

NIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

TIAGO SINIGAGLIA

**ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO
COMO COMBUSTÍVEL NA MOBILIDADE**

Santa Maria, RS
2018

TIAGO SINIGAGLIA

**ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO
COMBUSTÍVEL NA MOBILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Mario Eduardo Santos Martins, Ph.D.
Co-orientador: Prof. Julio Cezar Mairesse Siluk, Dr.

Santa Maria, RS
2018

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da
UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a).

Sinigaglia, Tiago

Análise da competitividade da utilização do hidrogênio
como combustível na mobilidade / Tiago Sinigaglia.- 2018.
124 p.; 30 cm

Orientador: Mario Eduardo Santos Martins Coorientador:
Julio Cezar Mairesse Siluk
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, RS, 2018

1. Hidrogênio combustível 2. Competitividade 3. Avaliação de
desempenho 4. Indicadores de desempenho 5. Abordagem
multicritério I. Martins, Mario Eduardo Santos
II. Siluk, Julio Cezar Mairesse III. Título.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Tiago Sinigaglia. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: tiago_sinigaglia@hotmail.com

TIAGO SINIGAGLIA

**ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO
COMBUSTÍVEL NA MOBILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovado em 19 de março de 2018:

Mario Eduardo Santos Martins, Ph.D. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Julio Cezar Mairesse Siluk, Dr. (UFSM)
(Co-orientador)

Macklini Dalla Nora, Ph.D. (UFSM)

Elpidio Oscar Benitez Nara, Dr. (UNISC)

Santa Maria, RS
2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Margarete e Nadil, pelos ensinamentos e pelo apoio em todas as minhas escolhas. Aqueles que sempre me incentivaram e apoiaram para seguir meus estudos e lutar perante aos desafios que a vida nos propõe.

Dedico também a minha avó Izaltina pelo apoio incondicional em todos os momentos de minha vida e pelos ensinamentos.

A minha irmã Patrícia pelos incentivos e pelo apoio em todas as minhas escolhas.

A Monice, pelo companheirismo, pela motivação e pela dedicação comigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma ou outra forma contribuíram para a realização deste trabalho, porém agradeço de forma especial:

-A Deus por me acompanhar nessa jornada, por sempre estar ao meu lado me protegendo e me guiando frente aos desafios impostos pela vida.

-À minha família, pelo apoio e pelo estímulo que recebi nesta caminhada, que certamente fizeram a diferença.

-Ao professor Mario Eduardo Santos Martins por todas as orientações prestadas, ensinamentos, experiências compartilhadas e pelo incentivo.

-Ao professor Julio Cezar Mairesse Siluk pela co-orientação prestada e pelos ensinamentos compartilhados.

-A todos os demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, por todos os ensinamentos e vivências compartilhadas.

-Aos professores da banca de qualificação e defesa, os professores Macklini Dalla Nora e Elpidio Oscar Benitez Nara, pelas considerações ao trabalho e sugestões de melhoria.

-Aos colegas de mestrado, pela convivência e amizade, durante esse período importante em minha vida.

- À CAPES pela concessão da bolsa de estudos e a UFSM pela oportunidade de realizar esse mestrado.

*Nossa maior fraqueza está em
desistir. O caminho mais certo de
vencer é tentar mais uma vez.
(Thomas Edison)*

RESUMO

ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL NA MOBILIDADE

AUTOR: Tiago Sinigaglia
ORIENTADOR: Mario Eduardo Santos Martins
CO-ORIENTADOR: Julio Cezar Mairesse Siluk

Os combustíveis de origem fóssil são largamente utilizados para a mobilidade, consumindo uma larga porção da matriz energética mundial. Contudo, com a crescente preocupação em buscar alternativas ambientalmente benignas e renováveis, surge espaço para outros recursos energéticos. O hidrogênio surge como um potencial substituto aos combustíveis de origem fóssil, podendo ser obtido a partir de diversos recursos primários, como água, biomassa, etanol, gás natural, entre outros. Para se utilizar o hidrogênio como combustível, para fins de mobilidade, algumas etapas precisam ser competitivas, como a produção, armazenamento, distribuição e emprego do hidrogênio em veículos. Desta forma, o objetivo deste estudo foi construir uma modelagem para avaliar e mensurar a competitividade dos cenários que utilizam hidrogênio na mobilidade. A modelagem proposta foi desenvolvida com base em 4 Pontos de Vistas Fundamentais (PVFs), 32 Fatores Críticos para o Sucesso (FCS), encontrados com base na recorrência bibliográfica e documental, aos quais posteriormente foram construídos 37 indicadores de desempenho utilizando os pressupostos alusivos ao *Key Performance Indicators* (KPIs). A estruturação da modelagem e definição do nível de importância para cada FCS foi realizada com base em alguns elementos da abordagem multicritério de apoio a decisão. Posteriormente a modelagem foi testada em alguns cenários da América do Norte e Europa, com uma consulta a 7 especialistas da área, provenientes de empresas, centros de pesquisa e universidades, com forte ligação com as tecnologias do hidrogênio. O nível de avaliação geral dos cenários investigados foi definido como “potencialmente competitivo”. O panorama geral mostra que ações mais contundentes precisam ser aplicadas a fim de alcançar cenários “altamente competitivos”.

Palavras-chave: hidrogênio combustível; competitividade; avaliação de desempenho; indicadores de desempenho; abordagem multicritério.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE COMPETITIVENESS OF HYDROGEN USED AS FUEL IN MOBILITY

AUTHOR: Tiago Sinigaglia
ADVISOR: Mario Eduardo Santos Martins
CO-ADVISOR: Julio Cezar Mairesse Siluk

Fossil fuels are widely used for mobility in the global energy matrix. However, with growing concern about finding renewable alternatives, there is room for other energy resources. Hydrogen appears as a potential substitute for fossil fuels. Hydrogen can be obtained from several primary resources, such as water, biomass, ethanol, natural gas, among others. To start using hydrogen as a fuel for mobility purposes, some steps need to be competitive, such as the production, storage, distribution, and use of hydrogen in vehicles. In this way, the objective of this study is to build a model to evaluate and measure the competitiveness of scenarios that use hydrogen in mobility. The proposed type of modeling was developed based on 4 Fundamental Views Points (PVFs), 32 Critical Factors for Success (FCS), found on the basis of bibliographic and documentary recurrence, to which 37 performance indicators were later constructed using the assumptions alluding to the Key Performance Indicators (KPIs). The structuring of the type of modeling and definition of the importance level for each FCS was carried out based on some elements of the multicriteria decision support approach. Subsequently, the modeling type was tested in some scenarios, from North America and Europe, with a consultation of 7 specialists from the area, from companies, research centers and universities, with a strong connection with hydrogen technologies. The evaluation levels of the scenarios investigated were defined as "potentially competitive". The overall picture shows that stronger action needs to be taken to achieve "highly competitive" scenarios.

Keywords: hydrogen as fuel for vehicles; competitiveness; performance assessment; performance indicators; multi-criteria analysis.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Resultados busca por palavras-chave no Scopus e Web of Science.....	24
Quadro 2- Comparação entre os métodos de produção de hidrogênio.....	35
Quadro 3- Custo de produção do hidrogênio	37
Quadro 4- Leis e incentivos para a tecnologia do hidrogênio na Califórnia.....	55
Quadro 5- Modelos de mensuração de desempenho	60
Quadro 6- Níveis de importância do método AHP.....	66
Quadro 7- Enquadramento metodológico	67
Quadro 8- PVF-1- Produção.....	74
Quadro 9- PVF- 2- Armazenamento.....	75
Quadro 10- PVF-3- Distribuição	75
Quadro 11- PVF-4-A Emprego	77
Quadro 12- PVF-4-B (hidrogênio em veículos com motor a combustão interna).	78
Quadro 13- Exemplo de indicador construído.	81
Quadro 14- Origem dos respondentes do instrumento de coleta de dados.	84
Quadro 15- Importância e taxas de substituição para os KPI-6.1 e 6.2.	85
Quadro 16- Importância e taxas de substituição locais para os FCS.....	86
Quadro 17- Importância e taxa de substituição para os PVFs.	87
Quadro 18- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-1.....	88
Quadro 19- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-2.....	88
Quadro 20- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-3.....	89
Quadro 21- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-4-A.	90
Quadro 22- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-4-B.	90
Quadro 23 - Faixas de avaliação da competitividade.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Busca no Scopus com a palavra-chave “ <i>hydrogen as fuel for vehicles</i> ”	25
Figura 2- Análise de co-ocorrência de palavra-chave no VOSviewer	26
Figura 3- Análise de citação de autores no VOSviewer	27
Figura 4- Matriz veicular brasileira	29
Figura 5- Número de ônibus em uso nos Estados Unidos por tipo de combustível ...	29
Figura 6- Combustíveis utilizados para a mobilidade na Europa.....	30
Figura 7- Demanda de energia para o transporte por tipo de combustível na Europa	31
Figura 8- GWP por kg de hidrogênio para diversos métodos de produção de hidrogênio.....	36
Figura 9- Principais meios de transporte do hidrogênio no mundo	43
Figura 10- Estações de abastecimento de hidrogênio nos Estados Unidos.....	45
Figura 11- Estações de abastecimento de hidrogênio na Europa	45
Figura 12- Estações de abastecimento de hidrogênio na Ásia	46
Figura 13- Funcionamento de um FCV	47
Figura 14- Número de FCVs vendidos na Europa.....	48
Figura 15- Fatores determinantes para a competitividade	57
Figura 16- Estrutura da AHP	65
Figura 17- Etapas metodológicas.....	69
Figura 18- Estrutura hierárquica para avaliação do desempenho competitivo do H ₂ na mobilidade.....	79
Figura 19- Exemplo de questão utilizada na coleta dos pesos dos FCS.....	82
Figura 20- Desempenho competitivo global por PVF.....	92
Figura 21- Desempenho competitivo com dados de um respondente dos Estados Unidos.....	93
Figura 22- Desempenho simulado.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFC	Célula de combustível alcalina
AHP	Método de análise hierárquica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AP	Acidificação potencial
APO	Administração por objetivos
BSC	<i>Balanced scorecard</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNG	Gás natural comprimido (<i>Compressed natural gas</i>)
CO	Monóxido de carbono
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
E_{in}	Energia que entra para o processo
EX_{in}	Taxa de entrada para o processo de exergia
FCS	Fatores críticos para o sucesso
FCV	Veículo com célula de combustível (<i>Fuel cell vehicle</i>)
GEE	Gases do efeito estufa (<i>Greenhouse gases</i>)
GNV	Gás natural veicular
GWP	Potencial de aquecimento global (<i>Global warming potential</i>)
H ₂	Hidrogênio
HC	Hidrocarbonetos não queimados
HCCI	Ignição por compressão de carga homogênea
ICEV	Veículo com motor de combustão interna (<i>Internal combustion engine vehicle</i>)
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IVA	Imposto sobre o valor acrescentado
LHV	Poder calorífico inferior
LNG	Gás natural liquefeito (<i>Liquefied natural gas</i>)
m	Taxa de fluxo de massa
MAUT	Método da teoria da utilidade multiatributo (<i>Multiattribute Utility Theory</i>)
MCDA	Modelagem multicritério de apoio à decisão
MCFC	Célula combustível de carbono fundido
mex^{ch}	Exergia química
MMT	Milhões de toneladas métricas
Mtoe	Milhões de toneladas de óleo equivalente
η	Eficiência energética
NO _x	Óxido de nitrogênio
PAFC	Célula de combustível de ácido fosfórico
PEM	Membrana de troca de prótons (<i>Proton Exchange membrane</i>)
P_i	Taxa local de substituição
PVF	Ponto de vista fundamental
SCC	Custo social do carbono
SMR	Reforma do metano a vapor (<i>Steam methane reforming</i>)
SOFC	Célula de combustível de óxido sólido
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Smilarity to Ideal Solution</i>
KPI	<i>Key performance indicator</i>
ψ	Eficiência de exergia
UE	União Europeia
UNILA	Universidade Federal de Integração Latino-Americana

$V_{(a)}$	Desempenho competitivo global
V_i	Avaliação local de desempenho
W_i	Taxa global de substituição
Z_i	Valor de importância dos FCSs

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVO GERAL	23
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3	JUSTIFICATIVA	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	28
2.1	PANORAMA DA MOBILIDADE	28
2.2	UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL NA MOBILIDADE	31
2.2.1	Produção de hidrogênio	32
2.2.1.1	<i>Categorias de impacto, eficiência e custo</i>	32
2.2.1.2	<i>Comparação entre os métodos de produção</i>	33
2.2.1.3	<i>Produção mundial de hidrogênio</i>	37
2.2.2	Armazenamento de hidrogênio	38
2.2.2.1	<i>Armazenamento por compressão</i>	39
2.2.2.2	<i>Armazenamento por liquefação</i>	39
2.2.2.3	<i>Armazenamento químico em hidretos</i>	40
2.2.2.4	<i>Armazenamento físico em hidretos</i>	41
2.2.3	Distribuição do hidrogênio	41
2.2.3.1	<i>Meios de transporte do hidrogênio</i>	42
2.2.3.2	<i>Estações de abastecimento de hidrogênio</i>	43
2.2.4	Emprego do hidrogênio na mobilidade	46
2.2.4.1	<i>Utilização do hidrogênio em FCVs</i>	46
2.2.4.2	<i>Emprego do hidrogênio em ICEV</i>	50
2.2.4.2.1	<i>Hidrogênio em motores de ignição por centelha</i>	51
2.2.4.2.2	<i>Hidrogênio em motores ciclo Diesel</i>	53
2.2.4.2.3	<i>Hidrogênio em motores HCCI</i>	53
2.2.5	Leis e incentivos fiscais para o emprego do hidrogênio na mobilidade	54
2.3	COMPETITIVIDADE	56
2.3.1	Vantagem competitiva	58
2.4	SISTEMAS DE MENSURAÇÃO DE DESEMPENHO	59
2.5	ABORDAGEM MULTICRITÉRIO DE APOIO A DECISÃO (MCDA)	62
3	METODOLOGIA	67
3.1	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	67
3.2	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	68
3.2.1	Construção da modelagem	69
3.2.2	Resultados	70
4.	CONSTRUÇÃO DA MODELAGEM	73
4.1.	IDENTIFICAÇÕES DE CRITÉRIOS E FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO	73
4.2.	DEFINIÇÕES DE INDICADORES E ESCALAS DE AVALIAÇÃO	80
4.3	VALIDAÇÃO DOS INDICADORES E ESCALAS DE AVALIAÇÃO	81
4.4.	CONSTRUÇÃO DO MECANISMO DE AVALIAÇÃO	82
5.	RESULTADOS	83
5.1.	COLETA DE DADOS	83
5.2.	CÁLCULO DAS TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO	85
5.3	MENSURAÇÃO DO DESEMPENHO COMPETITIVO	90
5.4	SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO	93

