

ALINE ROSE FERREIRA

PERSPECTIVAS DE FUTURO NO USO DO HIDROGÊNIO COMO RECURSO  
RENOVÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA

Belo Horizonte - MG

Novembro de 2020

PERSPECTIVAS DE FUTURO NO USO DO HIDROGÊNIO COMO RECURSO  
RENOVÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA

Aline Rose Ferreira

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Matheus Pereira Porto

Belo Horizonte - MG

Novembro de 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO

UFMG

## ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DA ALUNA ALINE ROSE FERREIRA

Realizou-se, no dia 10 de novembro de 2020, às 09:00 horas, em ambiente a distância (skype), da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Perspectivas de futuro no uso do hidrogênio como recurso renovável na matriz energética*, apresentada por ALINE ROSE FERREIRA, número de registro 2018724520, graduada no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Matheus Pereira Porto - Orientador (UFMG), Prof(a). Paulo Vinicius Trevizoli (UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.  
Belo Horizonte, 10 de novembro de 2020.

*Matheus Pereira Porto*

Prof(a). Matheus Pereira Porto (Doutor)

*Paulo V. Trevizoli*

Prof(a). Paulo Vinicius Trevizoli (Doutor)

*Fátima Carvalho*  
Secretaria do Curso de Especialização em  
Fontes Renováveis - Geração, Operação  
e Integração

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela oportunidade.

Agradeço à minha família que sempre apoiou em todo o meu percurso e acreditou em mim mesmo quando eu achava impossível.

Aos meus amigos pelo apoio, amizade e respeito. Aos amigos da Pós, sou muito grata pelo enriquecimento pessoal e profissional.

Ao Django e a Cheetara por manter minha sanidade.

Aos professores da Especialização que contribuíram com meu crescimento e conhecimento.

Ao orientador Matheus pela ajuda, paciência e compreensão e compartilhamento de conhecimento.

Àqueles que contribuíram com esse trabalho de alguma forma, com sugestões, auxiliando nas dúvidas e a apoio moral que foi extremamente importante nesse tempo.

*“Para conhecer uma ciência é necessário  
conhecer sua história.”*

*Auguste Comte*

## RESUMO

Devido ao crescimento do mercado global e das pesquisas cada vez mais avançadas na busca por novas formas renováveis de energia e por formas de reduzir as emissões de gases geradas na produção industrial, a busca por meios mais sustentáveis e eficientes de armazenamento e distribuição da energia e na procura incessante por formas de garantir a qualidade de entrega da energia elétrica ao consumidor final, o hidrogênio surge como uma opção importante a ser avaliada e estudada. Principalmente no que cerne à distribuição e armazenamento concomitante a outras fontes, visto que alternativas já conhecidas como solar e eólica apresentam ainda alguns obstáculos neste sentido. As crescentes pesquisas do uso do hidrogênio, principalmente sobre células de combustível, mostram que o uso de hidrogênio já é uma realidade. Este trabalho tem como objetivo revisar o conhecimento teórico sobre o hidrogênio e suas aplicações, uma vez que esta molécula apresenta elevado potencial de estar em breve sendo amplamente utilizado. Através de pesquisas bibliográficas, propõe-se conhecer a cadeia de valor, bem como as tecnologias que cercam a seleção e uso de equipamentos de engenharia, para a aplicação na matriz energética nacional.

Palavras-chave: Energias Renováveis. Hidrogênio. Células de Combustível. Armazenamento de Hidrogênio; Transporte de Hidrogênio. Geração de Hidrogênio. Energia do Hidrogênio.

## **ABSTRACT**

Due to the rising global market and the increasingly advanced research in the search for new renewable forms of energy and ways to reduce the emissions of gases generated in industrial production, the search for more sustainable and efficient means of energy storage and distribution and the constant search for ways to guarantee the quality of delivery of electricity to the final consumer, the hydrogen appears as an important option to be evaluated and studied. Especially in terms of distribution and storage concomitant with other sources, since alternatives already known as solar and wind still present some obstacles in this regard. Growing researches on the use of hydrogen, specially in fuel cells, shows that its use is already a reality. This work aims at reviewing the theoretical knowledge about hydrogen and its applications, since this molecule shows high potential of being widely used soon. Through bibliographical research, we aim at knowing the value chain, as well as the technologies involved in the selection and use of engineering equipment for application in the Brazil energy matrix.

Keywords: Renewables Energy. Hydrogen. Fuel cells. Hydrogen transportation. Hydrogen storage. Hydrogen energy. Hydrogen generation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estimativas de emissões setoriais, em CO <sub>2</sub> eq (GWP 100 anos, SAR IPCC, 1995), de 1990 a 2016. ....	13
Figura 2 - Hidrogênio x eletricidade como transportador de energia.....	15
Figura 3 - Panorama Energias Renováveis.....	18
Figura 4 - Aplicações do Hidrogênio .....	21
Figura 5 - Possíveis rotas de produção do Hidrogênio como vetor energético .....	23
Figura 6 - Infográfico- Veículo Célula de Hidrogênio.....	28
Figura 7 - Funcionamento de uma célula .....	29
Figura 8 -- Infográfico – Veículo Elétrico Célula a Combustível .....	31
Figura 9 - Comparação de capacidades entre métodos de armazenamento de energia sem emissões de carbono .....	33
Figura 10 - Exemplos de tecnologias que utilizam o hidrogênio .....	37
Figura 11 - Ônibus Híbrido .....	39
Figura 12 - Toyota Mirai .....	40
Figura 13 - Trem movido a Hidrogênio – Alemanha .....	41
Figura 14 - Layout de um sistema de produção de Hidrogênio através da eletrólise.....	42

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resultado de emissões de gases de efeito estufa em 2016 .....	14
--	----

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Panorama de Pesquisas.....	48
--	----

## SUMÁRIO

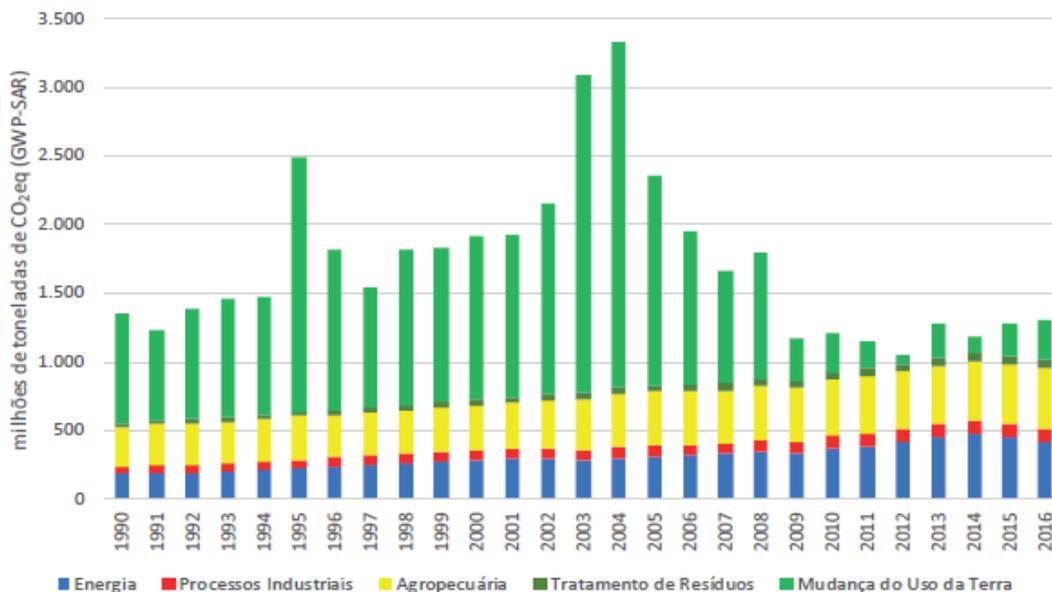
1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Objetivo geral .....	16
1.2	Objetivos específicos .....	16
1.3	Metodologia .....	16
1.4	Organização do trabalho .....	17
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....	18
2.1	Fontes de Energia.....	18
2.2	Energia do Hidrogênio.....	20
2.2.1	Características do hidrogênio .....	22
2.2.2	Extração do Hidrogênio.....	23
	Biomassa.....	23
	Eletrólise.....	24
	Reforma a Vapor .....	25
	Pirólise a Plasma.....	25
	Nuclear.....	26
2.3	Células a Combustível .....	27
2.3.1	Funcionamento das células.....	28
2.3.2	Características.....	29
2.3.3	Tipos de Células .....	29
3	MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO. ...	32
3.1	Armazenamento de Hidrogênio .....	32
3.1.1	Hidrogênio Gasoso .....	33
3.1.2	Hidrogênio Líquido .....	34
3.1.3	Hidretos Metálicos.....	35
3.2	Transporte e Distribuição do Hidrogênio .....	35
4	USO DO HIDROGÊNIO NA MATRIZ ENERGÉTICA.....	37
4.1	Uso de Células de Combustível .....	37
	Ônibus - movidos a Células de Combustível de Hidrogênio.....	38
	Veículos - movidos a Células de Combustível de Hidrogênio.....	39
	Trens - movidos a Células de Combustível de Hidrogênio .....	40
4.2	Hidrogenio a partir da Energia Eólica .....	41
4.3	Hidrogenio e Usina Solar Fotovoltaica.....	42
4.4	Geração de hidrogenio a partir das Marés .....	43
4.5	Biomassa e produção do Hidrogênio .....	44
4.6	Cenário Mundial .....	45
4.7	Vantagens da Introdução do Hidrogênio na Matriz.....	46
4.8	Desafios ao uso do Hidrogênio .....	47
4.9	Cenário de pesquisas.....	48
5	CONCLUSÃO .....	49
	REFERÊNCIAS .....	51
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63

# 1 INTRODUÇÃO

A agenda 2030, que é o plano de ação acordado entre países membros da ONU, tem como objetivos principais acabar com a pobreza, construir sociedades justas e inclusivas, com acesso à saúde e saneamento. Seguindo os objetivos de uma sociedade justa e igualitária tem-se o ODS 7- Energia limpa e acessível, que pode ser descrito como um meio de assegurar o acesso confiável, sustentável e moderno, a preço acessível para todos, desta modalidade de energia elétrica. Dentro do objetivo geral, uma das metas é aumentar a participação de energias renováveis na matriz, melhoria da eficiência energética, expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para fornecimentos de serviços.

De acordo com dados divulgados pelo MCTIC, as estimativas de emissões por setor dos anos de 1990 a 2016, foram observadas uma redução nos setores de Energia e processos industriais, como mostra a Figura 1.

**Figura 1 - Estimativas de emissões setoriais, em CO<sub>2</sub>eq (GWP 100 anos, SAR IPCC, 1995), de 1990 a 2016.**



Adaptado MCTIC, 2019

Baseado na Figura 1 (MCTIC, 2019), pode-se observar que as emissões totais em 2016, foram 2,4% maiores que 2015. Porém pode-se observar também uma redução 7,0% no setor de energia e 6,3% nos processo industriais, essa redução deve-se a diminuição de

atividade industrial, consumo de combustíveis fósseis, aumento de oferta interna de energia por fontes hidráulicas e expansão eólica.

**Tabela 1 - Resultado de emissões de gases de efeito estufa em 2016**

<b>TOTAL DE EMISSÕES LIQUIDAS 2016 - 1.305,6 MILHÕES DE TONELADAS DE CO<sub>2</sub>eq (GWP 100 anos. SAR IPCC, 1995)</b>								
<b>SETORES</b>	<b>EMIÇÃO TOTAL</b>	<b>CONTRIBUIÇÃO DO SETOR (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>HFC</b>	<b>PFC</b>	<b>SF<sub>6</sub></b>
ENERGIA	422,5	32,0%	399,8	12,7	10,0	-	-	-
PROCESSOS IND.	90,1	7,0%	78,1	0,8	0,5	10,2	0,3	0,2
AGROPECUARIA	439,2	34,0%	-	274,8	164,4	-	-	-
MUDANÇA DE USO DA TERRA	290,9	22,0%	269,0	14,1	7,8	-	-	-
TRATAMENTO DE RESIDUOS	62,9	5,0%	0,2	60,2	2,4	-	-	-

Fonte: MCTCI, 2019

De acordo com o MCTIC, 2019 e com o decreto 9.578/2018 que visa acompanhar o compromisso de redução de emissões, citam que para o setor Energia, considera o percentual de redução de emissões de gases de efeito estufa de 27% em relação ao projetado para 2020.

