whec2018.com/Media/2/clipping-whec-2018.pdf>>. Acesso em: 25/08/2018.