6.	CONCLUSÕES	95
6.1.	LIMITAÇÕES.....	96
6.2.	ESTUDOS FUTUROS	96
6.3.	PUBLICAÇÕES REFERENTES AO ESTUDO	97
	REFERÊNCIAS	98
	APÊNDICE A- INDICADORES CONSTRUÍDOS PARA A MODELAGEM	115

1 INTRODUÇÃO

A alta densidade energética dos combustíveis de origem fóssil, a facilidade para o transporte e também para o armazenamento levou estes combustíveis a ser muito utilizados mundialmente há mais de um século. Na atualidade a mobilidade é dependente dos combustíveis de origem fóssil, porém os gases resultantes de sua combustão intensificam o efeito estufa. Logo é crescente a necessidade de encontrar soluções energéticas sustentáveis. Desta forma a tendência é que novos recursos energéticos ganhem espaço na matriz energética mundial. Entre os possíveis recursos energéticos candidatos a substituir os combustíveis de origem fóssil para a mobilidade estão o etanol, biodiesel, eletricidade (de origem eólica ou solar) e também o hidrogênio. O hidrogênio é um dos elementos químicos mais abundantes do planeta, contudo não é uma fonte energética primária, tendo que ser extraído da água, da biomassa, etanol, carvão mineral, entre outras fontes.

Acar e Dincer (2014) destacam que as principais vantagens ao se utilizar hidrogênio são: redução das importações de petróleo; aproveitamento das fontes de energia renováveis; zero emissões de carbono, hidrocarbonetos, gases causadores do efeito estufa (GEE) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (no ponto de utilização); e viabilidade econômica ao potencializar os futuros mercados globais de energia. Outra importante característica que o hidrogênio possui é sua energia específica elevada, com aproximadamente 120 MJ/kg em comparação com aproximadamente 42 MJ/kg para a gasolina (WONG; WU; JUAN, 2014).

Para usufruir das vantagens que este portador de energia possui e passar a utilizá-lo como substituto ou aditivo aos combustíveis de origem fóssil na mobilidade, toda uma infraestrutura para produção, armazenamento, transporte, e estações de abastecimento, precisam ser estabelecidas. O desenvolvimento de todas essas etapas é importante para tornar o hidrogênio um recurso energético competitivo na mobilidade.

Em algumas regiões, atualmente já existe uma parcela da infraestrutura necessária ou esforços a fim de implantá-la na mobilidade. Esses esforços partem do governo, de órgãos públicos, de instituições de ensino e pesquisa, de empresas, entre outros.

Dada à importância deste tema, frente ao cenário atual estabelecido na mobilidade, avaliar e mensurar os níveis de competitividade dos cenários que

utilizam hidrogênio se faz valoroso. Trata-se de um cenário competitivo na qual a concorrência com os veículos convencionais, híbridos ou ainda puramente elétricos tende a ser acirrada. Em um ambiente competitivo, cujos cenários mudam continuamente, é fundamental uma estratégia de negócios clara e bem desenhada, visando o sucesso das empresas ou cenários no longo prazo e a manutenção do valor conquistado (FERNANDES, 2014). Diante desse contexto, apresenta-se a seguinte pergunta: é possível mensurar e avaliar os níveis de competitividade dos cenários que utilizam hidrogênio como recurso energético para a mobilidade? Espera-se, portanto, nessa pesquisa, responder a este questionamento.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo teve como objetivo principal realizar uma modelagem para mensurar e avaliar o nível de competitividade dos cenários que utilizam hidrogênio como recurso energético para a mobilidade.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Descrever as principais características dos cenários que utilizam hidrogênio como recurso energético na mobilidade no contexto nacional e internacional;
- b) Identificar os fatores mais relevantes para a competitividade na utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade;
- c) Construir a modelagem com os fatores indicativos identificados;
- d) Testar a modelagem que visa mensurar a competitividade da utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade.

1.3 JUSTIFICATIVA

Como contribuição este estudo visa servir como documento para a tomada de decisões nos níveis empresariais ou governamentais, ou seja, elucidando se é vantajoso ou não investir na utilização do hidrogênio como combustível na

mobilidade. A partir dos resultados obtidos será possível também conhecer quais são as principais deficiências do hidrogênio na mobilidade.

No âmbito acadêmico científico, verificou-se em pesquisas na base de dados Scopus e Web of Science a existência de trabalhos semelhantes desenvolvidos. De acordo com o direcionamento pretendido foram definidas como palavras-chave: “*hydrogen as fuel for vehicles*”, “*competitiveness*”, “*performance indicators*”, “*performance assessment*” e “*multi-criteria decision*”. As palavras-chave foram cruzadas, com buscas realizadas no título, resumo e palavras-chave, para todos os anos. No quadro 1, é possível verificar o resultado das buscas e dos cruzamentos das palavras-chave.

Quadro 1- Resultados busca por palavras-chave no Scopus e Web of Science

Termos ou cruzamentos	Scopus	Web of science
<i>Performance assessment</i>	309856	162122
<i>Performance indicators</i>	82389	57082
<i>Competitiveness</i>	55478	36955
<i>Multi-criteria decision</i>	14353	9231
<i>Hydrogen as fuel for vehicles</i>	4129	1965
<i>Hydrogen as fuel for vehicles + performance assessment</i>	81	57
<i>Hydrogen as fuel for vehicles + performance indicators</i>	16	17
<i>Hydrogen as fuel for vehicles + competitiveness</i>	20	16
<i>Hydrogen as fuel for vehicles + multi-criteria decision</i>	8	6
<i>Hydrogen as a fuel for vehicles + competitiveness + performance indicators</i>	0	0
<i>Hydrogen as a fuel for vehicles + competitiveness + performance assessment</i>	4	2

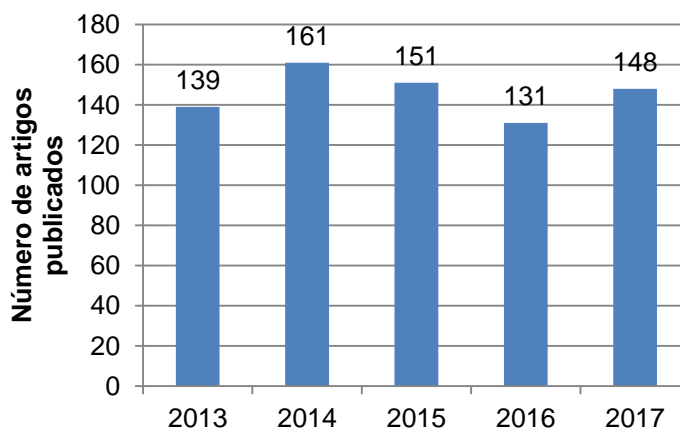
Fonte: Autor.

Os resultados das buscas dos cruzamentos do Quadro 1 foram analisados para verificar a existência de trabalhos semelhantes ao presente. Estas buscas realizadas evidenciaram a baixa ocorrência de estudos similares. Estes estudos encontrados são discutidos ao longo das seções 2.3, 2.4 e 2.5.

Realizada a leitura dos principais trabalhos selecionados, a serem apresentados na revisão bibliográfica, pode-se notar que há poucos trabalhos

semelhantes e desta forma comprova-se a importância do presente estudo. Posteriormente, os resultados da pesquisa no Scopus com a palavra-chave “*Hydrogen as fuel for vehicles*” foram refinadas para uma melhor análise dos dados. O refinamento foi realizado para os anos de 2013-2017 (5 anos), em artigos, revisões e artigos de conferência, resultando em 730 estudos. A distribuição dos artigos publicados ao longo dos anos aparece na Figura 1, onde percebe-se pouca variação no número de trabalhos publicados. A principal fonte de publicação foi o *International Journal of Hydrogen Energy* com 27,8% das publicações, seguido pela *SAE Technical Papers* com 6,44 %, *Journal of Power Sources* com 2,6% e *Applied Energy* com 2,46%. Ao pesquisar o número de documentos por país, os Estados Unidos aparecem na frente com 23% das publicações, seguido por China com 9% e Japão com 8%.

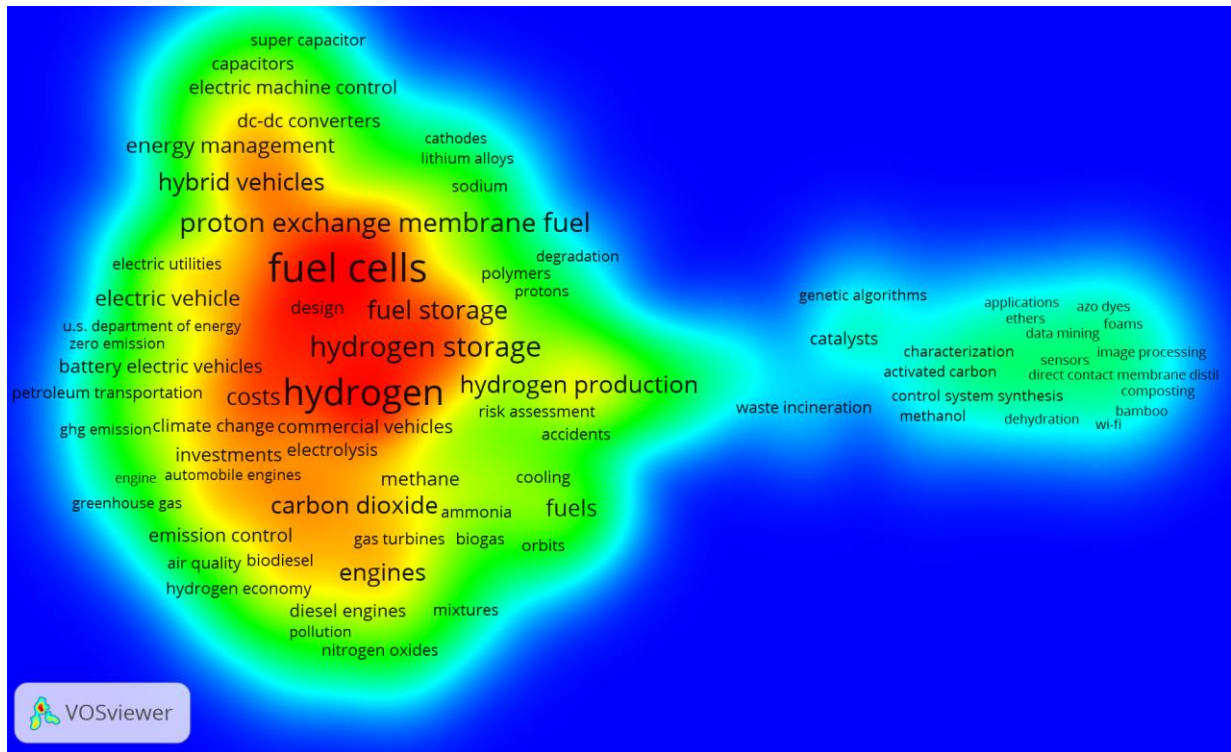
Figura 1- Busca no Scopus com a palavra-chave “*hydrogen as fuel for vehicles*”



Fonte: Autor.

Ainda analisou-se mais detalhadamente pesquisa ilustrada na Figura 1 com o Software VOSviewer através de uma co-ocorrência de palavras-chave. A coocorrência de palavras-chave trata da manifestação conjunta de duas ou mais palavras representativas. As palavras-chave mais recorrentes e próximas foram, conforme a Figura 2: *fuel cells*, *hydrogen*, *hydrogen storage*, *proton exchange membrane fuel cells*, *fuel storage* e *hydrogen production*.

Figura 2- Análise de co-ocorrência de palavra-chave no VOSviewer

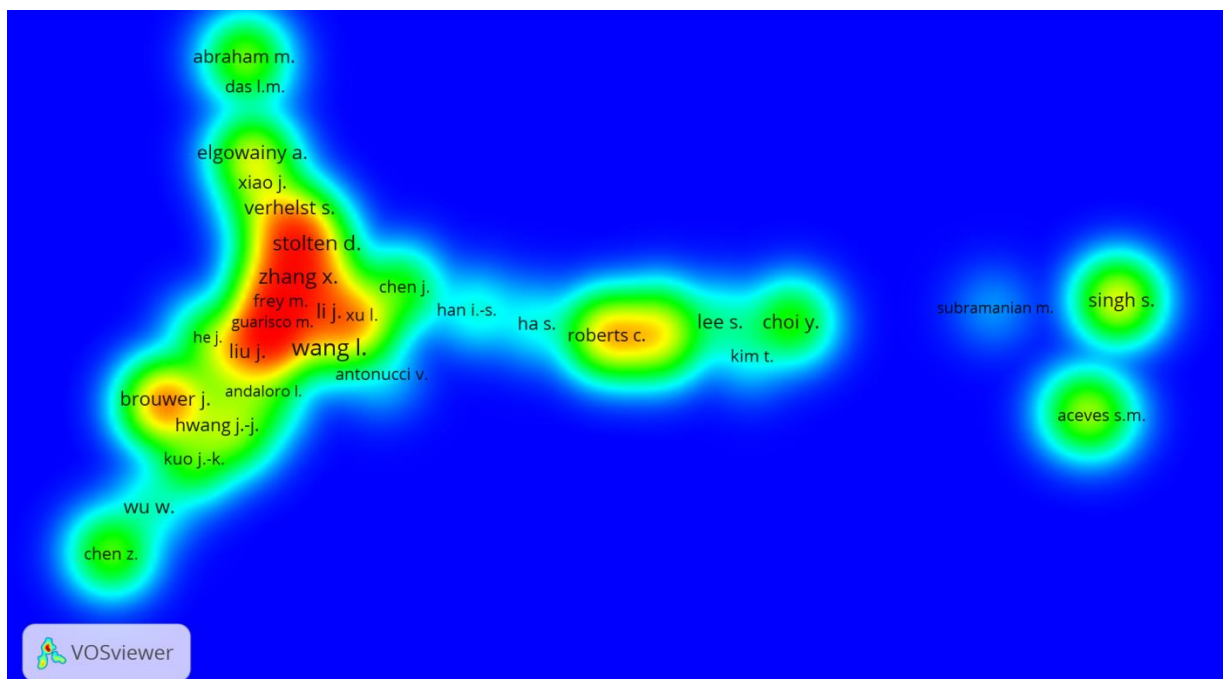


Fonte: Autor.