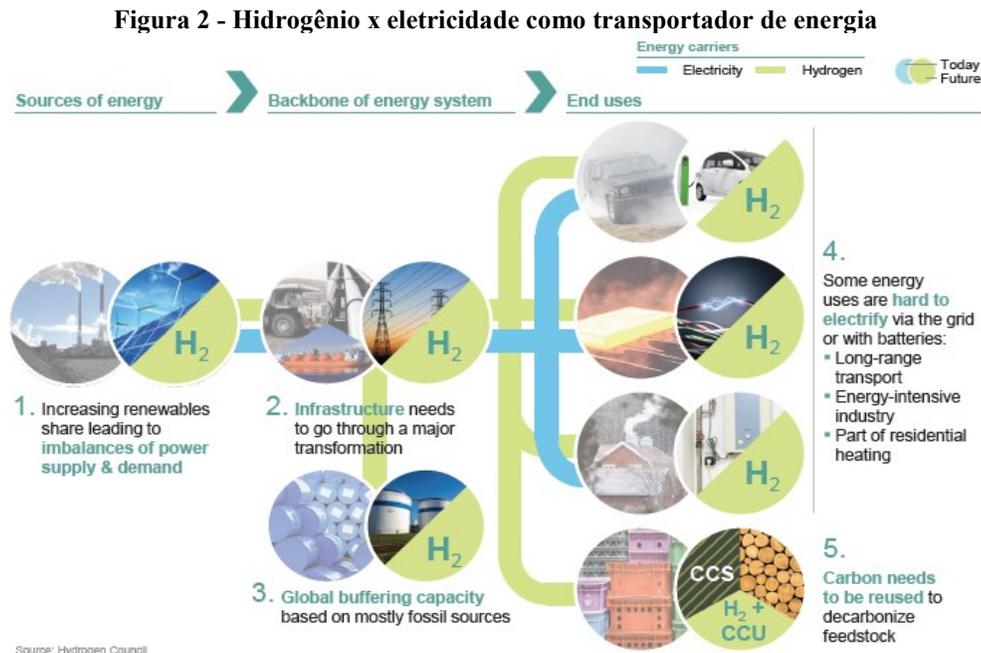
Esse compromisso em redução de emissões vem de encontro às pesquisas relacionadas ao uso do Hidrogênio, uma vez que o mesmo não emite GEE (gases de efeito estufa).

O relatório do CGEE (2010) cita que no caso do Brasil, que possui recursos naturais renováveis abundantes e cuja matriz energética possui elevada participação de fontes energéticas renováveis, o desenvolvimento de tecnologias para economia do hidrogênio certamente contribuirá para uma utilização mais eficiente dessas fontes energéticas.

Acreditando no potencial do uso do hidrogênio, foi formado em 2015, o HYDROGEN COUNCIL, que reúne empresas do setor da indústria e energia com o objetivo de acelerar e expandir o desenvolvimento do mesmo e das células no mundo.

Hydrogen is a versatile, clean, and safe energy carrier that can be used as fuel for power or in industry as feedstock. It can be produced from (renewable) electricity and from carbon-abated fossil fuels. It produces zero emissions at point of use. It can be stored and transported at high energy density in liquid or gaseous form. It can be combusted or used in fuel cells to generate heat and electricity. (HYDROGEN COUNCIL, 2017, p.5)

Ainda de acordo com o documento da HYDROGEN (2017), o aumento da participação das fontes renováveis na matriz energética até 2050, deve ser de 3 a 5 vezes. Apesar do uso de combustíveis fósseis ainda apresentar uma grande parcela, faz-se necessários novos transportadores de energia, que mantenham a qualidade da energia prestada ao consumidor final, nesse âmbito destaca-se o hidrogênio e as linhas de transmissão de eletricidade, quando falamos em descarbonização.



Fonte : Hydrogen Council - Adaptado

Conforme a Figura 2 conseguimos avaliar os desafios que devem ser superados para a transição para uma economia de baixo carbono.

De acordo com o último relatório gerado pela Hydrogen Council (2020), tem-se a previsão que os custos de hidrogênio com baixo carbono entregues diminuam acentuadamente na próxima década. Os custos mais baixos de produção e distribuição irão contribuir para reduzir os custos de hidrogênio fornecidos. Isso devido aos custos decrescentes da geração de eletricidade renovável, ampliação da fabricação de eletrolisadores e desenvolvimento de instalações de armazenamento de carbono de baixo custo.

### **1.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de revisão do uso do hidrogênio na matriz energética e suas tecnologias, produção, armazenamento e geração de energia elétrica. Fazer um levantamento das pesquisas em desenvolvimento, aplicação do hidrogênio na indústria e as perspectivas de uso do recurso, avaliando dessa forma o potencial para possível inclusão do mesmo na matriz.

### **1.2 Objetivos específicos**

Para cumprir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão cumpridos:

- Analisar as pesquisas acerca de desenvolvimento de tecnologia do hidrogênio;
- Investigar as formas de extração do hidrogênio;
- Investigar os tipos de células e tecnologias utilizadas;
- Identificar as principais aplicações;
- Identificar o motivo da evolução em pesquisas em energia do hidrogênio.

### **1.3 Metodologia**

De acordo, com Lakatos e Marconi (2002, p.185):

A pesquisa bibliográfica, ou de fontes secundárias, abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico etc., até meios de comunicação oral: rádio, gravações em fita magnética e audiovisuais: filmes e televisão.

A pesquisa bibliográfica contida neste trabalho refere-se a temas relacionados ao uso do hidrogênio, com o intuito de compreender a tecnologia, o avanço dos estudos dessa área, e se dará por meio de pesquisas bibliográficas focadas em estudos, artigos e pesquisas tenham como princípio o uso do hidrogênio na geração, produção e armazenamento de energia.

#### **1.4 Organização do trabalho**

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos, onde o primeiro capítulo diz respeito à introdução, apresentando o tema da pesquisa, objetivos e a metodologias de pesquisa utilizadas no decorrer do trabalho. O segundo capítulo apresenta o referencial bibliográfico com os principais conceitos a respeito do tema. No capítulo três serão apresentados os métodos de Armazenamento, Transporte e Distribuição. No quarto capítulo são apresentados os diferentes usos do hidrogênio, através das células. No capítulo cinco apresenta-se a conclusão acerca do tema obtido ao final deste trabalho. Posteriormente são apresentadas as referências utilizadas ao longo do trabalho e sugeridos alguns temas de trabalhos futuros, envolvendo o tema estudado, com o intuito de obter um aprofundamento.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo será apresentado de forma breve um levantamento bibliográfico sobre os assuntos pertinentes ao tema, com o objetivo de proporcionar uma melhor compreensão sobre a importância do desenvolvimento e pesquisa no setor de fontes de energias que possam ser associadas ao uso do hidrogenio.

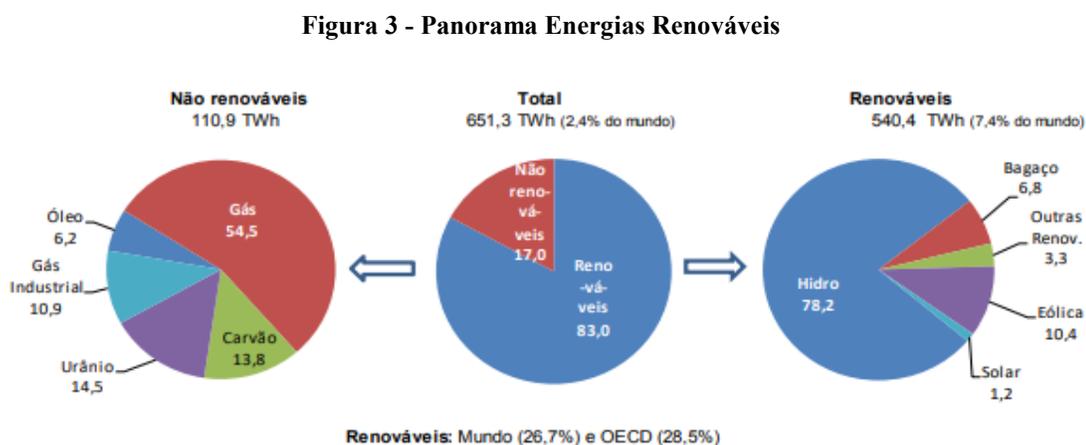
### 2.1 Fontes de Energia

Tem-se por definição energia renovável toda aquela obtida a partir de um recurso renovável.

Devido ao crescimento de pesquisas que envolvam meios de obtenção de energia limpa e os avanços das tecnologias, isso proporcionou um aumento da participação das fontes renováveis na Matriz energética.

Segundo HALLACK e LOSEKAN (2018) as energias renováveis no Brasil são um caso de sucesso: a participação de fontes renováveis na matriz de geração brasileira é de 85%.

Já de acordo com a última Resenha Energética do Ministério de Minas e Energia, de 2019 temos uma participação de renováveis em 83% da matriz energética, conforme mostra a figura 3.



Adaptado: Resenha Energética Brasileira – 2019

Segundo a ANEEL:

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água. Assim como a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica. Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial.

Já no que se refere à energia solar fotovoltaica, CARDOSO (2019) descreve um sistema fotovoltaico como um conjunto de elementos necessários para a conversão direta da energia solar em energia elétrica. A publicação do CRESESB (2006) elucida que esse a conversão direta da luz em eletricidade, o então chamado efeito fotovoltaico, foi relatado por Edmond Becquerel em 1839, e ocorre quando a absorção de luz promove uma diferença de potencial na estrutura de material semicondutor.

Outra fonte que tem grande destaque no cenário energético brasileiro é a biomassa, isso devido a grande parte do território brasileiro estar inserido na região do planeta mais propensa à produção de biomassa. Sobre a geração de bioeletricidade a partir da Biomassa de Cana de açúcar, levando-se em consideração a avaliação da quantidade de energia já contratada pelo setor e o seu potencial técnico, evidenciando assim a possibilidade de ampliação de capacidade, dessa forma colocando a mesma com uma fonte importante na matriz. Estima-se um potencial atual de 9,6 GW, que atingirá pouco mais de 17 GW em 2020 (TOMALSQUIM, 2003).

Ainda sobre as fontes de energias renováveis que geralmente são utilizadas no processo para obtenção do hidrogênio temos a energia obtida através das marés. No trabalho realizado por ALMEIDA, et. al, (2019 ) é relatado que a energia maremotriz origina-se da ação e atração das ondas em relação a lua gerando a energia cinética das mesmas e da energia potencial gerada pela diferença de altura entre as mares alta e baixa.

BERNARDI, 2020 cita em seu trabalho que é possível obter energia maremotriz de dois tipos, o “Seaflo” que é pela energia cinética das correntes devido às marés e a modelo represa, que é pela energia potencial, devido à diferença de altura entre as marés alta e baixa.

A energia nuclear apesar de não ser renovável como as demais citadas anteriormente, possui um papel importante no que se refere às possibilidades de inserção do hidrogênio na matriz energética.

Segundo o Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro do CENEN, (2020, p.17), dá-se o nome de energia nuclear a energia que mantém prótons e nêutrons juntos no núcleo de um átomo mantendo a estrutura do mesmo.

A forma encontrada para utilização dessa energia é baseada nas técnicas de fusão de hidrogênio e fissão nuclear de elementos como o e Urânio, (CARDOSO, 2012). O Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro do CENEN, (2020, p.17), define energia atômica ou energia nuclear como:

Energia que é liberada por meio de uma reação nuclear ou processo de decaimento radioativo. De particular interesse é o processo conhecido como fissão, que ocorre em um reator nuclear e produz energia geralmente na forma de calor. Em uma usina nuclear, esse calor é usado para produzir energia elétrica.

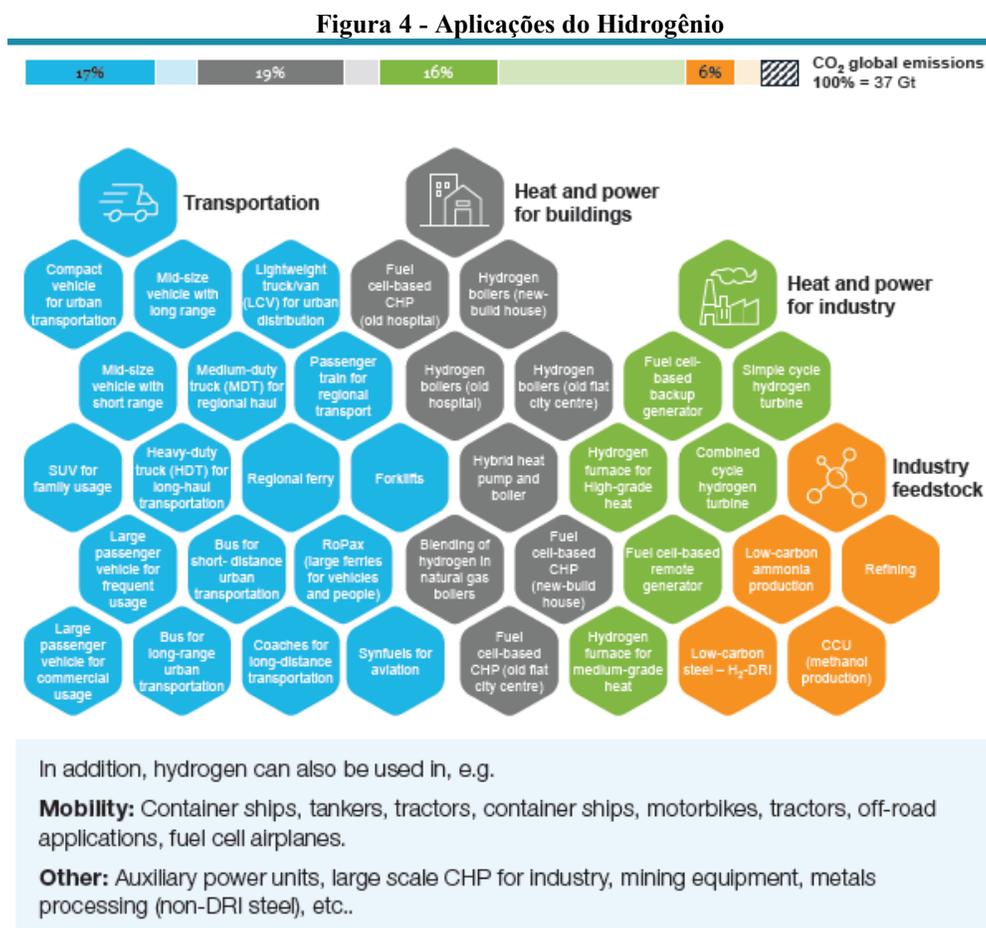
## **2.2 Energia do Hidrogênio**

Com o objetivo de reduzir o uso dos combustíveis fósseis, várias pesquisas estão sendo realizadas para tornar a economia mais verde, através de desenvolvimento de novas tecnologias em energias menos poluentes.

O documento técnico Hidrogênio Energético do CGEE (2010), cita o hidrogênio como uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis nos transportes, uma vez que o mesmo apresenta baixos impactos.

LUBE (2012), diz que o uso do Hidrogênio como combustível poderá contribuir para superar os desafios no setor energético, uma vez que o mesmo pode ser produzido por várias fontes de energia, outro ponto crucial é que o do uso mesmo não desencadeia grandes problemas com poluição uma vez que o subproduto de sua queima é H<sub>2</sub>O, além do hidrogênio não emitir GEE (Gases de Efeito Estufa), desde que obtido através de fontes renováveis promovendo, portanto melhoria na saúde pública e redução da poluição.

Ainda de acordo com LUBE (2012), uma matriz energética baseada em fontes renováveis seria um fator chave para a redução dos impactos ambientais gerados pelo homem. O uso do hidrogênio como combustível possibilita sua utilização em diversas aplicações, conforme demonstrado na figura 4.



### 2.2.1 Características do hidrogênio

O hidrogênio em condições de pressão e temperatura ambiente este composto é encontrado como um gás incolor, inodoro e mais leve que o ar.

Segundo LEPECKI (2011, p.1),

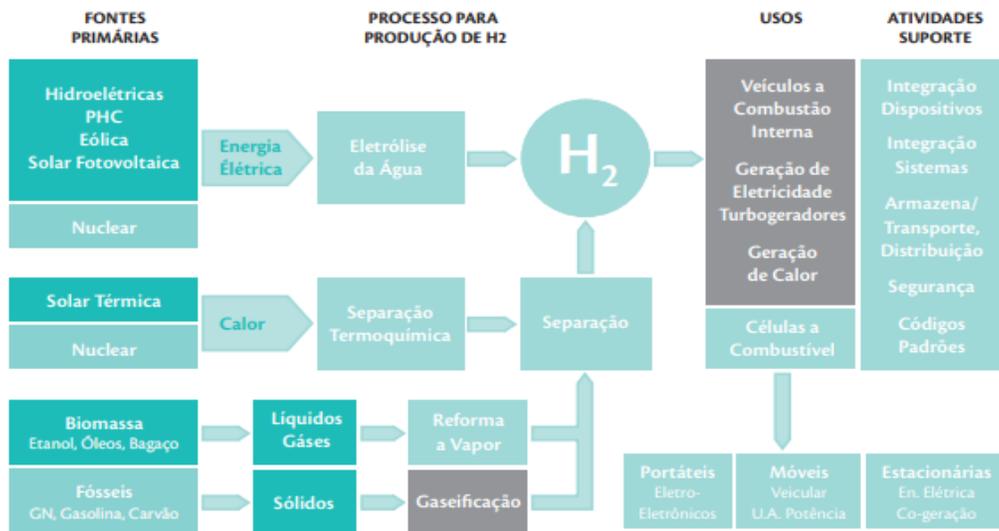
A queima de hidrogênio para a produção de energia produz menos poluentes atmosféricos que os combustíveis fósseis. O hidrogênio normalmente existe combinado com outros elementos, como o oxigênio na água, o carbono no metano e demais compostos orgânicos. Como é quimicamente muito ativo, raramente permanece elementarmente puro. O hidrogênio ligado em compostos orgânicos e na água constitui 70% da superfície terrestre. A quebra destas ligações químicas permite produzir hidrogênio e, então, utilizá-lo como combustível.

Quando comparamos o hidrogênio a outros combustíveis, este apresenta maior valor energético, pois é considerado mais leve e não apresentam átomos pesados de carbono. Por ser sempre ligado a outros elementos, o hidrogênio não pode ser considerada uma fonte primária de energia, mas sim, uma fonte intermediária, pois é necessário o emprego de energia em uma fonte primária para sua obtenção (SANTOS, 2013)

Ainda de acordo com SANTOS (2013), o hidrogênio é descrito como um combustível comumente utilizado nos programas espaciais. O mesmo é tido como ideal para uso em células de combustível devido a sua alta reatividade e sua oxidação produzir água como subproduto.

As principais formas de produção e utilização do hidrogênio são mostradas na Figura 5.

**Figura 5 - Possíveis rotas de produção do Hidrogênio como vetor energético**



Fonte: Adaptado CGEE

### 2.2.2 Extração do Hidrogênio

Existem varias formas de realizar a extração do hidrogênio, nessa seção iremos discorrer sobre algumas possibilidades.

#### Biomassa

“Do ponto de vista energético a biomassa é toda matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia” (CARDOSO, 2012).

Para obtenção do hidrogênio a biomassa deve ser transformada em Biogás e este passará por uma etapa de filtragem.

De acordo com CORRAES, BARBOSA E FREIRE (2020), podemos utilizar o termo biomassa para referir-se a matéria rica em carbono proveniente de organismos vivos, em uma escala mais recente de tempo. Esse trabalho ainda mostra que existem varias formas de obtenção de energia utilizando a biomassa, e basicamente são: biocombustíveis, gaseificação, digestão anaeróbica, pirólise e combustão direta.

LEME (2017) em sua pesquisa explica sobre os tipos de conversão energética da biomassa, como a gaseificação, recuperação de energia de resíduos sólidos e gás de aterros sanitários além dos biocombustíveis para o setor de transportes, serão relatados alguns dos meios de conversão citados.

A gaseificação pode ser definida como a conversão de uma matéria prima rica em carbono, no estado líquido ou gasoso, através de sua oxidação parcial em gás de síntese ((LIRA, 2017)

Conforme citado no documento Hidrogênio Energético (CGEE, 2010), o processo de gaseificação assim como os processos que utilizam biomassa só são atingidas para equipamentos de grande porte, destacando a mesma como a mais indicada das tecnologias para a produção de maiores quantidades de hidrogênio.

Já recuperação de energia a partir de resíduos pode ser utilizada na produção de Biogás. O mesmo é obtido a partir da decomposição do material orgânico. Existe uma gama dos resíduos orgânicos que podem ser utilizados na produção de biogás torna esse método bastante amplo e uma alternativa para o aproveitamento do lixo orgânico. LEME (2017)

### **Eletrólise**

FURLAN (2012) elucida em seu trabalho que a processo eletroquímico de dissociação da água, onde os produtos finais das reações desencadeadas são hidrogênio e oxigênio moleculares, dessa reação obtém-se, portanto o hidrogênio. Basicamente é aplicada uma diferença de potencial entre dois eletrodos em um meio conduto líquido ou sólido ocorrendo uma decomposição através do fornecimento de uma corrente contínua. Aplicando uma força eletromotriz a partir de um potencial mínimo ocorre a passagem de corrente para os eletrodos, estimulando o transporte de hidrogênio para o catodo e oxigênio para o anodo.

O relatório do CGEE (2010) elucida que a Eletrólise da Água é o processo mais versátil de produção, uma vez que podem ser construídos equipamentos para geração de gás puro numa faixa ampla (0,5 L/min a 100.000 m<sup>3</sup> /h.), mas que para redução dos custos da

produção devem ser reduzidos os custos com equipamentos e o consumo de eletricidade, o relatório ainda sugere alguns meios através de pesquisas e estudos, como por exemplo:

- Desenvolvimento de materiais poliméricos e metálicos mais baratos e com resistência química adequada, catalisadores para os eletrodos, conseguindo de essa forma diminuir o consumo de eletricidade, além de membranas resistentes do ponto de vista químico e mecânico;
- Aumento da temperatura de operação dos eletrolisadores;
- Desenvolvimento da eletrônica de potência mais eficiente e com baixo custo.

### **Reforma a Vapor**

Já a reforma a vapor é um processo adequado para produção distribuída de quantidades intermediárias de hidrogênio, com intervalo estimado de 50 m<sup>3</sup> /h a 500 m<sup>3</sup> /h. Os reformadores de etanol ainda estão em fase de desenvolvimento no país e a tecnologia é similar à empregada na reforma do gás natural. (CGEE, 2010)

O processo de reforma a vapor é o processo mais empregado para a produção de hidrogênio em escala industrial. Trata-se de processo catalítico em mais de uma etapa, endotérmico e que promove a conversão de uma mistura de hidrocarboneto e vapor de água. Como principais vantagens para o uso desse tipo de reforma pode-se citar: o alto rendimento da produção de hidrogênio, não exige planta de oxigênio no local, apresenta menor risco de inflamabilidade. A desvantagem desse processo é o fato dele ser endotérmico, resultando em um maior gasto energético. (DA SILVA, C. H. F. et al., 2009, p.2).

De acordo com LEME (2017), esse processo é utilizado quando não é viável transportar e armazenar hidrogênio.

### **Pirólise a Plasma**

A pirólise a plasma poderia ser utilizada no país para a produção de hidrogênio, reduzindo as emissões de GEE e a diminuindo de maneira eficaz a emissão de contaminantes. Observa-se também que a disponibilidade de energia proveniente de hidrelétricas favorece essa tecnologia, conforme apontado por DA COSTA LABANCA (2007).

WANGHON (2018) refere-se à pirólise como uma das formas mais limpas de produção do hidrogênio visto que não há formação de gases. Para a extração do hidrogênio é aplicado um arco elétrico em um hidrocarboneto gasoso, e o resultado obtido desse processo é a separação de hidrogênio e carbonos puros.

Uma vantagem da produção de hidrogênio pela decomposição via plasma de um hidrocarboneto é o fato de não se utilizar oxigênio no processo, assim não é necessário possuir uma unidade separadora de ar que conseqüentemente reduz o consumo energético. (DA COSTA LABANCA, 2007).

## **Nuclear**

Os reatores protótipos HTRS, são os geradores da primeira geração desenvolvidos nos anos 50 e 60. Já na segunda geração foram desenvolvidos os Light Water Reactor – (LWR), Pressurized Water Reactor (PWR), Boiling Water Reactor – (BWR), etc., na década de 70 e 80. E os mais avançados os reatores da terceira geração, *European Pressurised Reactor - EPR*, *SWR-1000*, *Advanced Boiling Water Reactor - ABWR*, *AP1000*, *ACR1000*, *VVER91*. As maiorias dos reatores em funcionamento pertencem à segunda geração. Os geradores da quarta geração ainda estão em pesquisa e desenvolvimento *Very High Temperature Reactor – VHTR*, projetados para serem mais sustentáveis, viáveis economicamente, sendo dessa forma ser utilizada para geração de eletricidade e de hidrogênio. KONIGAME; DAS NEVES CONTI. (2017).

De acordo com PALADINO (2013), a energia nuclear é capaz de fornecer energia na forma de calor e eletricidade, além de possibilitar uma alta eficiência, devido à alta temperatura. Dessa forma acaba sendo natural a combinação dos processos de produção do hidrogênio com a geração de energia nuclear, pois para a produção de hidrogênio é necessário uma quantidade muito grande de energia e a necessidade de alguns dos processos de produção utilizam energia em forma de calor, sendo as duas características inerentes do processo nuclear, fazendo essa associação uma escolha natural. Importante

ressaltar como o processo não é proveniente de combustíveis fósseis, o hidrogênio produzido é considerado um combustível limpo.

KONIGAME; DAS NEVES CONTI (2017) elucida em sua pesquisa sobre os reatores da quarta geração, que a produção de hidrogênio ocorre de duas formas: processo termoquímico ou eletrolise de alta temperatura. Na eletrolise de alta temperatura necessita de temperaturas muito elevadas, sendo, portanto o reator de quarta geração a melhor escolha para conexão à planta de hidrogênio.