A região em vermelho da Figura 2 representa que as palavras-chaves dessa área são mais recorrentes. A quantidade de ilhas da Figura 2 indica que há um grande relacionamento entre as palavras.

Realizou-se uma análise de citação de autores no Software VOSviewer, Figura 3, onde percebe-se que os autores com mais artigos publicados na área são: Wang L. (8 documentos), Stolten D. (6 documentos), Li J. (6 documentos), Ouyang M. (6 documentos), Jabr R. (6 documentos), Hirata K. (6 documentos), Tomoda K. (6 documentos), Hoshi N. (6 documentos). Já os autores com maior quantidade de citações são: Malardier-Jugroot C. (151 citações), Durbin D. J. (151 citações), Stolten D. (128 citações), Li J. (110 citações), Wang L. (102 citações), Schiebahn S. (101 citações), Tietze V. (100 citações).

Figura 3- Análise de citação de autores no VOSviewer



Fonte: Autor.

2 REVISÃO DE LITERATURA

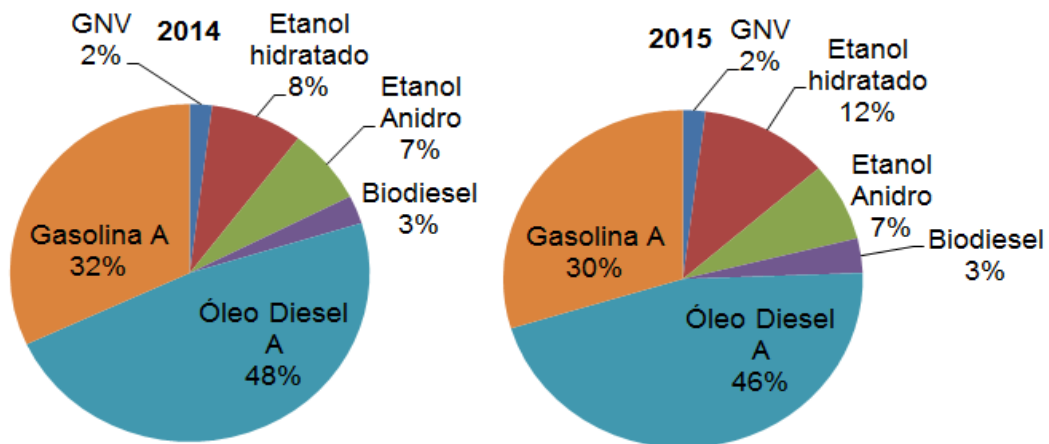
Neste capítulo serão abordados os conceitos que são fundamentais para o embasamento e o desenvolvimento da pesquisa. Considerando o objetivo principal que foi proposto, mostrou-se essencial realizar uma revisão acerca do panorama da mobilidade, item 2.1, retratando um pouco de como se encontra a participação dos diversos combustíveis na matriz veicular. Também serão revisados os conceitos envolvidos no emprego do hidrogênio como combustível na mobilidade, item 2.2, como a produção, armazenamento, distribuição, veículos a célula de combustível (FCV) e veículos com motores de combustão interna (ICEV).

Posteriormente, será apresentada uma revisão acerca do que é competitividade, item 2.3, dos níveis de competitividade e vantagem competitiva. E para o desenvolvimento da modelagem, será dissertado sobre os sistemas de mensuração de desempenho, item 2.4, mostrando os principais métodos e como realizar o processo de escolha do método. Por último, no item 2.5, é apresentada a abordagem multicritério de apoio à decisão (MCDA), visto que alguns traços desses conceitos serão utilizados.

2.1 PANORAMA DA MOBILIDADE

Na atualidade, em geral, os combustíveis de origem fóssil são os mais utilizados para a mobilidade. No contexto da matriz veicular brasileira, no ano de 2014, a gasolina representava 32% da matriz e o óleo diesel 48%, já em 2015 houve uma redução para 30% e 46% da demanda, conforme a Figura 4. Percebe-se no Brasil uma boa representatividade dos combustíveis renováveis na matriz veicular, devido ao uso obrigatório de etanol adicionado na gasolina. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol e o primeiro com etanol proveniente de cana-de-açúcar (DE SOUZA MELO; SAMPAIO, 2014). Em 2016 os automóveis comerciais leves *flex-fuel* representaram 88% dos licenciamentos no Brasil, e a diesel 7,9% (ANFAVEA, 2017).

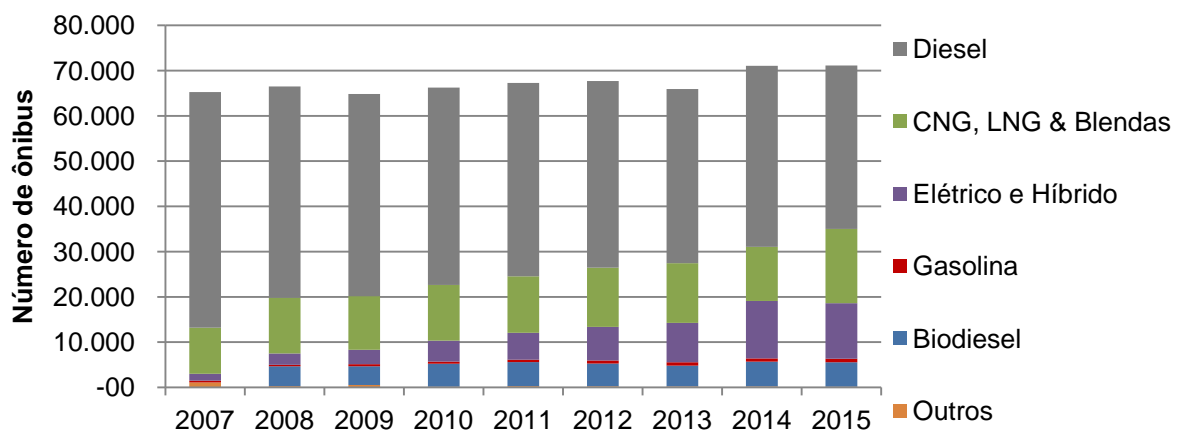
Figura 4- Matriz veicular brasileira



Fonte: Adaptado de ANP (2016).

Nos Estados Unidos a dependência dos combustíveis de origem fóssil também é grande. A frota de ônibus que está rodando, por exemplo, ainda é muito dependente do Diesel, porém conforme é perceptível na Figura 5, está a cada ano cedendo espaço para os veículos elétricos e híbridos. O biodiesel, o gás natural comprimido (CNG- *compressed natural gas*), gás natural liquefeito (LNG- *liquefied natural gas*) e misturas também são utilizados na frota de ônibus dos Estados Unidos.

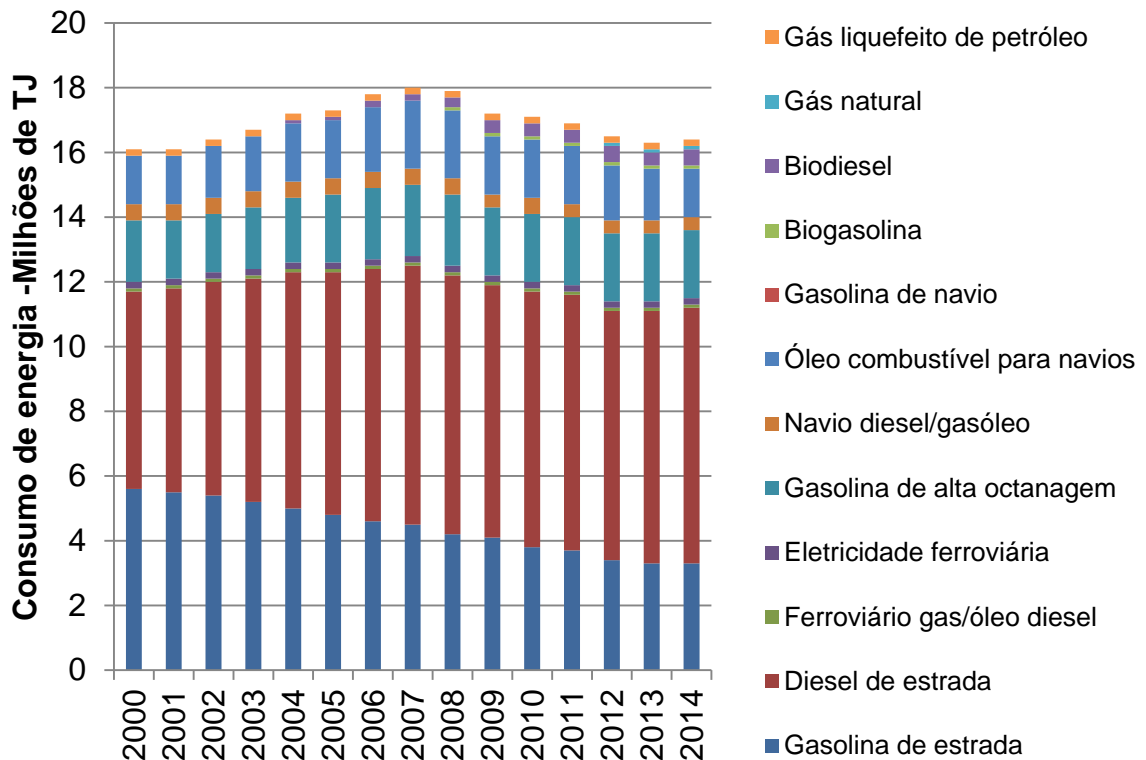
Figura 5-Número de ônibus em uso nos Estados Unidos por tipo de combustível



Fonte: Adaptado de American Public Transportation Association (2016 apud DOE, 2016).

Na União Europeia (UE) o consumo de energia por modal também é bastante dependente dos combustíveis de origem fóssil. No ano de 2014 a gasolina e o diesel eram os combustíveis mais utilizados como pode ser visto na Figura 6. O biodiesel e a biogasolina representavam uma parte pouco significativa da matriz energética. Os transportes realizados por navios também são dependentes dos combustíveis de origem fóssil, assim como a aviação que utiliza o querosene e gasolina de elevada octanagem. Na UE em 2014 os carros de passeio foram responsáveis por 44% das emissões de GEE e os veículos pesados de trabalho e ônibus foram responsáveis por 18,4% (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2016).

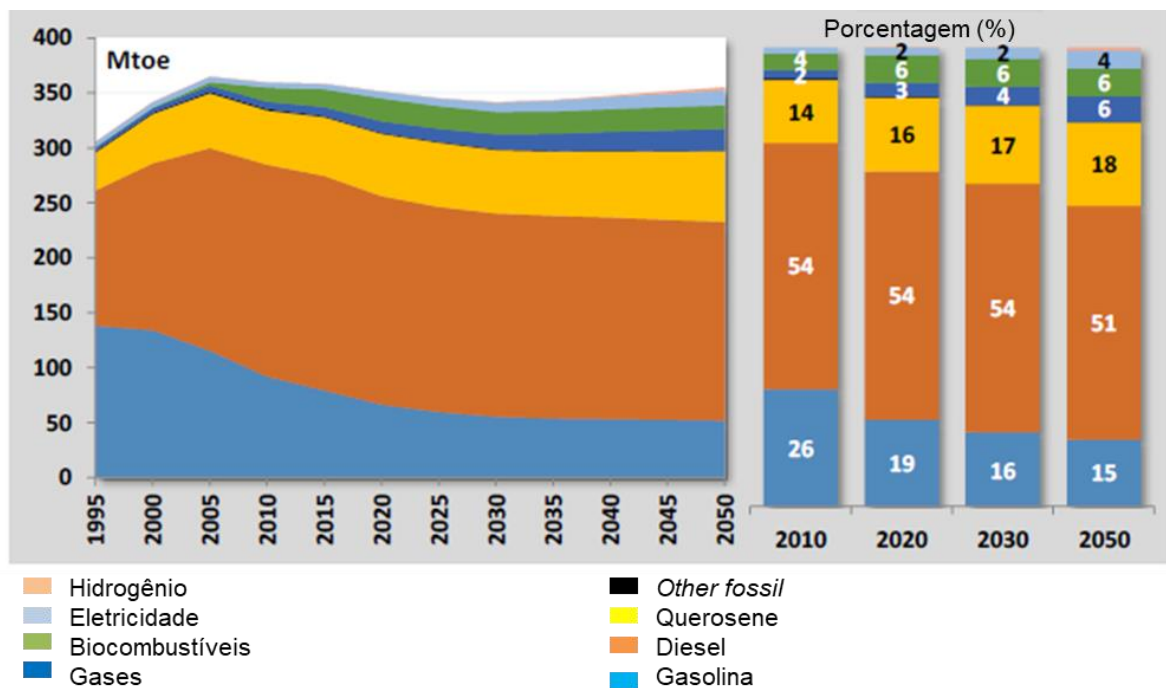
Figura 6- Combustíveis utilizados para a mobilidade na Europa



Fonte: Adaptado de Eurostat (2016 apud EUROPEAN ENVIROMENT AGENCY, 2016).