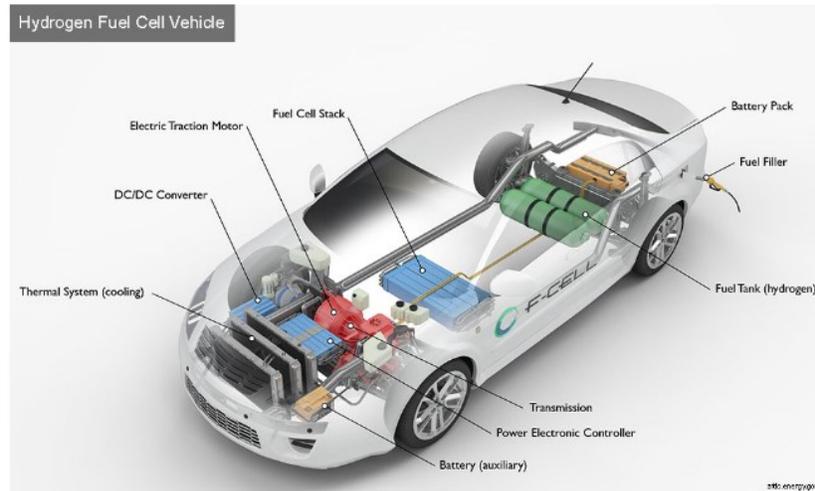
PALADINO (2013), concluiu que para o desenvolvimento da produção de hidrogênio, é preciso desenvolvimento tecnológico dos reatores de quarta geração, sem o domínio da tecnologia e recurso para construção, o processo não é viável como o da Eletrólise.

### **2.3 Células a Combustível**

Uma das tecnologias ligadas ao hidrogênio mais pesquisadas sem sombra de dúvida é a célula de combustível, uma excelente opção quando se refere ao armazenamento, na figura 6 temos um infográfico de um veículo que utiliza a célula de hidrogênio.

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. WANGHON (2018, p. 29)

**Figura 6 - Infográfico- Veículo Célula de Hidrogênio**

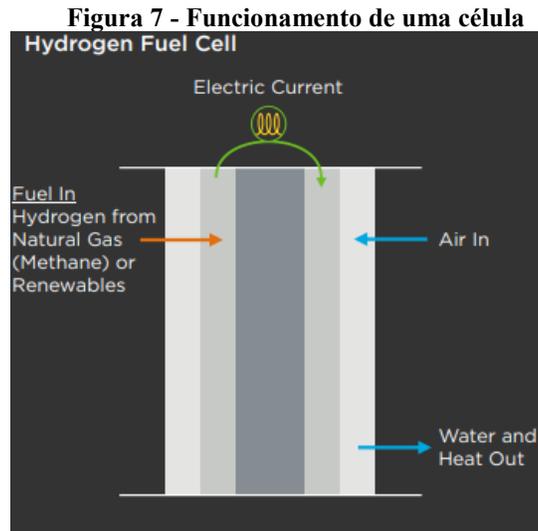


Adaptado: AFDC

De acordo com Departamento de Tecnologia de Células de Combustível e Hidrogênio do EERE (Energy Efficiency & Renewable Energy, 2015), as células podem ser usadas em variadas aplicações, como transporte, aplicação de energia estacionária portátil e de emergência. Podem operar com maior eficiência que motores de combustão e converter energia química do combustível em energia elétrica com uma eficiência de até 60%. Além das células serem silenciosas durante a operação as mesmas liberam apenas água como subproduto.

### 2.3.1 Funcionamento das células

As células de combustível possuem funcionamento como o das baterias, mas não se esgotam ou precisam ser recarregadas. Produzem eletricidade e calor enquanto o combustível é fornecido. Basicamente, de acordo com o descrito pelo EERE (2015) e conforme ilustrado pela figura 7 o funcionamento de uma célula de combustível a hidrogênio. Em uma célula a combustível de hidrogênio, um catalisador no ânodo separa moléculas de hidrogênio em prótons e elétrons, que percorrem caminhos diferentes para o cátodo. Os elétrons passam por um circuito externo, criando um fluxo de eletricidade. Os prótons migram através do eletrólito para o cátodo, onde se unem ao oxigênio e aos elétrons para produzir água e calor.



Adaptado EREE,2015

### 2.3.2 Características

Conforme destacado WANGHON (2018), podemos destacar como principais características de uma célula:

- Quando abastecida com hidrogênio puro, a mesma não emite GEE;
- Subproduto do processo, o vapor de água (calor + água), pode ser utilizado para aquecimento ou ainda para produzir mais eletricidade ao alimentar uma micro turbina a vapor;
- Alta eficiência;
- Observado uma eficiência em média 25% maior que motores a combustão.

### 2.3.3 Tipos de Células

Quanto ao tipo de células, temos uma variedade, de acordo com LINARDI (2011):

AFC (Célula a Combustível Alcalina) - as células alcalinas (Alkaline Fuel Cell). Este tipo de célula ultimamente tem suas aplicações restritas como naves espaciais ou situações onde há disponibilidade de hidrogênio ultrapuro. Ela foi a precursora das células mais modernas.

PEMFC (Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons) - (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), ou PEMFC e operam na faixa de temperatura ambiente até 80°C. São as mais promissoras como alternativa para a substituição aos motores a combustão interna. Possuem as vantagens de serem robustas, baixa (ou nenhuma) emissão de poluentes, fácil acionamento e desligamento, possuem alta eficiência. LINARDI, (2011)

DMFC (Célula a Combustível de Metanol Direto) – Diferencia-se da PEMFC, principalmente pelo uso do metanol diluído em água como combustível ao invés de hidrogênio puro e temperatura de operação entre 50 e 200° C, esta tecnologia não é indicada para uso em veículos, pois ocorre formação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no fim do processo. (WANGHON, 2018)

De acordo com a publicação de revisada HOFFMAN (2012, p. 196), sobre as PAFCs (Célula a Combustível de Acido Fosfórico):

Typically designed for stationary power applications, phosphoric acid fuel cells (PAFCs) operate with about 55 percent efficiency at temperatures of 160 ° C to 220 ° C, up to 90 percent in combined heat and power applications when wasteheat is used for cogeneration. The electrolyte consists of concentrated phosphoric acid.

Essa célula é mais utilizada para geração de energia estacionaria, e a mesma possui um reformador capaz de extrair hidrogênio de diferentes combustíveis e um purificador. Portanto essa célula tem a possibilidade de ser abastecida com outros combustíveis. (WANGHON, 2018)

SOFC (Célula a Combustível de Óxido Sólido) - De acordo com o documento divulgado pela EPA (Environmental Protection Agency) – Catalog of CHP Technologies – (Combined heat and power) (2015), essa célula é formada por um eletrólito de óxido não poroso, o que confere à célula alta eficiência e estabilidade. Já WANGHON (2018), cita que esse tipo de célula tem sido utilizado em geração de energia em unidades estacionárias.

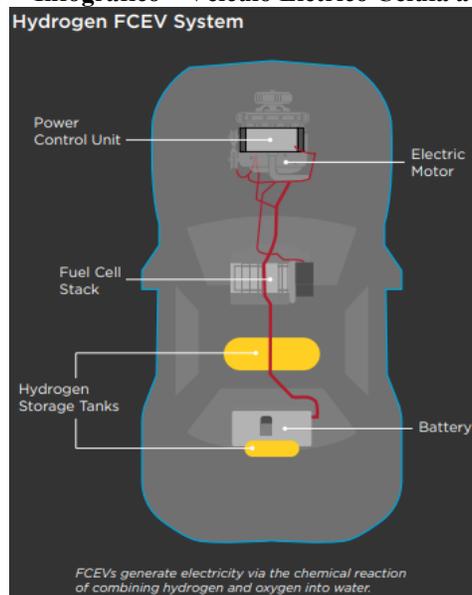
O trabalho ainda descreve que devido essa célula trabalhar com altas temperaturas favorece a cinética das reações e permitindo assim a reforma do combustível primário.

MCFC (Célula a Combustível de Carbonato Fundido) - essas células operam em altas temperaturas, por esse motivo são utilizados metais não preciosos como catalisadores, o que tornam seu custo mais baixo. Ela é formada por eletrólito de carbonato fundido, suspensa em uma matriz de oxido de alumínio e lítio. (NOGUEIRA JUNIOR, 2017)

DEFC (Célula a Combustível de Etanol Direto) - Esta célula não exige que seja realizada a reforma previa do combustível, uma vez que a mesma é a abastecida por etanol. Devido ao toda infraestrutura do Etanol já existente no Brasil, essa célula se torna uma boa opção para aplicação no país. (WANGHON, 2018)

Abaixo infográfico de um veiculo elétrico Célula a Combustível de uma forma simplificada.

**Figura 8 -- Infográfico – Veículo Elétrico Célula a Combustível**



### **3 MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO.**

LEPECKI (2011) menciona o uso do hidrogênio como transportador (vetor) de energia reduziria a dependência do petróleo, dessa forma reduzindo a poluição e as emissões de gases de efeito estufa, desde que a fonte primária de energia para sua produção não seja um combustível fóssil.

Ele ainda enfatiza que o hidrogênio é um transportador e não uma fonte de energia, já que o ele consome energia em sua obtenção, que é inclusive um dos grandes desafios.

#### **3.1 Armazenamento de Hidrogênio**

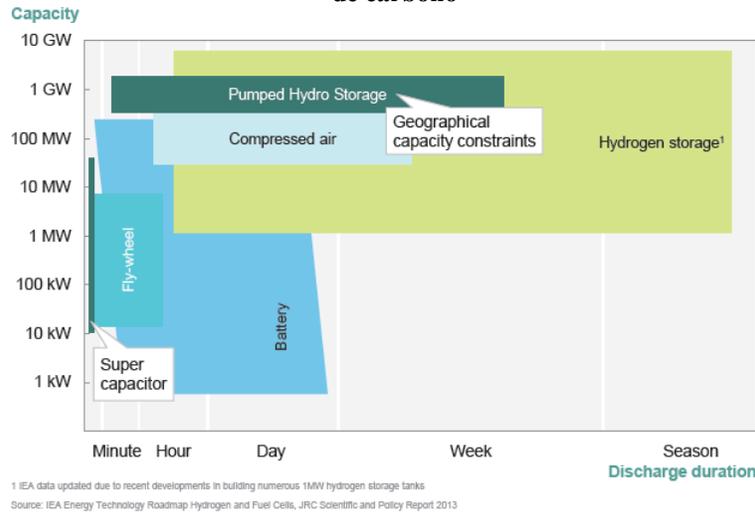
A utilização do hidrogênio como forma de armazenagem da energia produzida por fontes renováveis intermitentes (solar e eólica) é fundamental para a ampliação da inserção destas tecnologias em sistemas isolados da rede. (CGEE, 2010)

Os principais estados em que o hidrogênio pode ser transportado e armazenado são: estado gasoso, como gás comprimido, estado líquido, como hidrogênio liquefeito e compostos intermediários, como hidreto metálico e sistemas com base de carbono (PALADINO, 2013).

MOURA (2020) define como uso dinâmico o monitoramento constante do nível de hidrogênio. Quando se atinge o mínimo a produção e armazenamento são iniciados, para que não falte hidrogênio. A energia gerada que não é consumida para a produção alimenta a rede até que o sistema seja acionado e a energia para a produção de hidrogênio seja requerida.

Avaliando 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, conforme ilustrado na figura 9:

**Figura 9 - Comparação de capacidades entre métodos de armazenamento de energia sem emissões de carbono**



Fonte: Hydrogen Council (2017)

Em seu trabalho LUBE (2012) relata sobre o uso de nanotecnologia como uma possibilidade de viabilizar uma forma mais segura e eficiente de armazenamento de hidrogênio.

### 3.1.1 Hidrogênio Gasoso

De acordo com relatório de Produção, Armazenamento de Hidrogênio do IEA (2006), o método mais comum de armazenamento na forma gasosa é em tanques de aço, tem-se se tornando comum o uso de tanques feitos de materiais mais leves, projetados para suportar altas pressões.

A principal vantagem de armazenamento do hidrogenio comprimido ou gasoso é a agilidade para reabastecimento, algo em torno de 3 a 5 min, mas em contrapartida temos a necessidade de vasos mais robustos para suportar altas pressões. Além da preocupação com a segurança no armazenamento que deve ser levada em consideração, os cilindros geralmente utilizados em veículos operando com células a combustível são regulamentados

de acordo com a ABNT NBR NM ISO 11439:2019. (GUPTA, BASILE e VEZIROGLU, 2015).