Na Europa prevê-se que a utilização do diesel na mobilidade mantenha sua quota total na matriz até 2030, continuando ser o combustível primário para veículos pesados. Prevê-se também que o consumo total de gasolina diminua consideravelmente, conforme a Figura 7. Essa quota na procura total de energia cedida pela gasolina passará a ser ocupada por biocombustíveis, eletricidade e hidrogênio.

Figura 7- Demanda de energia para o transporte por tipo de combustível na Europa



Fonte: Adaptado de Capros et al. (2016).

Como visto, estima-se que a matriz energética mundial venha a mudar no futuro, passando a ser ocupada paulatinamente por combustíveis renováveis. Desta forma o hidrogênio poderá ter espaço para ser utilizado na mobilidade em alguns possíveis cenários.

2.2 UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL NA MOBILIDADE

A tecnologia do hidrogênio para a mobilidade é composta de diversas etapas importantes, que vão desde sua produção, armazenamento, distribuição, e emprego do hidrogênio na mobilidade. Nas seções 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4 serão detalhadas cada uma dessas etapas, mostrando a situação tecnológica atual, os principais desafios e projetos desenvolvidos nacionalmente e internacionalmente. Na seção 2.2.5 é relatado sobre as leis e incentivos fiscais para a utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade.

2.2.1 Produção de hidrogênio

A etapa de produção de hidrogênio pode ser realizada através de diversos métodos de produção, seja eles renováveis ou não renováveis, cada qual com suas potencialidades e desafios. Antes de falar propriamente sobre os métodos de produção de hidrogênio é interessante entender as principais categorias de impacto, assim como o que é eficiência e custo, conforme será descrito na seção 2.2.1.1.

2.2.1.1 Categorias de impacto, eficiência e custo

A compreensão dos potenciais impactos envolvidos no ciclo de vida dos métodos de produção de hidrogênio é um aspecto fundamental da tecnologia do hidrogênio na mobilidade, assim como o que é eficiência e custo. Então para uma posterior comparação e análise entre os diversos métodos de produção de hidrogênio existentes é importante a compreensão dos tópicos a seguir:

- a) Acidificação potencial (*acidification potential-AP*): está relacionada ao potencial de deposição de poluentes no ecossistema, água e solo. Os principais contribuintes que levam a acidificação são os sulfatos, fosfatos e nitratos (SULEMAN; DINCER; AGELIN-CHAAB, 2015).
- b) Potencial de aquecimento global (*global warming potential-GWP*): é o impacto relacionado às emissões de gases causadores do efeito estufa para a atmosfera, que levam a mudanças climáticas (OZBILEN; DINCER; ROSEN, 2013).
- c) Depleção abiótica (*abiotic depletion*): em muitas ocasiões combustíveis não renováveis, metais e minerais são utilizados para a produção do hidrogênio, o potencial de depleção abiótica mede o impacto causado pelo uso desses recursos (HAJJAJI et al., 2013). Abrange todos os recursos de combustíveis fósseis, sendo medido em MJ/MW H₂ (MURESAN; CORMOS; AGACHI, 2014).
- d) Custo social do carbono (*social cost of carbon- SCC*): é uma medida do custo associado ao bem-estar de um cenário de referência que foi perturbado (ACAR; DINCER, 2014).
- e) Eficiência energética (*energy efficiency*): razão entre a energia concedida ao sistema e a energia gerada pelo sistema. A revisão de literatura

realizada por Dincer e Zamfirescu (2012) é utilizada como referência para apresentar a eficiência energética (η) de um método de produção de hidrogênio, sendo que é equacionada (Eq. 1) da seguinte maneira:

$$\eta = \frac{\dot{m} \times \text{LHV}}{E_{in}} \quad (1)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica de hidrogênio produzido, LHV é o poder calorífico inferior do hidrogênio (121 MJ/kg) e E_{in} é a energia que entra para o processo.

- f) Eficiência exergética (*exergy efficiency*): “a exergia (ou disponibilidade) pode ser interpretada como o máximo trabalho disponível no estado considerado” (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009, p. 301). A exergia identifica claramente melhorias de eficiência e reduções nas perdas termodinâmicas atribuíveis a tecnologias verdes (ROSEN; DINCER; KANOGLU, 2008). Conforme acontece a aproximação da eficiência exergética em 100%, os impactos ambientais reduzem-se a zero. Dincer e Zamfirescu (2012) também apresentam o equacionamento (Eq. 2) da eficiência de exergia (ψ):

$$\psi = \frac{\dot{m} ex^{ch}}{E \dot{X}_{in}} \quad (2)$$

Onde $\dot{m} ex^{ch}$ é a exergia química do hidrogênio e $E \dot{X}_{in}$ é a taxa de entrada para o processo de exergia.

2.2.1.2 Comparação entre os métodos de produção de hidrogênio

A produção de hidrogênio pode se dar através de diversos métodos e fontes (ABDIN; WEBB; GRAY, 2015). Essa variedade de fontes inclui recursos renováveis ou de origem fóssil (SHARMA; GHOSHAL, 2015). Entre os principais métodos para a produção destacam-se os seguintes: eletrólise da água (com energia elétrica fotovoltaica, eólica, hídrica ou nuclear), gaseificação de biomassa, reforma a vapor de combustíveis líquidos, fermentação de biomassa, gaseificação de carvão,

pirólise, térmolise, fotocatalise, decomposição de arco de plasma, fotofermentação, entre outros.

Dincer e Acar (2015) estudaram 19 métodos de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis e não renováveis (Quadro 2). Os métodos foram comparados com base na eficiência energética, eficiência exergética, custo de produção, GWP, AP e SCC. A comparação para GWP, AP, SCC, e os custos de produção, são com base em uma escala de 0 e 10, onde “0” representa um baixo desempenho e “10” o caso ideal. Por exemplo, em termos de GWP a gaseificação de carvão proporciona as maiores emissões, portanto é designada para receber “0”. Já a normalização para as eficiências é calculada multiplicando a eficiência do método por 10. O método que receber “0” indica que tem um mau desempenho e “10” indica 100% de eficiência. Por exemplo, na eficiência energética da eletrólise o valor 5,3 não quer dizer que para cada MJ injetado no processo se obtém 5,3 MJ de energia na forma de H₂.

Com base nos dados apresentados no Quadro 2, e com a análise de outros estudos desenvolvidos na área as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- a) Os maiores potenciais de aquecimento global são apresentados pelos métodos de reforma de combustíveis fósseis, gaseificação de carvão e decomposição arco de plasma (SULEMAN; DINCER; AGELIN-CHAAB, 2015);
- b) Os maiores custos de produção são obtidos pelo método fotoeletroquímico e eletrólise fotovoltaica;
- c) Gaseificação de biomassa, reforma de biomassa, gaseificação de carvão e conversão de biomassa possuem os maiores APs;
- d) As melhores eficiências energéticas foram obtidas pela reforma de combustíveis fósseis, decomposição por arco de plasma, gaseificação de biomassa e gaseificação de carvão (DINCER; ZAMFIRESCU, 2012; ACAR; DINCER, 2014);
- e) A maior eficiência exergética é alcançada pela gaseificação de biomassa, ciclos híbridos termoquímicos, a gaseificação do carvão, reforma de combustíveis fósseis e conversão de biomassa.

Quadro 2- Comparação entre os métodos de produção de hidrogênio

Método	Eficiência energética	Eficiência de exergia	Custo	SCC	GWP	AP
Eletrólise	5,3	2,5	7,34	3,33	3,33	8,86
Decomposição por arco de plasma	7	3,2	9,18	0,83	0,83	5,14
Termólise	5	4	6,12	7,5	7,5	7,43
Separação termoquímica da água	4,2	3	8,06	9,17	9,17	9,43
Conversão de biomassa	5,6	4,5	8,1	6,67	6,67	2
Gaseificação de biomassa	6,5	6	8,25	5,83	5,83	0
Reforma de biomassa	3,9	2,8	7,93	6,25	6,25	0,86
Eletrólise fotovoltaica	1,24	0,7	4,5	7,5	7,5	7,71
Fotocatálise	0,2	0,1	5,19	9,58	9,58	9,71
Método fotoeletroquímico	0,7	0,15	0	9,58	9,58	9,71
Fermentação escura	1,3	1,1	7,52	9,58	9,58	9,71
Eletrólise de alta temperatura	2,9	2,6	5,54	7,92	7,92	8,57
Ciclos termoquímicos híbridos	5,3	4,8	7,41	9,43	9,43	9,02
Gaseificação de carvão	6,3	4,6	9,11	0	0	1,31
Reforma de combustíveis fósseis	8,3	4,6	9,28	2,5	2,5	5,71
Biofotólise	1,4	1,3	7,27	7,5	7,5	9,71
Fotofermentação	1,5	1,4	7,61	9,58	9,58	9,71
Fotosíntese artificial	0,9	0,8	7,54	9,58	9,58	9,71
Fotoeletrólise	0,78	0,34	7,09	8,33	8,33	9,71
Ideal (zero-emissões e custo, 100% de eficiência)	10	10	10	10	10	10

Fonte: (DINCER; ACAR, 2015).

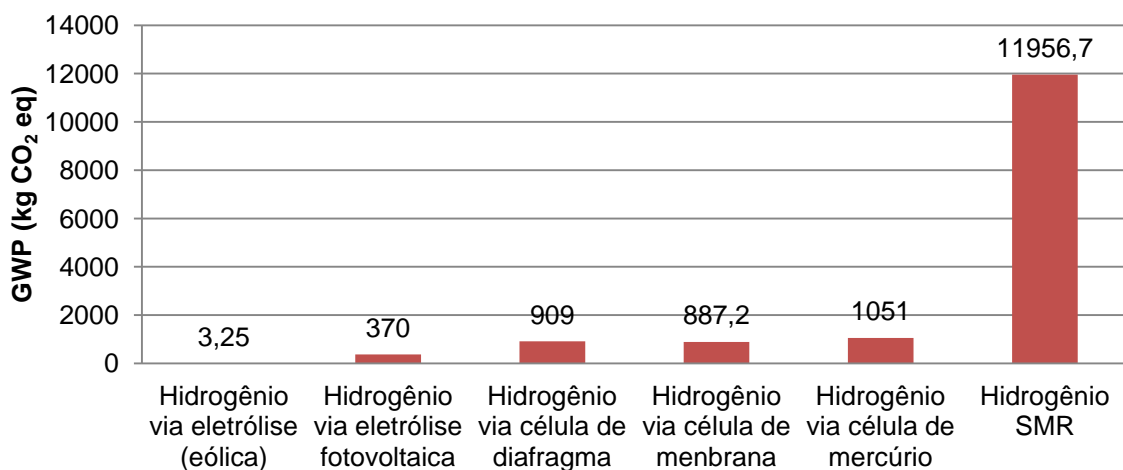
Suleman, Dincer e Agelin-Chaab (2016) investigaram os impactos ambientais de diferentes métodos de produção de hidrogênio, analisando seus ciclos de vida. Os resultados da avaliação do ciclo de vida dos processos de produção de hidrogênio indicam que a reforma a vapor (SMR– *Steam Methane Reforming*) do gás natural tem os maiores impactos ambientais em termos de depleção abiótica, GWP (Figura 8), gases de efeito estufa e de outras categorias de impacto. O GWP do hidrogênio SMR é bem mais elevado do que o hidrogênio produzido via eletrólise.

Ozbilen, Dincer e Rosen (2013) também analisaram os impactos ambientais de diversos métodos de produção de hidrogênio, considerando várias fontes de energia e usando análise do ciclo de vida. Os resultados mostram que SMR do gás

natural tem o maior impacto ambiental global. Os métodos de produção com ciclos termoquímicos utilizando energia nuclear e eletrólise da água com energia renovável tem efeitos menores no ambiente do que a SMR. Quanto a AP é indicado que a gaseificação da biomassa tem o maior impacto sobre o meio ambiente e eletrólise eólica tem o menor impacto.

Bhandari, Trudewind e Zapp (2014), revisaram alguns estudos que abordam o ciclo de vida de tecnologias de produção de hidrogênio. Sob o enfoque do ciclo de vida, a eletrólise (com energia eólica ou a energia hidroelétrica) é um dos melhores processos de produção de hidrogênio, em comparação com a energia elétrica das redes convencionais ou energia elétrica de origem fóssil. Neste estudo os autores também compararam graficamente o GWP, onde a eletrólise com energia da rede elétrica, gasificação de carvão e SMR do gás natural apresentaram os maiores impactos. O GWP pode ser normalizado para emissões de CO₂ equivalente para descrever a contribuição geral dentro das mudanças climáticas globais. Trata-se de uma medida padronizada da quantidade de gases do efeito estufa, como do CO₂, CH₄ e N₂O.

Figura 8- GWP por kg de hidrogênio para diversos métodos de produção de hidrogênio



Fonte: Adaptado de Suleman, Dincer, Agelin-Chaab (2016).