O hidrogênio comprimido a frio também tem sido considerado no EUA, pois é possível reduzir os custos de armazenamento do mesmo. O hidrogenio tem sua densidade aumentada, e a massa reduzida. Nesse processo o hidrogenio é resfriado a 90 K (-183,15°C) em seguida o mesmo é comprimido a uma pressão mais alta, algo em torno de 50 Mpa. Para esse tipo é necessário que o vaso suporte altas pressões, é requerido que o mesmo seja isolado a vácuo, mantendo dessa forma a temperatura fria quando o veiculo não estiver sendo utilizado. (GUPTA, BASILE e VEZIROGLU, 2015).

Este relatório IEA (2006), também destaca o uso de microesferas de vidro para armazenagem dos mesmos. As esferas ocas são cheias com H<sub>2</sub> a alta pressão (350-700 Bar) e temperatura (300° C), em seguida essas são resfriadas à temperatura ambiente e transferidas para o tanque do veículo de baixa pressão. Após esse processo as esferas são novamente aquecidas a valores próximos a 200-300° C ocorrendo dessa forma a liberação do H<sub>2</sub>.

### **3.1.2 Hidrogênio Líquido**

WANGHON (2018) cita em seu trabalho que a melhor forma de armazenar o hidrogênio evitando as altas pressões do gás comprimido, seria armazená-lo na forma líquida. Esta ainda apresenta maior capacidade de armazenamento, se comparada à gasosa e conseqüentemente também uma maior autonomia energética, e economia no transporte.

Ainda de acordo com WANGHON (2018), apesar da vantagem apresentada acima, esse tipo de armazenamento apresenta um obstáculo que é a manutenções realizadas a temperaturas muito baixas (- 235° C), isso demanda um sistema de isolamento mais sofisticado para evitar a troca de calor e ainda um gasto energético.

Devido aos problemas relacionados às perdas térmicas durante o reabastecimento, o sucesso do armazenamento de hidrogenio líquido depende da melhoria do isolamento,

projeto do vaso e eficiência da estrutura de liquefação. (GUPTA, BASILE e VEZIROGLU, 2015).

### 3.1.3 Hidretos Metálicos

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. (WANGHON, 2018, p. 27)

Segundo GONZATTI (2017), a tecnologia dos hidretos metálicos surgiu no início dos anos 70, de simples operação e ausência de partes móveis, possui segurança, confiabilidade. O método consiste em realizar uma ligação química entre um hidrogênio e um metal (ou liga), armazenando o hidrogênio em forma de hidreto metálico. Sob alterações termodinâmicas (pressão e temperatura), essa ligação pode ser desfeita e dessa forma o hidrogênio é liberado.

Existem ainda os “hidretos complexos”, ao contrario das soluções solidas dos hidretos metálicos, os complexos são constituídos de elementos alcalinos e alcalino-terrosos ionicamente ligados a um ânion complexo, que podem ser átomos centrais tipicamente de transição ou metais do grupo principal (Fe, Ni, B, Al) ou outros para os quais o hidrogenio é covalente. Nesses hidretos assim como nos metálicos, a reação pode ser endotérmica após a liberação de hidrogenio.

## 3.2 Transporte e Distribuição do Hidrogênio

Para que o transporte de hidrogênio se torne economicamente viável, o setor precisa ampliar sua infraestrutura, com o objetivo de chegar a níveis semelhantes ao GLP - gás natural líquido. (HYDROGEN COUNCIL,2020)

Descrito com um dos gargalos para o uso do hidrogênio, o relatório do CGEE (2010), que se refere ao Hidrogênio energético, destaca que a forma mais econômica de transporte do hidrogênio para os centros distribuidores e consumidores é por tubo vias

transporte do hidrogênio. Porém, existem ainda severas restrições para a implantação e consolidação das tubovias no mercado de hidrogênio. Um dos principais motivos é que os custos de implantação são elevados e a demanda de hidrogênio a ser transportado ainda é baixa.

O transporte de hidrogenio exige a instalação de gasodutos e gasto de energia para bombeamento do gás. Isso implica em custos tanto de instalação como de operação. Por outro lado, a produção distribuída realizada na garagem de cada empresa de ônibus, não exige preocupação com a distribuição do hidrogenio, ou seja, não é necessário instalar gasodutos na cidade e não envolve custo de bombeamento de gás. (PALADINO, 2013, p.27)

Como a distribuição do Hidrogênio, possui um custo elevado, isso se torna uma dificuldade. Existe ainda a necessidade de atenção mais criteriosa no processo, como por exemplo, as medidas de segurança, devido ao alto risco envolvido. (DINCER, et al. 2019).

No relatório final do PNE 2050, publicado no final do ano de 2020 pelo Ministério de Minas e Energia (MME) coloca como principal desafio a Elaboração de normatização para uso, transporte e armazenamento do hidrogênio:

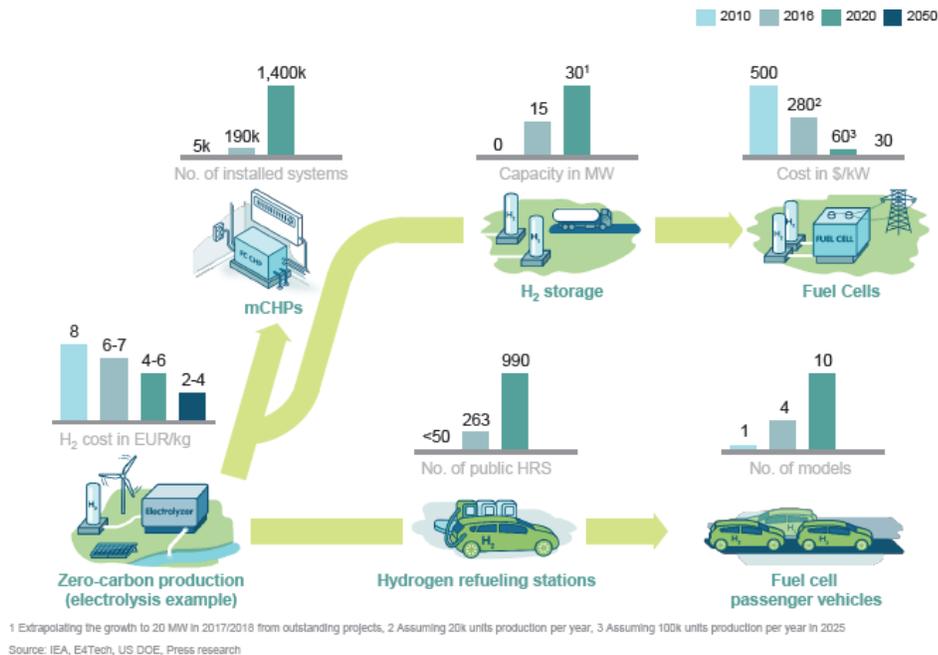
Desenhar aprimoramentos regulatórios relacionados à qualidade, segurança, infraestrutura de transporte, armazenamento, abastecimento, incentivo e utilização de novas tecnologias.

Imperioso avaliar por meio de estudos as barreiras ligadas à infraestrutura de transporte, armazenamento e abastecimento com o objetivo de definir os aprimoramentos regulatórios necessários, como, por exemplo, a regulação da mistura do hidrogênio com gás natural na malha de gás natural o que minimizaria a necessidade de construção de infraestrutura e custos associados. As questões associadas ao armazenamento geológico do hidrogênio podem ser resolvidas no âmbito da definição do arcabouço regulatório para a estocagem de gás natural. Questões relacionadas a baterias de hidrogênio, principalmente na interconversão em energia elétrica e integração com tecnologias comerciais já existentes podem ser resolvidas no âmbito da definição do arcabouço regulatório de geração e transmissão de energia. Questões técnicas e de segurança com relação a armazenagem de hidrogênio podem ser abordadas em regulamento próprio específico. Ademais, é necessário investir na requerida normatização (normas, códigos e padrões) para a introdução do hidrogênio no mercado consumidor, baseada nas melhores práticas internacionais. Nesse sentido, deve-se considerar os aspectos importantes de medição, da padronização dos equipamentos de geração de energia à base de hidrogênio, do reabastecimento, dos veículos de qualidade da mistura entre gás natural e hidrogênio, além de normas de segurança, devido ao alto grau de flamabilidade do hidrogênio. (Plano Nacional de Energia- PNE 2050, 2020, p.189)

## 4 USO DO HIDROGÊNIO NA MATRIZ ENERGÉTICA

Quando falamos em utilização estacionária do hidrogênio, no cenário brasileiro, as aplicações estacionárias de pequeno porte podem se beneficiar da interação das células combustíveis com fontes alternativas de energia, destacando a utilização das células em conjunto com fontes intermitentes de geração tais como micro centrais hidrelétricas, painéis fotovoltaicos e geradores eólicos, empregando o hidrogênio como meio armazenador, conforme citado no CGEE (2010)

Figura 10 - Exemplos de tecnologias que utilizam o hidrogênio



Fonte : Hydrogen Council , 2017

Este relatório (CGEE, 2010) aponta o desenvolvimento de pesquisas no Brasil, visando o emprego de células no transporte coletivo rodoviário de passageiros. Essa tendência vem ao encontro do grande potencial industrial brasileiro na produção de ônibus urbanos e à necessidade de melhoria do trânsito e conseqüentemente à redução de emissões poluentes em grandes cidades.

### 4.1 Uso de Células de Combustível

No mundo todo há inúmeras pesquisas e desenvolvimento de tecnologias que apresentam o uso das células, alguns casos já estão disponíveis no Brasil, serão citadas algumas aplicações de células de combustível.

### **Ônibus – movidos a Células de Combustível de Hidrogênio**

Podemos citar alguns casos já no Brasil da implantação de ônibus movido a hidrogênio.

O primeiro ônibus com tecnologia totalmente brasileira (MOLINA, et al.2011), foi desenvolvido pela COPPE/UFRJ. Já em São Paulo a EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos), também desenvolveu um ônibus que também é de fabricação brasileira, mas a tecnologia das células utilizadas é canadense.

Em 2012, a COPPE/ UFRJ, lançou uma segunda versão do veículo, mais eficiente e com custo de produção ainda menor que o anterior.

Em 2017 iniciou a produção da terceira versão, em entrevista concedida à ANTP (Agencia Nacional de Transportes Públicos – 2018, Paulo Emilio de Miranda, coordenador da Associação Brasileira de Hidrogenio (ABH2) que o protótipo é uma fabricação artesanal, isso explica o valor elevado de Produção (entre 1,5 milhão e 2 milhões), mas que com uma operação fácil e mais barata que o ônibus convencional. Ainda aponta que como o mesmo não possui caixa de marcha, fazendo com que em poucos anos esse investimento inicial se pague. Os ônibus da COPPE/UFRJ atuam dentro da UFRJ.

Já os ônibus da EMTU, circularam ate o ano de 2016 (Julho de 2015 a Março de 2016) e hoje se encontram parados, pois não houve mais parcerias para continuar com o projeto. Conforme relatado pela própria empresa em entrevista concedida ao Diário de Transporte (2018). Mesmo não tendo continuado em operação a EMTU/SP vê o projeto como sucesso devido ao conhecimento técnico e desenvolvimento que trouxe a indústria nacional.

**Figura 11 - Ônibus Híbrido**



Fonte: Adaptado de COPPE / UFRJ (2012)

Monica Saraiva Panik, pesquisadora que fez parte do projeto dos ônibus da EMTU em 2015, disse em reportagem à Revista Mercado e Tecnologia que esse projeto criou uma base sustentável para o desenvolvimento, produção do ônibus movidos à célula de hidrogenio no Brasil.

Em matéria publicada LOBO, (2020) retratava a aquisição de 20 ônibus de dois andares a hidrogenio na cidade de Birmingham, com previsão para inicio de funcionamento em Abril de 2021. Com uma capacidade de armazenamento de 48 kWh, utilizando células a combustível, veiculo ainda promete recarregamento em ate 7 minutos.

### **Veículos - movidos a Células de Combustível de Hidrogênio**

Quando foram confirmados os beneficios e a eficiência que poderiam ser obtidos ao utilizar as células, iniciou-se uma “corrida verde” envolvendo investimentos das empresas ramo automobilístico em pesquisas envolvendo células de combustível a hidrogênio. (WANGHON, 2018).

Seguindo essa onda de carros movidos à célula de combustível, o primeiro automóvel movido a célula a combustível comercializado em larga escala foi o Toyota Mirai, teve seu lançamento em 2014. O veículo quebra recorde de distância e prova ter

autonomia para atravessar mais de 500 km, com zero emissão de gases poluentes, liberando na atmosfera nada mais do que água em forma de vapor. (TOYOTA, 2015)

**Figura 12 - Toyota Mirai**



Fonte: Toyota Website (2015)

Em entrevista a revista Mercado e Tecnologia (2020), a especialista Monica Saraiva Panik citou a oportunidade de uso do hidrogenio em caminhões OTR para uso na construção e mineração como uma oportunidade de reduzir o consumo de diesel e descarbonizar as operações das minas, fazendo uso das tecnologias das células, seja nos veículos, instalações e matéria prima.

### **Trens – movidos a Células de Combustível de Hidrogênio**

Em 2018 entraram em operação na Alemanha, os primeiros dois trens equipados com células de combustível a hidrogenio, produzido pela Alstom. TOLEDO, (2018)

Em 2019, reportagem da FORBES trazia o novo lançamento da Alstom no Reino Unido, o Brezze com um visual moderno e elegante o mesmo surge como uma solução para o plano de descarbonização das ferrovias e o objetivo do governo de eliminar material circulante a Diesel ate 2040.

De acordo com a matéria publicada pela Mobilize (2020), a Siemens e a empresa ferroviária alemã comunicaram os teste com trens movidos a Hidrogenio da empresa

Siemens, o Mireo Plus o mesmo promete atingir 160 km/h e recarga em 15 minutos, e ainda uma economia de 330 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano.

**Figura 13 - Trem movido a Hidrogênio – Alemanha**



Fonte: Toledo (2018)

## **4.2 Hidrogenio a partir da Energia Eólica**

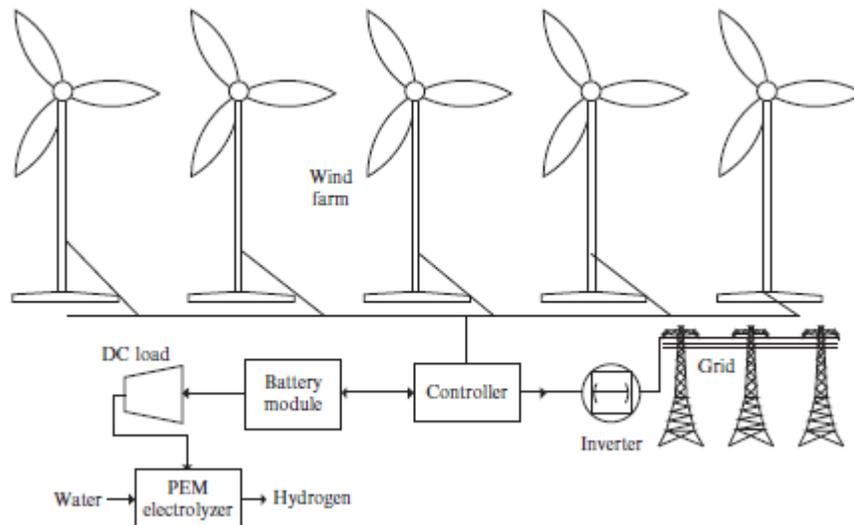
As turbinas eólicas de eixo horizontal ou de eixo vertical, são usadas para fazer a conversão da energia cinética do vento em eletricidade. Essa tecnologia possui limitações devido à natureza intermitente do vento. A energia eólica é usada para a produção da eletricidade e posteriormente essa eletricidade pode ser utilizada para produzir o hidrogenio. (DINCER, et al. 2019)

No trabalho realizado por FURLAN (2012), o mesmo estuda a viabilidade econômica do uso de hidrogênio como armazenador de energia, ele aponta que caráter intermitente da geração eólica acaba dificultando a garantia e a continuidade no fornecimento de energia elétrica ao longo do tempo, levando a um desequilíbrio entre a curva de oferta e demanda de eletricidade e dessa forma ele destaca utilização do hidrogênio eletrolítico como meio armazenador de energia se apresenta como uma solução para esse problema.

Ainda de acordo com esse trabalho levando em consideração os custos globais da produção de energia estudados, o foco deve ser o consumidor industrial, que apresentou números mais vantajosos (observado uma redução no horário de ponta entre 47,8% e 59,3%).

Abaixo na figura 14 uma representação de uma planta eólica que realiza a produção de hidrogênio através da eletrólise.

**Figura 14 - Layout de um sistema de produção de Hidrogênio através da eletrólise**



Fonte: Adaptado de Dincer (2016)

As usinas eólicas podem ser *on-grid* ou *off-grid*:

Considera-se que uma Planta de produção de Hidrogênio *on-grid* aquela alimentada com energia elétrica proveniente de uma usina eólica existente ou projetada e construída para esta finalidade, porém continuamente conectada à rede elétrica da concessionária local. FEITOSA, (2019)

Ainda de acordo com a o trabalho de FEITOSA (2019) define-se como Usina eólica *off-grid* aquela que uma Planta de produção de Hidrogênio será alimentada com energia elétrica proveniente de uma usina eólica existente ou projetada e construída para esta finalidade

### 4.3 Hidrogenio e Usina Solar Fotovoltaica

Em seu trabalho CARDOSO (2019, p. 36), descreve o processo de armazenamento de energia solar através de células de hidrogênio:

Para gerar energia o sistema funciona a partir do momento em que há luz solar iniciando o processo de produção e estocagem de hidrogênio. Durante o dia o sistema gera energia através dos painéis fotovoltaicos e alimenta diretamente a carga. O excedente de energia solar é utilizado para produzir hidrogênio e oxigênio através da eletrólise da água. O hidrogênio pode ser armazenado em tanques onde estarão prontos para serem utilizados na célula quando se necessita de energia elétrica. O sistema ainda poder ser interconectado com a rede elétrica de abastecimento de energia, e quando houver hidrogênio sobrando e os dispositivos do imóvel estiverem em repouso, a eletricidade adicional poderá ser injetada na rede.

De acordo com o artigo publicado pela ABSOLAR (Kolozzuk et al,2019.), o armazenamento competitivo da energia solar fotovoltaica utilizando baterias é um tema de interesse, pois mais valor e funcionalidade, dessa forma permitindo maior liberdade e autonomia ao consumidor. Dessa forma, será possível uma gestão precisa do consumo, além da criação de micro redes e comunidades de compartilhamento e armazenamento da geração solar fotovoltaica visto que o uso de baterias tende a acelerar a substituição de geradores a diesel, por sistemas híbridos combinando a geração e fotovoltaica e o armazenamento.

As usinas solares podem ser *off-grid* ou *on-grid* :

Nesta alternativa considera-se que uma Planta de produção de Hidrogênio será alimentada com energia elétrica proveniente de uma usina solar fotovoltaica existente ou projetada e construída para esta finalidade, porém continuamente conectada à rede elétrica da concessionária local (usina *on grid*). (FEITOSA, 2019, p.46)

Já a usina solar *off-grid* é aquela em que a planta de produção de hidrogenio é alimentada com energia proveniente de uma usina solar fotovoltaica construída com esse proposito. (FEITOSA, 2019)

#### **4.4 Geração de hidrogenio a partir das Marés**

Basicamente, são colocados osciladores no mar, que oscilam quando as ondas entram em contato com eles. Esse movimento gerado é usado para a produção da Energia.

Existem várias tecnologias de energia oceânica, juntamente a essas tecnologia podem ser integradas eletrolisadores de água, conseguindo dessa forma também a geração de hidrogênio a partir de uma energia renovável. (DINCER, et al. 2019)

Tidal impoundment (barrage) systems can have three methods of operation, depending on the phase in which they generate power: ebb generation, flood generation, and two-way generation. When ebb generation is applied, the basin is filled during the flood tide. If it is during the night, additional water can be pumped into the basin, as a means of storing energy during the off-peak hours. When the tide ebbs low enough, water is discharged over turbine systems that generate power. In flood generation, the dam gates are closed so that the water level increases on the ocean side until it reaches the maximum level. Then water is allowed to flow through turbine systems and charge the basin while generating power. In two-way generation, electricity is generated both in flood and in ebb phases of the tide. (DINCER, et al., 2019, p.149)

#### **4.5 Biomassa e produção do Hidrogênio**

Conforme já descrito anteriormente, também é possível obter Hidrogênio a partir da Biomassa.

In principle, one can categorize biomass sources as two kinds: energy crops and residual biomass materials. Here the residual biomass can comprise all sorts of waste woods such as from demolition, furniture factories (sawdust), building materials (sawdust, bark), residual fiber boards, straw residuals from agriculture, various residuals specific to forestry (tree branches, pruning, some trees), residuals from the food processing industry (kernels, seed shells, etc.), residuals from paper mills and any other kind of recoverable paper materials. (DINCER, et al., 2019, p.270)

Gaseificação é quando um combustível como a biomassa ou um resíduo sólido é convertido em hidrogênio, ou gás de síntese que é hidrogênio + monóxido de carbono. Se o combustível for um fluido (gás ou líquido), o processo é chamado de reforma. (DINCER, et al.2019)

De acordo com o trabalho de DINCER, et al. (2019), a eficiência varia de 10% a 60%, dependendo da alimentação e da tecnologia. Por exemplo, uma célula de combustível

/ gás combinada o ciclo da turbina com gaseificação de biomassa e recuperação de calor pode atingir 60% de eficiência. Conseguindo desta forma um valor da ordem de 5% a 30%, de a eficiência do hidrogênio a produção com esse sistema.

#### **4.6 Cenário Mundial**

De acordo com o último levantamento do REN21 (2020), O investimento em energia renovável teve um aumentando nas Américas, incluindo Estados Unidos e Brasil. Considerando todo o financiamento de fontes renováveis capacidade de energia (excluindo energia hidrelétrica superior a 50 MW), A China novamente teve a maior participação (30%), seguida pelos Estados Unidos (20%), Europa (19%) e Ásia-Oceania. Avanços menores foram observados na África e no Oriente Médio (5%), Américas (excluindo Brasil e Estados Unidos- 4%), Índia (3%) e Brasil (2%).

Ainda de acordo com esse relatório, foi observado o desenvolvimento de políticas relacionadas ao hidrogênio, na Nova Zelândia, Austrália e Europa.

No ano de 2019 uma empresa europeia do setor de Energia Eólica Offshore apresentou planos de fornecer hidrogênio gerado no processo. Já uma empresa Sueca anunciou um investimento em um projeto de uma instalação de armazenamento piloto de hidrogênio e eletricidade para a produção de aço. (REN21, 2020).

No PNE 2030 (Plano Nacional de Energia) publicado em 2017, é citado o incentivo ao uso de combustíveis alternativos, deixando clara a possibilidade de fomento à inserção no mercado de sistemas motrizes alternativos, entre eles o hidrogênio.

No Brasil podemos destacar os Estudos do Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (NUPHI), do Parque Tecnológico Itaipu, que implantou em 2014 uma Planta Experimental para estudo de todo o ciclo de obtenção e aplicação desse gás, envolvendo a produção, purificação, compressão, armazenamento e posterior utilização em células a combustível ou combustão em mistura com outros combustíveis. (PTI, 2019)

No Plano Nacional de Energia, o PNE 2050 publicado no fim de 2020, o hidrogênio teve citações importantes, como tecnologia de armazenamento e as perspectivas tecnológicas para essa área. Citado como uma tecnologia disruptiva apontado com uma das tecnologias que despontam, o mesmo foi incluído no Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Renováveis e Biocombustíveis em 2018-2022, com objetivo de fomentar a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico e a inovação nas cadeias produtivas de energia, principalmente seu uso veicular e estacionário para geração de energia e para a produção de combustíveis.

No relatório PNE 2050 (2020) é mencionado que já existem protótipos em demonstração que utilizam etanol em pilhas a combustível de óxido sólido em veículos. Como em nosso país, tem em sua estrutura a produção e distribuição de etanol, poderia substituir motores à combustão por motores elétricos, que utilizam a energia gerada pelas pilhas a combustível, contribuindo dessa forma para a redução de poluentes, além de terem maior eficiência.

Publicado no site Brasil Alemanha News, em 2020, ocorreu o 1º Congresso Brasileiro de Hidrogênio Verde, tendo a Thyssenkrupp como patrocinadora e palestrante. A empresa tem se mostrado uma grande apoiadora da inclusão do Hidrogênio, líder global na área tecnologia de eletrolises a apresenta tem obtido sucesso em seus projetos na Alemanha e esta com projetos.

Ainda de acordo como o Plano Nacional de Energia- PNE 2050 (2020) é sugerido o aumento de cooperação internacional entre os setores, para que o hidrogênio seja inserido de forma mais rápida na matriz energética.

#### **4.7 Vantagens da Introdução do Hidrogênio na Matriz**

Sistemas de energia isolados com altos custos (baseado em combustíveis fósseis) constituem um nicho em potencial para o desenvolvimento de várias tecnologias, como o do armazenamento utilizando células de hidrogênio, favorecendo o avanço mais rápido nesse meio do que em sistema que apresentam um custo mais baixo. (IRENA, 2018)

Se introduzirmos o hidrogênio na matriz, a partir do uso de células, podemos observar vários benefícios, de acordo com o trabalho de (WANGHON, 2018), isso resultaria em redução de emissão de poluentes, aumento da demanda de empregos na área, podemos ainda observar melhoria de eficiência.

#### **4.8 Desafios ao uso do Hidrogênio**

Os principais desafios relacionados ao uso do hidrogênio permeiam a questão econômica uma vez que os custos ainda são altos.