Alguns trabalhos existentes na literatura também apresentam comparações a fim de mensurar o custo de produção de hidrogênio entre os diversos métodos

existentes. Uddin e Daud (2014) revisaram vários métodos de produção de hidrogênio sob o ponto de vista econômico. As estimativas revelam que a produção de hidrogênio a partir da gaseificação do carvão (0,36-1,83 US \$/kg) possui o menor custo de produção/kg, seguido por pirólise da biomassa (1,47-2,57 US \$/kg) e gaseificação da biomassa (1,44-2,83 US \$/kg). O custo de produção da eletrólise com energia eólica depende do tamanho das turbinas eólicas e do tipo de eletrolisadores utilizados, sendo de 5,50 US \$/kg. Na eletrólise da água o custo tomado em conta no estudo leva em consideração o custo de capital, consumo de energia e os custos operacionais, resultando em 8 US \$/kg. Hosseini e Wahid (2016) também apresentaram o custo de produção do hidrogênio, tomando o preço da gasolina como referência, Quadro 3. O custo de produção de hidrogênio a partir da eletrólise com eletricidade renovável é elevado, muito influenciado pelo preço da energia elétrica, se comparado ao da gasolina. A gaseificação do carvão apresenta um custo de produção próximo ao da gasolina, porém seu GWP é elevado.

Quadro 3- Custo de produção do hidrogênio

Processo	Custo do hidrogênio (US\$ por kg)
Reforma do gás natural	1,03
Gás natural + sistemas de captura de carbono	1,22
Gaseificação do carvão	0,96
Carvão + sistemas de captura de carbono	1,03
Eletrólise eólica	6,64
Gaseificação da biomassa	4,63
Pirólise da biomassa	3,8
Separação térmica nuclear da água	1,63
Gasolina (para referência)	0,93

Fonte: Hosseini, Wahid (2016).

2.2.1.3 *Produção mundial de hidrogênio*

Grande parte da produção mundial de hidrogênio é utilizada em refinarias de petróleo, na indústria química, e na transformação de alimentos. No ano de 2014, no mundo, cerca de 33,10 milhões de toneladas métricas (MMT) foram consumidas em

refinarias de óleo; 31,81 MMT na indústria de amônia; 15,63 MMT na indústria de coque e ferro; 13,50 na indústria de metanol e 9,43 MMT em outras indústrias (BROWN, 2016). Cerca, de 95% do hidrogênio é produzido a partir de métodos que usam recursos de origem fóssil, 4% a partir de eletricidade e 1% com biomassa (HOSSEINI; WAHID, 2016), sendo que 50% da produção baseada em recursos de origem fóssil é por SMR do gás natural (BRAGA et al., 2017). Esta é geralmente a tecnologia mais competitiva para a capacidade da planta até aproximadamente 250.000 Nm³ (*Normal cubic meters*, metro cúbico normal) de H₂ por hora (GUANDALINI; CAMPANARI; VALENTI, 2016). A unidade utilizada para a vazão de um gás, como por exemplo, o H₂, é Nm³/h, pois se trata de um gás compressível, então a vazão volumétrica não faria sentido sem informar a temperatura e pressão. A vazão, nesse caso, é medida na pressão de 1 atmosfera ou 101.325 kPa, temperatura de 0°C e umidade relativa de 0% (HORDESKI, 2009).

Na América do Norte a capacidade total de produção de hidrogênio comercial é de 15118169 kg/dia, na Europa 3794940 kg/dia e na Ásia 3744644 kg/dia (HYDROGEN ANALYSIS RESOURCE CENTER, 2016). Os países com maior capacidade de produção de hidrogênio comercial em 2016 eram os Estados Unidos, Coreia do Sul, Japão, Alemanha, Canadá e Kuwait. Entre as principais empresas produtoras de hidrogênio destacam-se a Air Liquide, Air Products, Linde e Praxair (BRONW, 2016).

2.2.2 Armazenamento de hidrogênio

Duas características são importantes para a aplicação do hidrogênio como combustível, a energia específica e a densidade energética. (ZACHARIA; RATHER, 2015). Em comparação com hidrocarbonetos o hidrogênio tem boa densidade por peso, porém uma baixa densidade em volume (ROES; PATEL, 2011). Esta é a principal dificuldade enfrentada para o armazenamento do hidrogênio e o transporte.

Para utilizar o hidrogênio como combustível o seu estado físico tem de ser alterado a fim de melhorar suas características, ou seja, sua densidade por volume. Os processos de armazenamento podem ser por compressão, liquefação, armazenamento físico em hidretos ou armazenamento químico em hidretos, como será descrito na seção 2.2.2.

2.2.2.1 *Armazenamento por compressão*

A compressão do hidrogênio é o método mais utilizado para seu armazenamento na atualidade. Nesse processo o hidrogênio é comprimido em tanques, com tecnologias bastante semelhantes às utilizadas para a compressão do gás natural (CIPRIANI et al., 2014). As pressões de armazenamento do hidrogênio normalmente variam entre 20-25 MPa. A tendência para o futuro é usar 70 MPa para o armazenamento em tanques (ZHANG; HU, 2014).

Os veículos Toyota Mirai e Hyundai Tucson são exemplos de veículos com o armazenamento de hidrogênio a 70 MPa, seus tanques possuem respectivamente um volume de 122,4 litros e 140 litros. Esses tanques propiciam uma autonomia de cerca de 426 km para o Tucson e 500 km para o Mirai. O volume desses tanques inviabiliza um espaço considerável do veículo, ainda mais com a utilização de tal tecnologia em um veículo compacto.

Essa dificuldade pode influenciar a aceitação pública desses veículos. Duas dificuldades potenciais para a utilização de hidrogênio comprimido são a aceitação pública e desenvolvimento de infraestrutura (JORGENSEN, 2011). Entre as principais dificuldades encontradas com a infraestrutura do hidrogênio armazenado por compressão estão:

- a) Segurança do sistema de armazenamento (YADAV; XU, 2012; NAJJAR, 2013; PUKAZHSELVAN; KUMAR; SINGH, 2012);
- b) Baixa densidade volumétrica (ZACHARIA; RATHER, 2015).

Tais deficiências encontradas dificultam o armazenamento de hidrogênio por compressão em larga escala em automóveis. Os tanques de gás com hidrogênio comprimido oferecem uma opção inicial para a comercialização.

2.2.2.2 *Armazenamento por liquefação*

O hidrogênio pode ser armazenado em seu estado líquido, sendo incolor e não corrosivo. Os tanques de hidrogênio líquido podem armazenar 0,070 kg/L em comparação com 0,030 kg/L para o caso de armazenamento por compressão (NIAZ; MANZOOR; PANDITH, 2015). O armazenamento do hidrogênio como um líquido requer temperaturas criogênicas.

No estado atual da tecnologia algumas dificuldades precisam ser contornadas para essa técnica de armazenamento ser viável, entre elas destacam-se:

- a) De 30 a 33% do total da energia do hidrogênio é utilizada para a liquefação do hidrogênio gasoso (HWANG; VARMA, 2014; PUDUKUDY et al., 2014; YANG; OGDEN; 2007).
- b) Alto custo dos materiais empregados nos tanques de armazenamento (PUDUKUDY et al., 2014);
- c) Segurança no armazenamento (HWANG; VARMA, 2014);
- d) Perdas por evaporação nos tanques de armazenamento (DURBIN; MALARDIER-JUGROOT, 2013; CIPRIANI et al., 2014).

Por essas razões é improvável que o armazenamento de hidrogênio liquefeito venha atender as necessidades com o intuito de utilizar em larga escala em veículos, embora haja um espaço para melhoria.

2.2.2.3 *Armazenamento químico em hidretos*

Os hidretos químicos são materiais onde o hidrogênio fica quimicamente ligado (DURBIN; MALARDIER-JUGROOT, 2013). Os materiais que podem armazenar o hidrogênio quimicamente são os hidretos de metais, ácido fórmico, hidrocarbonetos sintéticos, hidrocarbonetos portadores de hidrogênio líquido, hidratos de carbono e amoníaco (BASTOS-NETO et al., 2012).

Com os hidretos químicos é possível obter maiores densidades de energia, em comparação a os hidretos metálicos (YADAV; XU, 2012; HWANG; VARMA, 2014; ZHU; XU, 2015). Os elementos mais leves e os hidretos covalentes são inseguros e instáveis para trabalhar a bordo de um veículo (LEY et al., 2014). Este método possui algumas limitações, entre elas a irreversibilidade (TAN; YU, 2013; MOUSSA et al., 2013; AARDAHL; RASSAT, 2009), a absorção de impurezas (NIAZ; MANZOOR; PANDITH, 2015), controle da cinética da reação e o custo (ZHU; XU, 2015).

Lu e Xu (2012) revisaram os métodos de armazenamento químico com boro e nitrogênio. Os resultados indicam que ainda há limitações que precisam ser supridas, como a regeneração dos subprodutos, controle da cinética da reação, custo e também a desativação do catalisador. Moury e Demirci (2015) estudaram a hidrazina e derivados de borano e derivados alcalinos como materiais para

armazenamento de hidrogênio. Os resultados indicaram que é necessário melhorar a cinética da reação, pois é demasiadamente lenta em comparação com a da primeira reação e também é necessário obter melhores resultados com a estabilidade dos catalisadores em usos sucessivos. Já para Semelsberger e Brooks (2015) as principais deficiências do armazenamento químico do hidrogênio é a eficiência de regeneração, o custo do combustível e a fase do combustível.

2.2.2.4 *Armazenamento físico em hidretos*

Os metais servem como meio de armazenamento de hidrogênio. Alguns metais ou ligas podem absorver o hidrogênio e liberar após o aquecimento, reação que resulta nos chamados hidretos metálicos (ZHANG; HU, 2014). Teoricamente os hidretos de metais são um dos processos de maior simplicidade para armazenar hidrogênio, pois trata-se de uma reação entre H_2 com uma liga de metal ou um metal (MCWHORTER et al, 2012). Existem vários elementos metálicos que podem armazenar hidrogênio, contudo apenas alguns são apropriados para armazenar em temperaturas e pressões moderadas (BHUIYA; KUMAR; KIM, 2015). Alguns exemplos são *metal organic frameworks carbon* ou outras nanoestruturas e os *clathrates* (DURBIN; MALARDIER-JUGROOT, 2013).

Entre as principais vantagens do armazenamento em hidretos metálicos pode-se destacar: é um método seguro (ZACHARIA; RATHER, 2015; PUDUKUDY et al., 2014); pouco tempo para o armazenamento (NIAZ; MANZOOR; PANDITH, 2015; HWANG; VARMA, 2014); e é um processo reversível em condições moderadas (LEY et al., 2014). Contudo, adsorventes com entalpias mais elevadas terão de ser identificados (BASTOS-NETO et al., 2012). Outro problema é que devido à fraca interação entre as moléculas de H_2 e do adsorvente, elevada capacidade de armazenamento é tipicamente alcançado apenas em temperatura criogênica (VENKATARAMANAN; KAWAZOE, 2011).

2.2.3 Distribuição do hidrogênio

A etapa de distribuição do hidrogênio é constituída pela infraestrutura necessária para o transporte do hidrogênio e para o abastecimento em estações

públicas ou privadas. Na seção 2.2.3.1 são discutidos os principais meios de transporte do hidrogênio e na seção 2.2.3.2 são abordadas as estações de abastecimento.

2.2.3.1 Meios de transporte do hidrogênio

O transporte do hidrogênio constitui uma etapa importante para a viabilidade da tecnologia do hidrogênio na mobilidade. É necessária uma infraestrutura para realizar o transporte do hidrogênio da produção até a utilização e também até os postos de reabastecimento (SINGH et al., 2015). Existem algumas alternativas para realizar o transporte do hidrogênio (NAJJAR, 2013):

- a) Em gasodutos, como os de gás natural, ou em reboques tubo, para o hidrogênio gasoso;
- b) Para o hidrogênio líquido, pode ser com caminhões e navios com tanques criogênicos;
- c) A energia primária (etanol, metanol, biomassa, etc.) pode ser transportada e o hidrogênio produzido no local do uso.

O transporte pode ser feito usando mais de uma dessas alternativas até a chegada e utilização final: para longas distâncias na forma líquida, pode ser transportado em petroleiros, barcaças, vagões; para pequenas distâncias, em cilindros de alta pressão (PUDUKUDY et al., 2014).

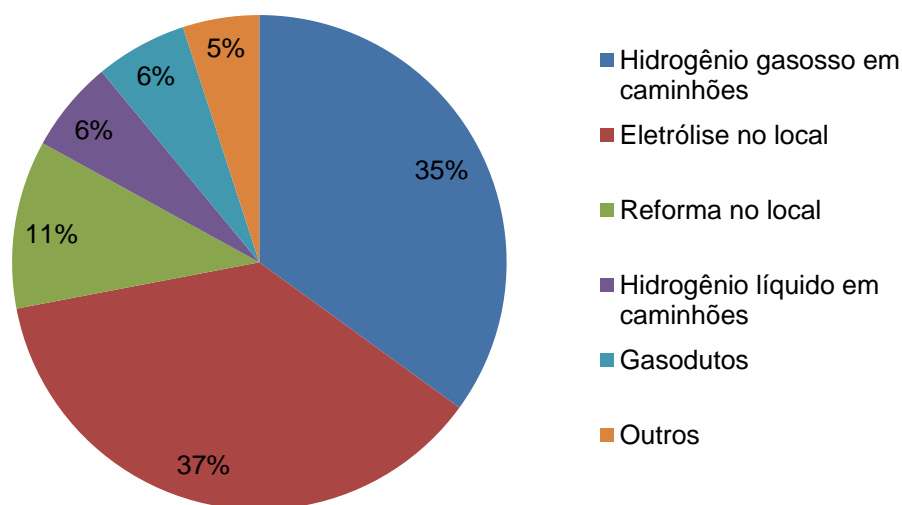
O transporte em gasodutos é o preferido para gases. Nos gasodutos o transporte torna-se mais econômico (FEKETE; SOWARDS; AMARO, 2015), o custo de manutenção é baixo, porém exige elevados custos de capital (SINGH et al., 2015; CIPRIANI et al., 2014). Principalmente nos estágios iniciais da utilização do hidrogênio como combustível para a mobilidade poderiam ser utilizados os gasodutos de gás natural. No entanto, a maioria dos condutos de gás de alta pressão é composta de aços inoxidáveis ferríticos, que são conhecidas por serem fragilizados pelo hidrogênio (SALVI; SUBRAMANIAN, 2015; YANG; OGDEN, 2007). Os principais efeitos do hidrogênio sobre os aços são *hydrogen blistering*, fratura induzida por hidrogênio e fragilização por hidrogênio (REITENBACH et al., 2015).