O relatório do CGEE (2010) destacou alguns desafios inerentes ao uso do hidrogenio e que ainda são pontos que devem ser observados para uso do hidrogenio:

- Custos – é preciso reduzir os custos, uma vez que a opção mais barata de produção do mesmo é a partir do gás natural. Lembrando que um dos principais objetivos de inserir o hidrogênio na matriz é redução de emissão de GEE, não sendo possível se o mesmo for produzido a partir do gás.
- Equipamentos – os produtos desenvolvidos no Brasil, ainda enfrentam limitações financeiras e dificuldades de ampliar a capacidade produtiva, aliado ao fato do hidrogênio ainda não possuir um campo de aplicações economicamente viável.
- Concorrência – produtores brasileiros concorrem com competidores internacionais, onde os incentivos a tecnologia são maiores.
- Normatização – essencial para o processo de entrada de uma nova tecnologia no mercado, ainda existe um número insuficiente de normas e padrões.

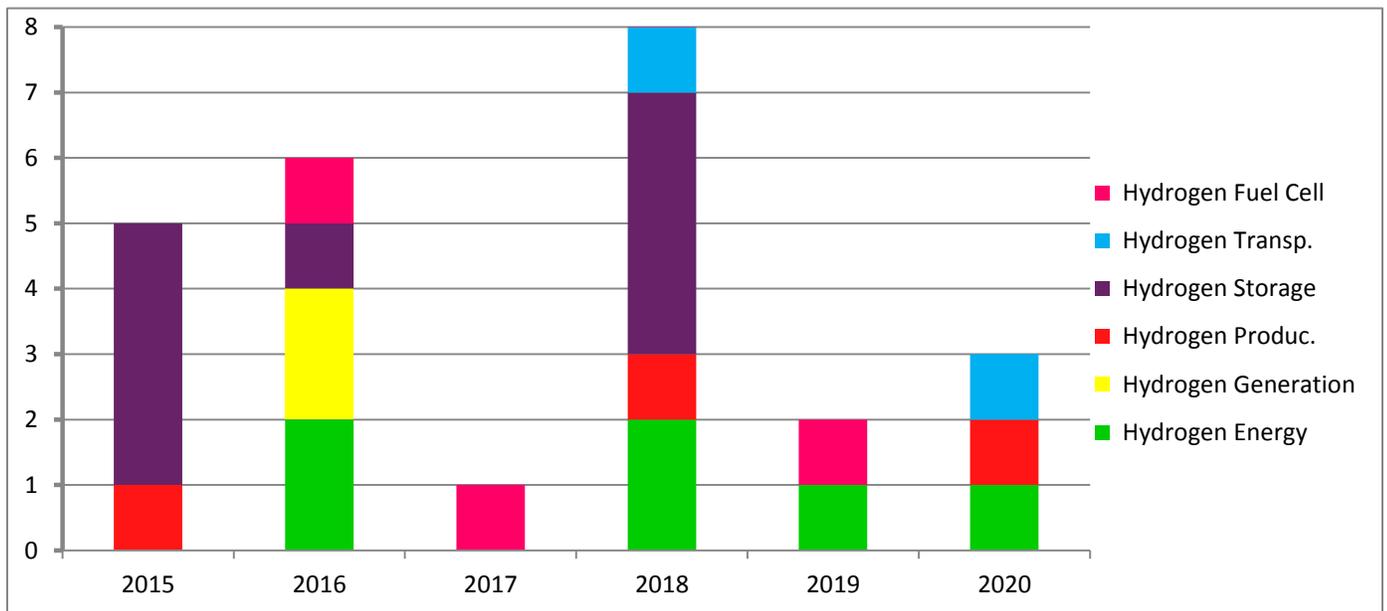
O PNE 2030 (Plano Nacional de Energia) publicado em 2017 destacou outro desafio de produção, conforme relatado em todos os processos de produção de hidrogênio,

uma etapa crucial é a purificação da mistura gasosa rica em hidrogênio, Esse processo pode representar um custo considerável, sendo também um dos campos relacionados a economia do hidrogenio que tem importância como objeto de estudo.

#### 4.9 Cenário de pesquisas

Baseado em um levantamento de pesquisas em desenvolvimento ou apresentadas nos últimos cinco anos foi possível observar um número relevante de pesquisas envolvendo o uso do hidrogênio, abaixo segue um gráfico com artigos que tiveram uma abordagem mais voltada para a pesquisa em questão. No capítulo de referências constam os artigos utilizados.

Gráfico 1 – Panorama de Pesquisas



Fonte: Elaborado pela autora

Podemos notar um número diferenciado de pesquisas e tecnologias voltado à armazenagem, seguido de pesquisas sobre energia do hidrogênio e geração.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de trabalhos no campo de pesquisa envolvendo o Hidrogênio Energético se faz necessário com o objetivo de desenvolver novas tecnologias, aprimorar as existentes e também para maior divulgação acerca do tema.

Com o aumento de pesquisas e aumento das possibilidades de uso, a Energia do Hidrogênio passará a ser algo mais real. Uma vez que a mesma seria muito útil no uso concomitante a energias como Eólica e Solar, garantindo uma qualidade na entrega.

Um aumento da disponibilidade de hidrogênio contribuirá para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis uma redução de emissão de gases do Efeito Estufa, além da diversificação da Matriz, uma vez que ele pode ser obtido utilizando vários tipos de energia.

A produção do Hidrogênio ainda tem custo elevado, sendo necessárias pesquisas com novos materiais, novas formas de extração. Divulgação e conscientização junto à sociedade e empresários.

Além de qualificação de mão de obra específica, desenvolvimento de normas ou adoção de normas internacionais.

Foi possível notar vários estudos em desenvolvimento, recém-lançados que buscam novos materiais para armazenamento, pesquisas sobre a viabilidade do uso de células e integração do hidrogênio à outras formas de geração de energia. O que só tende a contribuir com o desenvolvimento do campo, mais acesso às informações e conseqüente maior disponibilidade das mesmas para qualificação. Nos últimos anos o hidrogênio ganhou mais destaque em pesquisas e aplicações seja na utilização de células a hidrogênio em veículos quanto seu uso concomitante a outras fontes de energias.

O aumento de divulgação e pesquisas sobre o tema é de extrema importância para a inserção do mesmo na matriz energética. Iniciativas como da, COPPE/ UFRJ, EMTU/SP

Itaipu, Thyssenkrupp entre outras contribuirá para o desenvolvimento desse setor, melhoria das tecnologias existentes e novos projetos principalmente ligados à descarbonização e créditos de carbono. Contribuindo para a redução da emissão de gases e possibilidade de uso de outros combustíveis reduzindo, portanto o uso intensivo dos combustíveis fósseis.

O objetivo do trabalho foi atingido, com esse estudo foi possível conhecer mais sobre pontos básicos para início de estudo na área de hidrogenio envolvendo mobilidade urbana e energia. Como o campo é vasto ainda existem temas que não foram abordados e que são extremamente importantes para o desenvolvimento. Assuntos que devem ser melhores estudados para expandir o conhecimento e possível trabalho no desenvolvimento de pesquisas e tecnologias para o uso do hidrogênio na matriz, assim como otimização e melhoria de eficiência dos processos existentes.

Uma matriz híbrida e com menor emissão é possível, mas há um longo caminho pela frente.

## REFERÊNCIAS

AFDC –Alternative Fuels Data Center - How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen? Disponível em: < <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work> > Acesso em 03/03/2020

ALMEIDA, A. S. de, Souza, J. G. de, Madeiro, L. C. N., Costa, M. L. A. da, Cunha, A. L., Rodrigues, M. A., & Santos, A. F. dos. (2019). Hidrogênio, o combustível do futuro. *Diversitas Journal*, 4(2), 356-366. <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v4i2.593> > Acesso em 11/2020

ANEEL - Energia Eólica. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf) > Acesso em 05/2020

ANTP (Agencia Nacional de Transportes Públicos). 2018 -Brasil desenvolve terceira versão de ônibus movido a hidrogênio. Disponível em: <<http://www.antp.org.br/noticias/clippings/brasil-desenvolve-terceira-versao-de-onibus-movido-a-hidrogenio.html> > Acesso em 10/2020

BERNARDI JUNIOR, Paulo. Alternativas para a produção de hidrogênio nas regiões brasileiras visando à geração de energia elétrica distribuída. 2009. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em <doi:10.11606/T.85.2009.tde-17112009-090135 >. Acesso em: 28/05/2020

BRASIL ALEMANHA NEWS. Thyssenkrupp participa do 1º Congresso Brasil-Alemanha de Hidrogênio Verde. 2020. Disponível em: < <https://brasillalemanhanews.com.br/sustentabilidade/thyssenkrupp-participa-do-1o-congresso-brasil-alemanha-de-hidrogenio-verde/> > Acesso em 10/2020

CARDOSO, Bruno Monteiro. Uso da Biomassa como Alternativa Energética. 2012. 98f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em : < <http://hdl.handle.net/11422/8982> > Acesso em 03/2020

CARDOSO, Hérica C. C. Estudo de sistemas híbridos de energia solar fotovoltaica e células a combustível: um estudo de caso aplicado ao Instituto Federal de Goiás–Campus Itumbiara. 2019. Disponível em: < <http://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/271> >. Acesso em: 03/2020

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](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5)>. Acesso em: 10/06/2020

COPPE/RJ - Lançada a nova versão do Ônibus a Hidrogênio. 2012. Disponível em: <<https://coppe.ufrj.br/pt-br/planeta-coppe-noticias/noticias/lancada-a-nova-versao-do-onibus-a-hidrogenio> > Acesso em 12/2019

CORRAES, Vinícius David; FREIRE, Maria das Graças Machado; BARBOSA, Thiago Muniz. Estudo preliminar do papel do hidrogênio como fonte alternativa de energia. **Brazilian Journal of Business**, v. 2, n. 4, p. 4028-4041, 2020

CRESESB -ENERGIA SOLAR - PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES – Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf) >- Acesso em 11/2020

DA SILVA, C. H. F. et al. Produção de Hidrogênio através de Reforma de Etanol. **V Citenel, Belém, 2009.** Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20090922131205-6.pdf> > Acesso em 08/2020

DA COSTA LABANCA, Aurélio Reis. DESENVOLVIMENTO DE REATOR DE PIRÓLISE A PLASMA PARA A DECOMPOSIÇÃO DO METANO EM HIDROGÊNIO E CARBONO SÓLIDO. Diss. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007 Disponível em: <<http://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/teses/2007/43--34/file> > acesso em : 28/10/2020

DINCER, Ibrahim ; ZAMFIRESCU, Calin - Sustainable Hydrogen Production-Elsevier (2016) disponível em : <<https://www.sciencedirect.com/book/9780128015636/sustainable-hydrogen-production> >acesso em 09/2019

EERE. The Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Infographic, 2015 - Disponível em: <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f24/fcto\\_fcev\\_infographic\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f24/fcto_fcev_infographic_0.pdf) > Acesso em 20/03/2020

EERE - Energy Efficiency & Renewable Energy. Fuel Cells .Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells> > Acesso em 10/12/2109

EPA - Environmental Protection Agency – Catalog of CHP Technologies- Section 6- Technology Characterization – Fuel Cells. 2015 Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog\\_of\\_chp\\_technologies\\_section\\_6.\\_technology\\_characterization\\_-\\_fuel\\_cells.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies_section_6._technology_characterization_-_fuel_cells.pdf) > Acesso em : 05/2020

FEITOSA, Francisco Edvan Bezerra. Avaliação multicritério das alternativas energéticas do Brasil para produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água para o setor automotivo. 2019 <<http://hdl.handle.net/1843/32551> >Acesso em 06/2020

FURLAN, André Luís. Análise técnica e econômica do uso do hidrogênio como meio armazenador de energia elétrica proveniente de fontes eólicas. -2012 . Disponível em : <- acesso em 09/2019

NOGUEIRA JUNIOR, Gilmar. Célula a combustível: uma análise da viabilidade econômica e energética dos principais modelos no mercado. 2017. Disponível em: < <http://monografias.ufrn.br/handle/123456789/5298> > Acesso em: 06/2020

GONZATTI, Frank. Fundamentos para concepção, controle e automação de uma planta armazenadora de energia utilizando hidrogênio. 2017. Disponível em: < <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/12933> > Acesso em: 03/2020

GUPTA, Ram B.; BASILE, Angelo and VEZIROGLU, T. Nejat .Compendium of Hydrogen Energy Volume 2: Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure. 2015. Disponível em: < <https://3lib.net/book/2632287/153ec4> > Acesso em: 09/2020

HALLACK, Michelle; LOSEKANN, Luciano . Novas energias Renováveis no Brasil: desafios e oportunidades – (2018) disponível em : < <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/8446> > Acesso em 19/06/2020

HYDROGEN COUNCIL. How Hydrogen empowers the energy transition . Janeiro 2017. Disponível em: < <https://hydrogencouncil.com/en/study-how-hydrogen-empowers/> >. Acesso em: 05/03/2020

HYDROGEN COUNCIL. Path to hydrogen competitiveness. Janeiro 2020. Disponível em:<[https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/PathtoHydrogenCompetitiveness\\_Full-Study-1.pdf](https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/PathtoHydrogenCompetitiveness_Full-Study-1.pdf)>. Acesso em: 11/05/2020.

HOFFMANN, Peter, 1935 –Tomorrow’s energy : hydrogen, fuel cells, and the prospects for a cleaner planet/ rev.2012 . Disponível em: < <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=ba7357c80b16b1d350c4f549607c7fd8> >Acesso em: 12/2019

IRENA – International Renewable Energy Agency -. Hydrogen from renewable power. 2018. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>> Acesso em:

IEA – The International Energy Agency . Hydrogen Production and Storage , 2006 .Disponível em: < [http://ieahydrogen.org/pdfs/Special-Reports/Hydrogen\\_Gaps\\_and\\_Priorities.aspx](http://ieahydrogen.org/pdfs/Special-Reports/Hydrogen_Gaps_and_Priorities.aspx) > Acesso em: 10/2019

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: 18/06/2020

KOLOSZUK, Ronaldo; SAUAIA, Rodrigo ; VLASITS, Markus . Armazenamento da Energia solar fotovoltaica. 2019. Disponível em:<<http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/armazenamento-da-energia-solar-fotovoltaica-a-nova-fronteira.html>> Acesso em 10/2019

KONIGAME, Vivian Cristina; Thadeu das Neves Conti. "Estudo do reator nuclear de 4ª geração "Very High Temperature Reactor"–VHTR." *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada-UNG-Ser 1*, no.1(2017):47-68. Disponível em: <<http://revistas.ung.br/index.php/engenhariaetecnologia/article/view/3045> > Acesso em 11/2020

LEME, Thaís Bredariol Grilo. Prospecção tecnológica a médio e longo prazo do uso de fontes alternativas de geração de energia. 2017. 1 recurso online (163 p.). Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/331070>>. Acesso em 02/04/2020

LEPECKI, W. A Energia Nuclear e a economia do Hidrogênio – 2011 -Disponível em <[http://www.inee.org.br/down\\_loads/eficiencia/Economia\\_Hidrogenio\\_Lepecki.pdf](http://www.inee.org.br/down_loads/eficiencia/Economia_Hidrogenio_Lepecki.pdf)> Acesso em 15/07/2020

LINARDI, Marcelo. Hidrogenio e Células de Combustível : Programa Brasileiro de I & D. IPEN disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2011/17912> > , Acesso em: 06/2020

LIRA, Rodrigo Lucas Tenorio Calazans de. Concepção preliminar de um processo petroquímico e seu estudo de viabilidade técnica e econômica. Orientador: Nelson Medeiros de Lima Filho. 2017. 189 f. Tese. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/29825/1/TESE%20Rodrigo%20Lucas%20Ten%C3%B3rio%20Calazans%20de%20Lira.pdf> > Acesso em 09/2020

LOBO, Renato. Inglaterra terá os primeiros ônibus de dois andares a hidrogenio. 202. Disponível em: <<https://viatrolebus.com.br/2020/10/inglaterra-tera-os-primeiros-onibus-de-dois-andares-a-hidrogenio-do-mundo/> > Acesso em: 11/2020

LUBE, Filipe . Energia do hidrogênio: mudanças paradigmáticas rumo à uma economia verde no Brasil Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/5980> > Acesso em 03/07/2020

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Técnicas de Pesquisa. São Paulo: Atlas, p.185, 2002.

MARQUES, Jessica; BAZANI, Adamo. Diário do Transporte. 2018. Enquanto ônibus a hidrogênio no Brasil não saem da garagem, Alemanha terá trem até o final do ano. Disponível em: <[diariodotransporte.com.br/2018/07/15/enquanto-onibus-a-hidrogenio-no-brasil-nao-saem-da-garagem-alemanha-tera-trem-ate-o-final-do-ano/](http://diariodotransporte.com.br/2018/07/15/enquanto-onibus-a-hidrogenio-no-brasil-nao-saem-da-garagem-alemanha-tera-trem-ate-o-final-do-ano/) > Acesso em 11/2020

MME - Plano Nacional de Energia - 2030. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/36208/468569/Plano+Nacional+de+Energia+2030+%28PDF%29.pdf/b22cf6a2-8d5f-5c5b-dd3a-414381890002> > Acesso em 12/2019

MME - Plano Nacional de Energia - 2050. 2020. Disponível em: < <http://http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/plano-nacional-de-energia-2050>> Acesso em 12/2020

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil / Coordenação-Geral do Clima. -- 5. ed. -- Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2019. Disponível em: < [https://issuu.com/mctic/docs/livro\\_estimativas\\_anuais\\_de\\_emissoes\\_de\\_gases\\_de\\_e](https://issuu.com/mctic/docs/livro_estimativas_anuais_de_emissoes_de_gases_de_e)> Acesso em 06/2020

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. DECRETO Nº 9.578. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2018/decreto/D9578.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9578.htm)> Acesso em 26/02/2020

MOBILIZE. Alemanha testara trem movido a hidrogenio. 2020. Disponível em: < <https://www.mobilize.org.br/noticias/12413/alemanha-testara-trem-movido-a-hidrogenio.html>> Acesso em 10/2020

MOLINA, L.R. S; MIRANDA, R.W. G; MORAES, R.I. Implantação de ônibus movido a hidrogênio no campus da UNICAMP. 2011 Disponível em: < <http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/nova/index.php/be310/article/view/279/215>> Acesso em: 12/12/2019

MOURA, Carlos Henrique Silva. Sistema híbrido solar-eólico-biogás incluindo produção, armazenamento e uso dinâmico de hidrogênio. 2020 Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/192430>>. Acesso em 10/2020

ONU - BR - Agenda 2030. 2015. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>> Acesso em 10/2019

PALADINO, Patricia, A. Uso do Hidrogênio no transporte publico da cidade de São Paulo. 2013 Disponível em : < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85133/tde-24102013-112007/publico/2013PaladinoUso.pdf>> Acesso em: 01/2020

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. LEI 10438 – PROINFA. 2002 Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm)> Acesso em 04/2020

PTI – Parque Tecnológico Itaipu. Relatório de Resultados 2019. Disponível em: <[https://www.pti.org.br/sites/default/files/Publica%C3%A7%C3%B5es/Relatorio\\_Resultados\\_PT1\\_2019\\_v6\\_NOVO.pdf](https://www.pti.org.br/sites/default/files/Publica%C3%A7%C3%B5es/Relatorio_Resultados_PT1_2019_v6_NOVO.pdf)> Acesso em: 03/2020

REN21 - Renewables 2020 Global Status Report – disponível em: <<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>> - Acesso em 01/07/2020

REVISTA FORBES. Alstom lança novo trem de Hidrogenio no Reino Unido. 2019. Disponível em: < <https://forbes.com.br/colunas/2019/01/alstom-lanca-novo-trem-de-hidrogenio-no-reino-unido> > Acesso em 10/2020

REVISTA MERCADO E TECNOLOGIA. 2020. A chave da Transição Energetica. Disponível em: < <http://www.revistamt.com.br/Materias/Exibir/a-chave-da-transicao-energetica>>. Acesso em : 09/2020

SANTOS, M. S. M.; SANTOS, A. C. M.; - O Combustível "Hidrogênio", 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v4i2.593> > Acesso em: 21/06/2020

SILVA, Fernando H. G. Obtenção e uso de hidrogênio em célula de combustível para geração de energia limpa de fontes renováveis. 2013. Tese de Graduação. Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2013. Acesso em 18/07/2020

SILVEIRA, José Luz - Sustainable Hydrogen Production Processes\_ Energy, Economic and Ecological Issues-Springer (2016) – disponível em: <<http://libgen.lc/item/index.php?md5=DEE6370B69D4D4FEDAC8357F8C66A4A6>> acesso em 09/2019

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://sobretalhos.blogfolha.uol.com.br/2018/09/19/alemanha-estreia-trem-movido-a-celula-de-hidrogenio-saiba-como-ele-funciona/>>. Acesso em: 01/2020

TOYOTA - Toyota Mirai – maior distancia com zero emissão poluente. 2015. Disponível em:<<https://www.toyota.com.br/mundo-toyota/noticias/toyota-mirai-maior-distancia-com-zero-emissao-poluente/>> Acesso em 11/2019

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

WANGHON, Alexandre J. L. A energia do hidrogênio. 2018. Tese de Graduação. Escola de Engenharia, Universidade de Santa Catarina, 2018. Acesso em: 10/05/2020

Levantamento adicional dos artigos desenvolvidos e publicados nos últimos 5 anos que dizem respeito ao Hidrogênio ( produção, armazenamento, transporte, geração, energia, e células de combustível).

Dados do artigo			Palavras-chaves					
Ano	Autor	Titulo	Hydrogen Storage	Hydrogen Transp.	Hydrogen Produc.	Hydrogen Fuel Cell	Hydrogen Energy	Hydrogen Generation
2015	Yu, Qian	Size-dependent mechanical properties of Mg nanoparticles used for hydrogen storage	1					
2015	Semelsberger	Chemical hydrogen storage material property guidelines for automotive applications	1					
2015	Xueping, Zheng	A new solid material for hydrogen storage	1					
2015	Gonzalez	Energy evaluation of a solar hydrogen storage facility: Comparison with other electrical energy storage technologies	1					

2015	Dincer, Ibrahim	Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability			1			
2016	Zhang, Fan	The survey of key technologies in hydrogen energy storage	1					
2016	Wang	Evaluation of design methodology, limitations, and iterations of a hydrogen fuelled hybrid fuel cell mini UAV				1		
2016	Nowotny, Janusz	Towards sustainable energy. Generation of hydrogen fuel using nuclear energy						1

2016	Kasai, Naoya ; Fujimoto, Yuki ; Yamashita, Ikuya ; Nagaoka, Hisashi	The qualitative risk assessment of an electrolytic hydrogen generation system						1
2016	Khalid, Farrukh ; Dincer, Ibrahim ; Rosen, Marc A	Analysis and assessment of an integrated hydrogen energy system					1	
2016	Bayrak, Zehra Ural ; Bayrak, Gökay ; Ozdemir, Mahmut ; Temel ; Gencoglu, Muhsin ; Tunay ; Cebeci, Mehmet	A low-cost power management system design for residential hydrogen & solar energy based power plants					1	
2017	Antony, Anil	A generic methodology to evaluate economics of hydrogen production using energy from nuclear power plants						
2017	de Miranda, P	Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system				1		

2018	Wang, Dai	Quantifying the flexibility of hydrogen production systems to support large-scale renewable energy integration						
2018	Beshr, Eman Hassan ; Abdelghany, Hazem ; Eteiba, Mahmoud Villarini, Mauro	Novel optimization technique of isolated microgrid with hydrogen energy storage	1					
2018	Haghi, Ehsan	Investigating the effect of renewable energy incentives and hydrogen storage on advantages of stakeholders in a microgrid	1					
2018	Aakko Saksa, Päivi	Liquid organic hydrogen carriers for transportation and storing of renewable energy – Review and discussion		1				
2018	Bögel, Paula	The role of attitudes in technology acceptance management: Reflections on the case of hydrogen fuel cells in Europe				1		

2018	Sorgulu, F ; Dincer, I	A renewable source based hydrogen energy system for residential applications					1	
2018	Wang, Dai	Quantifying the flexibility of hydrogen production systems to support large-scale renewable energy integration			1			
2018	Schneemann	Nanostructured Metal Hydrides for Hydrogen Storage	1					
2018	Ishaq, H ; Dincer, I ; Naterer, G.F	Development and assessment of a solar, wind and hydrogen hybrid trigeneration system					1	
2018	Dadashzadeh , Mohammad	Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage	1					
2019	Yang, Lu ; Xie, Pengli ; Zhang, Ronghui ; Cheng, Yanjie ; Cai, Bowen ; Wang, Rongben	HIES: Cases for hydrogen energy and I-Energy					1	

2019	Chang, Xiaoying	Impact of urban development on residents' public transportation travel energy consumption in China: An analysis of hydrogen fuel cell vehicles alternatives				1		
2020	Dawood, Furat	Hydrogen production for energy: An overview			1			
2020	Liu, Bo	Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China		1				
2020	Wu, Yuhan	Solar-driven integrated energy systems: State of the art and challenges					1	

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração os estudos já efetuados, proponho os seguintes temas com objetivo de aprofundar mais o conhecimento no assunto com o objetivo de obter mais bagagem e possível desenvolvimento de pesquisas ou trabalhos na área.

- Estudo de sistemas que usam hidrogênio como meio de Armazenamento e Transporte de Energia;
- Fusão do hidrogênio – tecnologias e possibilidades;
- Divulgação das tecnologias e do uso do hidrogênio aliado às energias renováveis;
- Estudo sobre nano partículas e sua aplicação associada ao hidrogênio.