Devido ao alto custo de instalação de um gasoduto, o hidrogênio pode ser transportado em caminhões, usando diversas técnicas de armazenamento (CIPRIANI et al., 2014). Em caminhões pode ser transportado na forma líquida ou

gasosa. Com o transporte do hidrogênio liquefeito é possível carregar uma densidade maior de combustível em comparação com o gás comprimido, porém envolve custos mais elevados devido ao isolamento necessário e os sistemas de refrigeração (CIPRIANI et al., 2014). As principais barreiras para a utilização de hidrogênio líquido são o alto custo e uso de grande quantidade de energia para liquefação (BALAT, 2008).

No ano de 2015, segundo a International Energy Agency, a produção de hidrogênio no mundo era 37% realizada no local da utilização, e 35% era transportada em caminhões na forma gasosa (Figura 9). Porém para uma economia de hidrogênio se estabelecer efetivamente, o transporte em gasodutos e caminhões com hidrogênio líquido precisa ser melhor explorado.

Figura 9- Principais meios de transporte do hidrogênio no mundo



Fonte: Adaptado de Weeda e Elgowainy (2015).

2.2.3.2 Estações de abastecimento de hidrogênio

A estratégia de transporte de hidrogênio exigiria uma rede de estações de reabastecimento de hidrogênio em todo o país. Tal rede inclui (MANIATOPOULOS; ANDREWS; SHABANI, 2015):

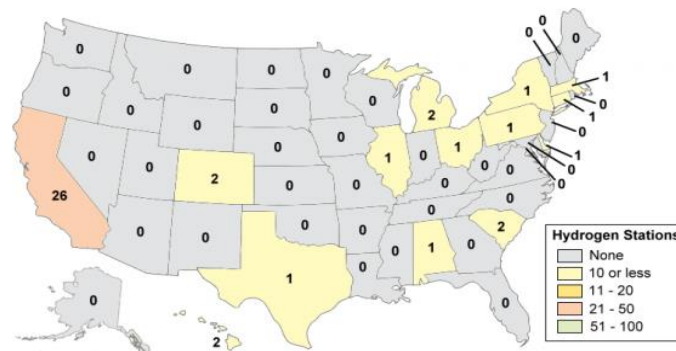
- a) Estações de reabastecimento para o público;
- b) Estações de reabastecimento privadas para empresas transportadoras;
- c) Postos de abastecimento privados para grandes empresas, médias empresas e grandes complexos residenciais.

Os postos de abastecimento são uma das partes mais importantes na economia do hidrogênio. Existem dois tipos de estações de hidrogênio (ALAZEMI; ANDREWS, 2015):

- a) Estações onde o hidrogênio é produzido em outros locais e entregue para a estação para sua distribuição;
- b) Estações onde o hidrogênio é produzido no local e já sai pronto para utilizar.

Atualmente as estações de abastecimento em operação estão distribuídas em maior concentração nos Estados Unidos, na Europa e no Japão. Nos Estados Unidos verifica-se 35 estações públicas em operação, 25 estações privadas e 32 estações estão em fase de planejamento (DOE, 2016). Nos Estados Unidos a região de maior concentração é a Califórnia, Figura 10, devido ao envolvimento do governo e de empresas com a criação do *Califórnia Fuel Cell Partnership* em 1999, com o intuito de promover o desenvolvimento de veículos à célula de combustível. Na Califórnia estão em operação 26 estações de abastecimento (CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP, 2016). Nos Estados Unidos há também 16054 estações elétricas e 2918 estações com E85 (mistura de 85% de etanol e 15% de gasolina) (DOE, 2017). As estações de abastecimento de hidrogênio então representam aproximadamente 0,22% das estações elétricas e 1,2% das estações com E85.

Figura 10- Estações de abastecimento de hidrogênio nos Estados Unidos



Fonte: Adaptado de DAVIS et al. (2016).

Na Europa estão em operação 76 estações de abastecimento, sendo 18 na Alemanha, 12 no Reino Unido, 10 na Dinamarca, 9 na França, 5 na Noruega e 4 na Espanha, e em outros países com menos de 3 estações (EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY–EAFO, 2016). São os países com maior concentração de estações de abastecimento de hidrogênio na Europa, como pode ser visto na Figura 11, porém está muito aquém do necessário para estabelecer o emprego do H₂ como combustível na mobilidade. As estações de abastecimento europeias fornecem hidrogênio comprimido a 35 MPa ou a 70 MPa.

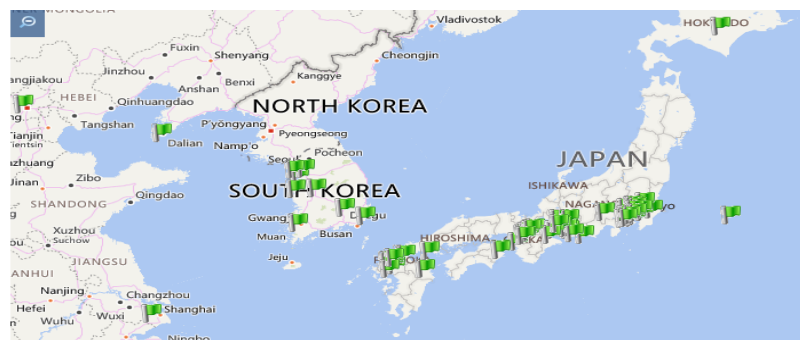
Figura 11- Estações de abastecimento de hidrogênio na Europa



Fonte: Adaptado de H₂ Stations (2016).

No continente asiático os países com maior concentração de estações de abastecimento de hidrogênio são o Japão e a Coreia do Sul, como pode ser visualizado na Figura 12. Na Coreia do Sul existem 11 estações de abastecimento de hidrogênio ativas (NAVIGANT RESEARCH, 2016). No Japão existem 91 estações de abastecimento de hidrogênio ativas e planejadas (HYDROGEN ANALYSIS RESOURCE CENTER, 2017). O hidrogênio comprimido fornecido pelas estações asiáticas são a 35 MPa ou a 70 MPa, com um tempo aproximado de abastecimento de 3 a 5 minutos.

Figura 12- Estações de abastecimento de hidrogênio na Ásia



Fonte: Adaptado de H₂ Stations (2016).

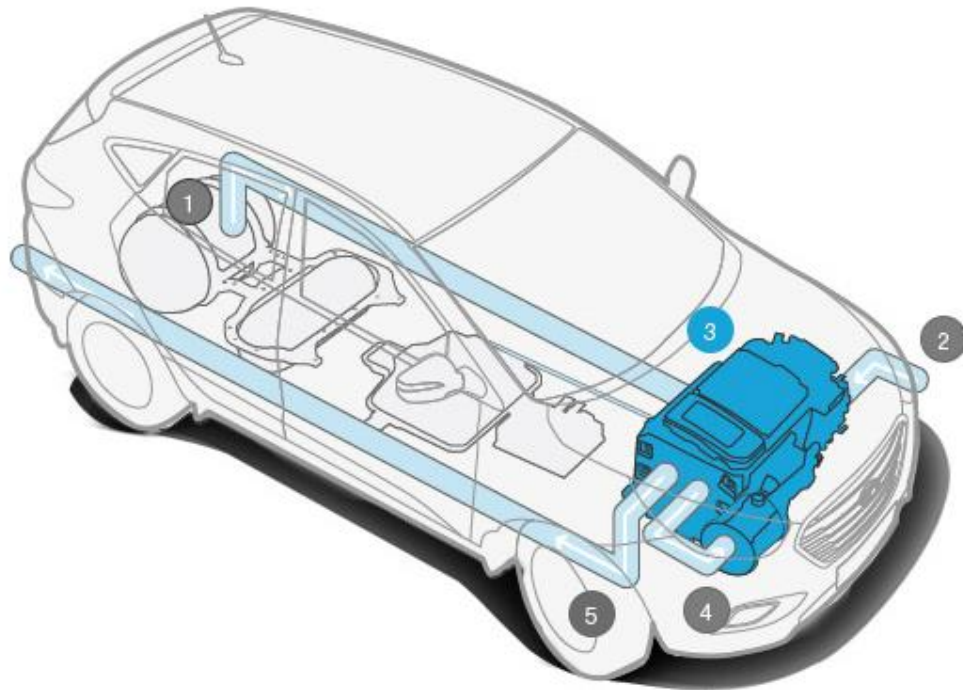
2.2.4 Emprego do hidrogênio na mobilidade

O hidrogênio pode ser empregado em veículos a célula de combustível (FCVs) ou ainda em veículos com motores de combustão interna (ICE). Na seção 2.2.4.1 é dissertado sobre a utilização do hidrogênio em FCVs e na seção 2.2.4.2 é discutido o emprego do hidrogênio em ICEV.

2.2.4.1 Utilização do hidrogênio em FCVs

Os FCVs, como na Figura 13, são equipados basicamente com um tanque para armazenamento de hidrogênio gasoso (1), células de combustível (3), motor elétrico (4) e baterias. O hidrogênio armazenado se dirige até a célula de combustível, onde é gerada a eletricidade que então vai alimentar o motor elétrico ou ser armazenada nas baterias. No escapamento (5) apenas água é rejeitada.

Figura 13- Funcionamento de um FCV



Fonte: Adaptado de Hyundai (2016).

As células de combustível geram energia elétrica na forma de corrente contínua a partir de reações eletroquímicas que ocorrem em seu interior (DOE, 2016). Uma célula de combustível é formada por um eletrodo de combustível (ânodo), um eletrodo oxidante (cátodo) e um eletrólito intercalado entre eles (SHARAF; ORHAN, 2014). Os sistemas de células de combustível são considerados como uma alternativa à geração de energia através da combustão, devido a suas baixas emissões e maior eficiência (WANG et al., 2011). A eficiência de conversão de energia pode atingir o máximo de 60% e 70% (ZHANG; HU, 2014). Outra vantagem é a natureza estática das células de combustível que possui uma operação silenciosa sem ruído ou vibração (SHARAF; ORHAN, 2014).

Existem vários tipos de células de combustível em desenvolvimento, cada uma com suas vantagens e limitações. Os principais tipos de células de combustível são os seguintes (KIRUBAKARAN; JAIN; NEMA, 2009):

- a) Células de membrana de troca protônica (*Proton exchange membrane fuel cells-PEM*);
- b) Células alcalinas (*Alkaline fuel cell-AFC*);

- c) Células de metanol direto (*Direct methanol fuel cells*);
- d) Células de ácido fosfórico (*Phosphoric acid fuel cells-PAFC*);
- e) Células de óxido sólido (*Solid oxide fuel cells -SOFC*);
- f) Células de carbonato fundido (*Molten carbonate fuel cells-MCFC*).

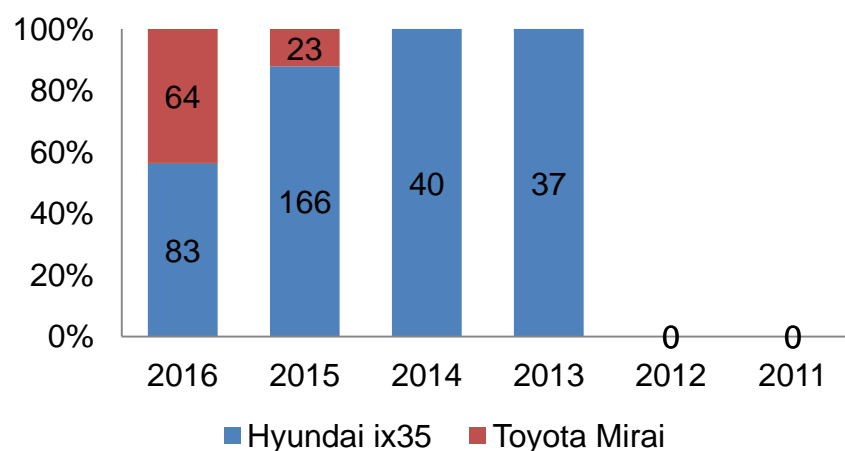
A PEM consiste de uma membrana, eletrodo, camada de difusão de gás e placas bipolares (WAN et al., 2014). Para o setor de transportes, especialmente para a aplicação em veículos, bem como para aplicações estacionárias e portáteis, a célula de combustível a PEM é a mais popular (KIM; LEE, 2015).

Wang (2015) e Quin et al. (2016) apontam que é essencial para a comercialização das células de combustível resolver os problemas de custo, confiabilidade e durabilidade das células de combustível.

Atualmente poucos modelos de FCVs estão disponíveis para a compra no mundo. Os principais modelos de carros de passeio que estão disponíveis para a venda são o Hyundai ix35 FCEV, o Toyota Mirai, Honda Clarity, e o utilitário Renault Kangoo ZE-H₂. Também existem alguns projetos em algumas regiões para colocar em circulação ônibus a célula de combustível.

Na Europa nos últimos anos os modelos de carro de passeio que estavam disponíveis para a compra eram o Hyundai ix35 e o Toyota Mirai, porém poucas unidades foram vendidas, como pode ser visto na Figura 14. No ano de 2016 apenas 147 unidades foram vendidas.

Figura 14- Número de FCVs vendidos na Europa



Fonte: Adaptado de European Alternative Fuels Observatory (2016).

Quanto a venda de FCVs utilitários na Europa, o Renault Kangoo em 2016 foi vendido 111 vezes, em 2015 foi vendido 55 unidades e 2014 apenas 4 unidades (EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY, 2016).

Na Alemanha, em Hamburgo, foram desenvolvidos e colocados em circulação 4 ônibus híbridos à célula de combustível em 2012 e mais dois no ano de 2014 (INTERNATIONAL FUEL CELL BUS COLLABORATIVE, 2014). Os veículos carregam 35 kg de H₂, o que lhes fornece uma autonomia de cerca de 250 km (GREEN CAR CONGRESS, 2011). Em outras cidades da Europa também surgiram projetos semelhantes, como em Oslo, Milão e Londres.

Nos Estados Unidos também existem vários projetos a fim de utilizar e desenvolver ônibus a célula de combustível. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) divulgou em 2016 um relatório na qual apresenta à situação atual da tecnologia dos ônibus a célula de combustível desenvolvido nos Estados Unidos. O relatório apresenta que a autonomia atual varia de 265-480 km, custo de manutenção de 0,29-1,29 \$/km, custo do veículo de 1,8M-2,5M \$ (EUDY; POST; JEFFERS, 2016).

No continente asiático também existem alguns modelos de FCVs a venda. No Japão em 2017 a Toyota iniciou as vendas de ônibus a célula de combustível e planeja juntamente com o governo de Tóquio colocar em circulação 100 unidades até 2020 para o transporte público (TOYOTA, 2016). No Japão também há alguns modelos de veículos de passeio para a venda, mas por enquanto com vendas inexpressivas. Os objetivos firmados no Japão são que para até o ano de 2020 estejam rodando nas ruas 40 mil FCVs e cerca de 200 mil no total até o ano de 2025 (MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, 2016).

No Brasil houve algumas pequenas ações a fim de utilizar o hidrogênio na mobilidade. Em 2006 foi lançado o Projeto Ônibus Brasileiro a Hidrogênio, com apoio do Ministério de Minas e Energia e da Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos (EMTU/ SP), e com a parceria de algumas empresas como Marcopolo, Petrobrás, Hydrogenics, Ballard Power Systems, entre outras (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009). O objetivo era desenvolver e colocar em operação alguns ônibus movidos a células de combustível e também instalar uma estação de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água. Em 2009 foi inaugurada a estação de produção e abastecimento de hidrogênio, com capacidade de produção

de 120 kg/dia na cidade de São Bernardo do Campo. Dois ônibus foram testados e colocados em circulação no Corredor Metropolitano São Mateus-Jabaquara no estado de São Paulo.

No Brasil ainda vale destacar os trabalhos desenvolvidos no Laboratório H₂ COPPE/UFRJ, onde foram desenvolvidos três protótipos de um ônibus híbrido (elétrico e a hidrogênio). No trabalho De Miranda et al. (2017) são apresentados alguns resultados do último protótipo desenvolvido. Os resultados apresentados apontam que o ônibus híbrido custou 133% a mais que um ônibus a diesel convencional, levando em conta a economia de combustível, custo do ônibus e custos de manutenção. Outro resultado importante apresentado é que o projeto de hibridização realizado a bordo levou a um aproveitamento de 46,6% da energia total embarcada para o movimento efetivo do veículo.

Até o fim de março do ano de 2017 havia um total de 4138 FCVs ativos e planejados no mundo, entre carros (3846), ônibus e *shuttle buses* (127), *scooters* (101), veículos comerciais ligeiros (38) e outros (26) (HYDROGEN ANALYSIS RESOURCE CENTER, 2017). As vendas de veículos a hidrogênio em todo o mundo, como visto, ainda são bastante inexpressivas, devido à falta de infraestrutura e a baixa disponibilidade de modelos comercializados pelas montadoras.

2.2.4.2 *Emprego do hidrogênio em ICEV*

Uma das maneiras de se utilizar o hidrogênio é a partir de sua combustão em um ICEV. A combustão do hidrogênio puro é desafiada pelas dificuldades de produção, armazenamento, transporte e utilização. Porém, uma saída razoável é utilizar como aditivo em combustíveis fósseis (TANG; ZHANG; HUANG, 2014). O uso do hidrogênio como aditivo é uma solução interessante para um curto prazo de tempo, até que toda a infraestrutura necessária à economia do hidrogênio seja estabelecida (TANG; ZHANG; HUANG, 2014). O hidrogênio pode ser usado como combustível adicional em motores de ignição por centelha (discutido na seção 2.2.4.2.1), em motores diesel (discutido na seção 2.2.4.2.2) e em motores de ignição por compressão de carga homogênea- HCCI (discutido na seção 2.2.4.2.3).

2.2.4.2.1 Hidrogênio em motores de ignição por centelha

Nos motores de ignição por centelha o hidrogênio pode ser uma alternativa de combustível, com potencial de substituir na totalidade o etanol ou a gasolina. Em nível acadêmico alguns estudos foram elaborados com o hidrogênio em motores de ignição por centelha. Shivaprasad et al. (2014) investigou experimentalmente o desempenho e as emissões características de um motor de ignição por faísca, monocilíndrico, de alta velocidade e com diferentes misturas de hidrogênio e gasolina. Os resultados dos testes demonstraram que as performances de combustão, consumo de combustível e pressão média efetiva, diminuíram com o enriquecimento de hidrogênio. A eficiência térmica do motor foi maior com misturas de hidrogênio do que com a operação com gasolina pura. Além disso, as emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC) e monóxido de carbono (CO) reduziam com o enriquecimento de hidrogênio.

Elsemary et al. (2016) investigou a performance e emissões de um motor monocilíndrico de quatro tempos e de ignição por centelha. O hidrogênio foi inserido no coletor de admissão em diferentes proporções de volume (de 24% a 49%). Os resultados mostram que houve um aumento na pressão do cilindro. Também houve um aumento no desempenho do motor e uma melhora na eficiência térmica, bem como redução do consumo específico de combustível. A análise de emissão mostrou uma redução de HC e CO. Outro estudo foi desenvolvido por Ceviz et al. (2012) onde foi investigado o efeito da adição de pequenas quantidades de hidrogênio para misturas de gasolina-ar no desempenho e emissões de um motor de ignição por faísca. Quatro relações de ar-combustível são usadas indo desde a estequiométrica até a muito pobre em combustível. A quantidade de hidrogênio adicionado variou de 0% 2,14%, 5,28% e 7,74% em volume. A eficiência térmica e consumo específico de combustível melhoraram com a adição de hidrogênio. As emissões de HC diminuíram 13% quando 5,28% de hidrogênio foi adicionado à mistura gasolina-ar.

Nos motores de ignição por centelha também é possível utilizar misturas de etanol-hidrogênio. Wang; Ji e Zhang (2010) estudaram o desempenho de um motor a etanol enriquecido com hidrogênio sob condições *under idle* e estequiométrica. O motor foi primeiro alimentado com o etanol puro e, em seguida, frações de

hidrogênio foram gradualmente aumentadas através da ampliação da duração do tempo de injeção de hidrogênio. Os resultados dos testes mostraram que a adição de hidrogênio foi eficaz na redução das variações cíclicas e melhorou a eficiência térmica indicada do motor a etanol em marcha lenta. O fluxo volumétrico da energia do combustível foi reduzido em 20% quando a fração de hidrogênio na admissão aumentou de 0% a 6,38%. As emissões de HC e de CO foram primeiramente reduzidas e, em seguida, aumentaram com o acréscimo da fração da mistura de hidrogênio. A emissão de acetaldeído no motor de etanol enriquecido com hidrogênio é menor do que a do motor de etanol puro. A adição de hidrogênio tende a aumentar as emissões de NO_x do motor de etanol em condições estequiométricas e em marcha lenta.

Greenwood et al. (2014) analisaram os efeitos do enriquecimento de hidrogênio no etanol em regimes de funcionamento com mistura pobre e ultra pobre. Um motor de ignição por centelha de 0,745 L, de dois cilindros foi modificado para funcionar com hidrogênio e etanol. Potência, eficiência térmica e eficiência volumétrica não foram afetadas pela mistura de hidrogênio a uma dada razão de equivalência. No entanto, a adição de hidrogênio permitiu um aumento no limite operacional da mistura pobre e ajudou a reduzir ainda mais as emissões de NO_x, mas também reduziu a potência e a eficiência térmica.

Na indústria automotiva algumas montadoras também desenvolveram alguns trabalhos com o hidrogênio. A BMW desenvolveu entre os anos de 2005 e 2007 um veículo sedã bi-alimentado (H₂ e a gasolina), com potência de 191 Kw, 12 cilindros, com deslocamento volumétrico total de 6 litros (MÜLLER, et al., 2007). O veículo possuía um tanque para armazenamento de gasolina (74 litros) e outro para H₂ líquido (8 kg), o que lhe dava uma autonomia de 500 km com a gasolina e mais 200 km com o H₂ (MÜLLER, et al., 2007). A formação da mistura de hidrogênio é baseada numa injeção no coletor de admissão do cilindro com uma sobrepressão relativamente baixa de 1 bar, gerada exclusivamente pela evaporação do hidrogênio criogénico no tanque e, portanto, nenhuma bomba de alimentação de hidrogênio é necessária (ENKE, et al., 2007).

No ano de 2007 a Ford colocou dois protótipos E-450 H₂ICE em circulação na cidade de Las Vegas, nos Estados Unidos, *shuttle bus*, com motor superalimentado de 10 cilindros em V, 6,8 L, na qual utilizava o hidrogênio armazenado a 35 MPa

como combustível (HYDE; FAST, 2009). O consumo médio do veículo era de 8,5 km/kg de H₂, autonomia de 240-320 km (HYDE; FAST, 2009).

2.2.4.2.2 Hidrogênio em motores ciclo Diesel

Devido a sua elevada temperatura de autoignição, não pode ser utilizado como um combustível puro em motores de ciclo Diesel (PATNAIK, 2007; MORAIS et al., 2013). Contudo, é possível fazer a utilização do hidrogênio em motores ciclo Diesel através de uma mistura com outros combustíveis, ocorrendo o encontro destes na câmara de combustão, processo também conhecido como “fumeação”. Na “fumeação” o combustível é vaporizado ou injetado na corrente de ar de admissão (ABU-QUDAIS; HADDAD; QUDAISAT, 2000).

Hamdan et al. (2015), elaborou uma investigação experimental para examinar o efeito da presença de hidrogênio sobre o desempenho do motor diesel. Os resultados indicam que a eficiência térmica do motor de ignição por compressão aumenta com o enriquecimento do hidrogênio no coletor de admissão. Percebe-se que o aumento da suplementação de hidrogênio provoca o aumento das emissões de NO_x e redução da formação de material particulado.

Ghazal (2013) investigou os efeitos da combustão de hidrogênio e diesel sob injeção direta em um motor de ignição por compressão. Diferentes proporções de hidrogênio/diesel foram utilizadas variando de 0,05% a 50% em volume, assim como a velocidade do motor (1000 a 4000 RPM), a razão ar/combustível foi variada entre 10 e 80. Os resultados indicaram que para uma elevada velocidade do motor a adição de até 40% de hidrogênio aumenta em 14% a potência efetiva e em uma elevada relação de ar-combustível a adição de até 40% de H₂ aumenta a eficiência térmica do motor em até 37%, comparando com o motor operando com diesel puro.

2.2.4.2.3 Hidrogênio em motores HCCI

Nos motores de ignição por centelha e nos motores de ignição por compressão, o início da combustão pode ser controlado por uma vela de ignição ou pelo instante de injeção de combustível, respectivamente (GOWTHAMAN;

SATHIYAGNANAM, 2015). Já os motores HCCI (*homogeneous charge compression ignition engine*) são controlados pela cinética da reação.

Os motores HCCI são considerados conceitos promissores (SHARMA; RAO GAP; MURTH, 2015). O motor HCCI tem baixos níveis de emissões de NO_x e material particulado, porém ainda tem problemas não solucionados como *knocking* e elevadas emissões de HC (BOSE; BANERJEE; DEB, 2013). Os motores HCCI são propensos a ocorrência de detonação, porque são controlados pela cinética química e não há mecanismos diretos de controle de ignição (HAIRUDDIN; YUSAF; WANDEL, 2014).

O hidrogênio pode ser usado como um único combustível nos motores HCCI, contudo é instável e pode gerar *knocking* (SZWAJA; GRAB-ROGALINSKI, 2009). O hidrogênio não pode ser usado de forma estável como um único combustível em um motor HCCI, mas pode ser usado como um aditivo a fim de controlar o ponto de ignição e também para melhorar desempenho do motor (SARAVANAN; NAGARAJAN, 2010; PARK et al., 2010).

Quando o hidrogênio é combinado com diesel em modo *dual-fuel*, baixos níveis de emissão de NO_x, CO e partículas podem ser alcançados, e a eficiência do motor HCCI pode ser aumentada de 13-16% (HAIRUDDIN; YUSAF; WANDEL, 2012). Khaliqa et al. (2014) elaborou uma abordagem combinada entre a primeira e a segunda lei da termodinâmica, para compreender os efeitos do excesso de ar e da temperatura ambiente sobre a eficiência energética e exergia de um motor HCCI que opera com hidrogênio. A eficiência energética alcançada pelo motor foi de 40-42% e a eficiência exergética variou entre 25-45% com excesso de ar variando entre 20 e 40% e com temperatura ambiente de 300 K. Com temperatura variando entre 13 °C e 41 °C foram obtidas eficiências energéticas de 44-48% e eficiência de exergia de 32-36%. Devido a processos irreversíveis os estudos indicaram que 52% da exergia do hidrogênio é perdido, dos quais 8% é perdido no escapamento.

2.2.5 Leis e incentivos fiscais para o emprego do hidrogênio na mobilidade

Com o intuito de impulsionar a venda de FCVs, algumas leis e incentivos são essenciais para criar condições equitativas, como isenção de taxas de estacionamento, subsídios, redução de impostos (BALL; WEEDA, 2015). De Shazo (2016) revisou a literatura a respeito de incentivos a compra de veículos com baixas

emissões. O autor concluiu que os formuladores de políticas devem conceber incentivos aplicados no ponto de venda e assim compensar o custo listado do veículo e também devem promulgar políticas de acordo com a renda dos clientes, ou seja, que ofereçam benefícios maiores para consumidores de renda mais baixa e moderada. Outra sugestão do autor é promover incentivos para que os proprietários vendam seus veículos antigos e menos eficientes em termos de consumo de combustível e comprem veículos mais eficientes.

Atualmente em alguns países onde as etapas que constituem a tecnologia do hidrogênio encontram-se mais desenvolvidas já existem algumas políticas e incentivos para tornar mais atrativos os FCVs, e também para ajudar a desenvolver a infraestrutura necessária. Como por exemplo, nos Estados Unidos, especialmente no estado da Califórnia, existem leis e incentivos a fim de utilizar o hidrogênio como combustível em veículos. Alguns exemplos de leis e incentivos vigentes no Estado da Califórnia estão detalhados no Quadro 4.

Quadro 4- Leis e incentivos para a tecnologia do hidrogênio na Califórnia

Programa	Objetivo
<i>Hydrogen Fueling Station Evaluation</i>	Financiar o setor privado para instalar novas estações de abastecimento de hidrogênio.
<i>Alternative Fuel and Vehicle Incentives</i>	Financiar projetos que visam: produção de combustíveis renováveis e pesquisas; demonstrações e implantação de veículos comerciais de combustível alternativo; treinamento de mão-de-obra.
<i>Alternative Fuel Vehicle Parking Incentive Programs</i>	Desenvolver e implementar programas de incentivo aos motoristas que usam veículos com combustíveis alternativos como: espaços preferenciais em estacionamentos, taxas reduzidas e infraestrutura de abastecimento.
<i>State Agency Low Carbon Fuel Use Requirement</i>	Requisito para que o governo estadual da Califórnia compre uma porcentagem de combustíveis com baixo teor de carbono.
<i>Plug-In Hybrid and Zero Emission Light-Duty Vehicle Rebates</i>	Visa promover o desconto para a compra ou locação de veículos com baixas emissões.

Fonte: (DOE, 2016).

Em alguns países da Europa também há alguns incentivos e ações a fim de alavancar o uso do hidrogênio como combustível. Na Noruega, por exemplo, os FCVs não possuem imposto sobre o valor acrescentado (IVA), há também isenção de pedágio, estacionamento gratuito, isenção de imposto de compra e redução de

impostos de propriedade, entre outros benefícios (EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY, 2016).

2.3 COMPETITIVIDADE

A definição de competitividade não é consenso na literatura e não possui uma conceituação clara. Para alguns autores a competitividade trata-se de uma questão de melhora no padrão de vida da nação, para outros está ligado às habilidades de uma empresa de competir e negociar com êxito (LOVATEL, 2002).

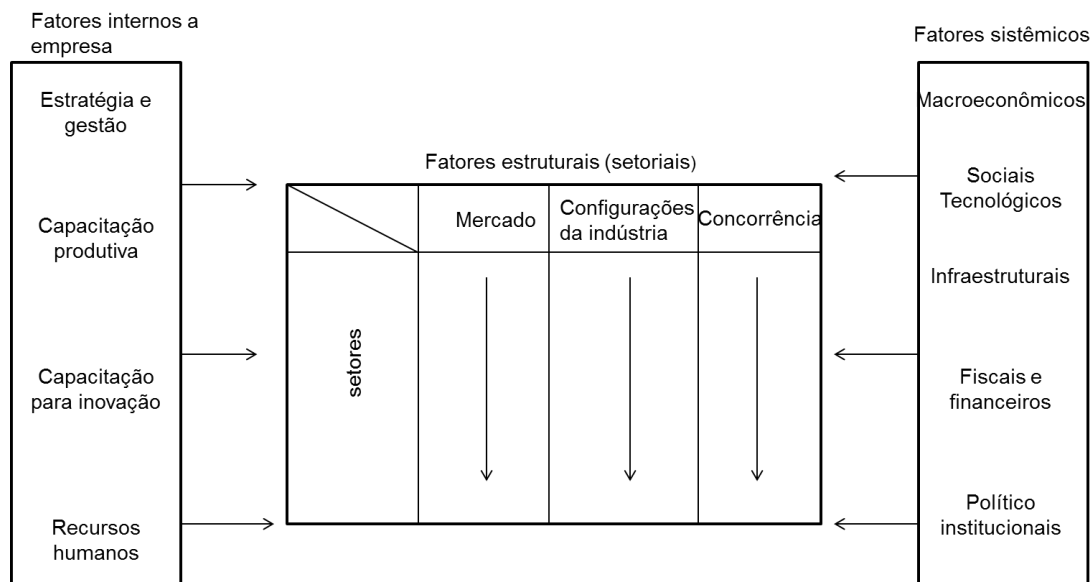
A competitividade pode ser analisada em nível empresarial, em nível de indústria ou um setor ou ainda de um país ou região (MCFETRIDGE, 1995). Para uma empresa a competitividade é sinônimo do desempenho, de lucros em longo prazo e de sua capacidade de compensar seus funcionários e proporcionar retornos superiores aos seus proprietários (BUCKLEY; PASS; PRESCOTT, 1988). Já para um país a competitividade é um conjunto de instituições, políticas e fatores que determinam o nível de produtividade (SALA-I-MARTIN, et al., 2014). Aiginger, Bärenthaler-Sieber e Vogel (2013) definem a competitividade de um país como a capacidade de entregar o produto interno bruto além das metas.

Existem diversos fatores que influenciam a competitividade de uma empresa ou região, eles podem ser de origem interna à empresa, relativos à indústria onde a empresa está inserida ou podem ser fatores macroeconômicos (MORAES, 2003; MATTOS; BELTRAND; BERTÉ, 2002). Na Figura 15 são apresentados os fatores determinantes para a competitividade. Essa abordagem reconhece que a competitividade também é resultado de fatores que estão fora do âmbito da empresa, sendo pertinente falar de competitividade sistêmica. Nenhum desses níveis de competitividade pode ser concebido como mais importante que os demais e a resultante entre esses níveis de competitividade é a competitividade global.

A competitividade estrutural trata da situação competitiva da empresa ou região em relação ao segmento que ela está atuando, dentro do conceito de cadeia produtiva e da região de sua abrangência (MATTOS; BELTRAND; BERTÉ, 2002). Dentro da competitividade empresarial é muito importante a integração e cooperação entre os diversos elos da cadeia produtiva. Os principais elos dentro de uma cadeia produtiva são (MATTOS; BELTRAND; BERTÉ, 2002): os elos de produção da matéria prima, elos de beneficiamento das matérias primas e insumos,

elos de produção ou operação, elos de comercialização, serviços de apoio, elos de apoio de transporte e apoio tecnológico.

Figura 15- Fatores determinantes para a competitividade



Fonte: (COUTINHO; FERRAZ, 1994).

Já a competitividade empresarial compreende a área que está sob o controle e decisão dos empresários. As competências e recursos adquiridos ao longo do seu desenvolvimento, capacidade de atender requisitos e desejos dos clientes e domínio de tecnologia (WOOD; CALDAS, 2007).

E o último nível de competitividade, mas não menos importante que os demais, é a sistêmica. Esta trata os fatores macroeconômicos, ou seja, através de suas políticas cambiais, monetária, industrial, tecnológica, entre outras, nacionalmente ou mesmo internacionalmente (FILHO; MINUZZI; DOS SANTOS, 2006). Esses fatores estão localizados externamente as portas das empresas, mas influenciam de maneira direta o ambiente competitivo na qual as empresas ou nações estão inseridas. De Paiva (2011) listou os fatores sistêmicos da competitividade como sendo os seguintes:

- a) Macroeconômicos: taxa de câmbio, carga tributária, produto interno bruto, taxa de juros, entre outros;

- b) Político-institucionais: política tributária e tarifária e apoio a iniciativas tecnológicas;
- c) Legal-regulatórios: políticas de defesa da concorrência e do consumidor e de preservação ambiental;
- d) Infraestruturais: disponibilização de energia com qualidade e custos competitivos, insumos básicos, ciência e tecnologia, informação tecnológica, serviços de engenharia e projetos e telecomunicações;
- e) Sociais: qualificação da mão de obra e seguridade social;
- f) Internacionais: ações voltadas para inserção internacional do comércio e para o fluxo de capitais, acordos internacionais, investimentos de risco em tecnologia e relações com organismos multilaterais.

Boudries (2014) realizou um estudo onde a competitividade econômica dos veículos a hidrogênio foi analisada e então comparada com a dos veículos a gasolina, para a Argélia. Os resultados mostram que uma melhoria nas técnicas de produção levará a uma tecnologia mais competitiva. Prince-Richard, Whale e Djilali (2005) desenvolveram um modelo para determinar os principais parâmetros técnicos e econômicos que influenciam a posição competitiva do hidrogênio eletrolítico descentralizado. Este modelo incorpora os custos de capital, manutenção e energia da eletrólise da água, bem como uma avaliação monetária das emissões de gases de efeito estufa.

2.3.1 Vantagem competitiva

Para Newbert (2008) a vantagem competitiva se refere ao valor econômico que foi criado a partir da exploração das combinações de recursos-capacidade da empresa, o desempenho se refere ao valor econômico que a empresa capturou de sua comercialização. Já para Amit e Schoemaker (1993) o desafio é identificar, desenvolver, proteger e implantar recursos e capacidades de forma a proporcionar à empresa uma vantagem competitiva sustentável e, assim, um retorno superior sobre o capital. Fazendo uma análise da definição de vantagem competitiva existente na literatura alguns fatores chaves podem ser extraídos, como a criação de valor, o lucro econômico, desempenho, valor adicionado, retorno acima da média, entre outros.

A vantagem competitiva não depende da eficiência estática e nem da otimização, como restrições fixas, mas na capacidade de inovação e melhoria que mudam as restrições (PORTER; VAN DER LINDE, 1995). Sob a ótica da eficiência se tem como princípio a capacidade de uma empresa, setor ou país de produzir bens em níveis de produtividade e qualidade iguais ou superiores aos de seus principais concorrentes (GALINARI, et al., 2013). Quanto à capacidade de inovação as empresas ou países que possuem a capacidade de inovar têm condições de se distinguir dos seus opositores e alcançar uma vantagem competitiva. A vantagem deve vir da capacidade de criar e, em seguida, comercializar novos produtos e processos, mudando a fronteira da tecnologia tão rápido quanto seus rivais podem recuperar o atraso (PORTER; STRN, 2001).

2.4 SISTEMAS DE MENSURAÇÃO DE DESEMPENHO

No ambiente competitivo as organizações devem ser capazes de avaliar seus objetivos, como custo unitário, lucro, desempenho subjetivo (por exemplo, qualidade, satisfação) e estabelecer estratégias apropriadas para alcançar seus objetivos (HADDADI; YAGHOUBI, 2014). Murphi, Trailer e Hill (1996) argumentam que a medição precisa do desempenho é fundamental para a compreensão do novo empreendimento, do sucesso e do fracasso das organizações. Lebas (1995) traz alguns critérios que podem caracterizar o significado de desempenho para os gerentes: criação de emprego, segurança do emprego para o pessoal da empresa, proporcionar um retorno satisfatório às sedes corporativas, inovação em processos e produtos, satisfação do cliente, crescimento da quota de mercado, contribuição (s) ambiental (positiva, bem como negativa) e avanços tecnológicos. De Conto (2001) diz que a realização das atividades com eficácia caracteriza o conceito de desempenho e cria as condições para o desenvolvimento e sobrevivência das organizações.

Para mensurar tais critérios que configuram o desempenho em uma organização o uso de indicadores se mostra eficiente. Pode-se dizer que os indicadores são ferramentas utilizadas para a organização monitorar determinados processos (geralmente os denominados críticos) quanto ao alcance ou não de uma meta ou padrão mínimo de desempenho estabelecido (DE SOUZA CAMPOS;

MELO, 2008). Os indicadores são um mecanismo capaz de fornecer informações que são úteis para a tomada de decisão nas organizações.

Na literatura diversos modelos estão disponíveis para mensurar e indicar o desempenho, cada um com suas características que visam acompanhar a competitividade do mundo globalizado. Em meio aos diversos modelos existentes Neuenfeldt Júnior (2014) organizou os principais modelos que visam à mensuração de desempenho e também as suas características, conforme o Quadro 5.

Quadro 5- Modelos de mensuração de desempenho

Método	Características principais
Administração por objetivos (APO)	Técnica de direcionamento de esforços através do planejamento e controle administrativo, no qual as metas são definidas em conjunto entre administrador e seu superior e as responsabilidades são especificadas para cada posição em função dos resultados esperados.
<i>Key performance indicators</i> (KPI)	Ferramenta para avaliar o estado de determinada atividade, de maneira que os níveis de uma empresa compreendam a forma como seus trabalhos influenciam no negócio.
<i>Balanced Scorecard</i> (BSC)	Traduz a estratégia da organização em um conjunto de medidas capazes de realizar a mensuração do seu desempenho, a fim de se atingir os principais objetivos estratégicos traçados.
Três Níveis de Desempenho	Considera o estabelecimento de três níveis (organização, processo e executor) de desempenho, de maneira a qual uma empresa ou um sistema pode ser avaliado a partir do cumprimento dos requisitos destes vértices.
<i>Mckinsey 7-S</i>	Modelo de gestão desenvolvido para compreender sete fatores considerados como de determinação para a efetiva mudança de uma organização.
<i>Baldrige</i>	Tem por objetivo prestar um auxílio às empresas no que tange o estímulo ao aperfeiçoamento da sua qualidade e produtividade, fornecendo as informações necessárias para se chegar a um alto nível de qualificação dos seus processos.
<i>Quantum</i>	Modelo proposto com o objetivo de associar missão, estratégia, metas e processos dentro da organização, trabalhando com uma matriz em três dimensões: qualidade, custo e tempo, visando equilíbrio entre estas.
<i>Performance Prism</i>	É uma metodologia que visa integrar os processos a fim de se criar valor para as partes interessadas no sistema, partindo-se de indicadores capazes de remeter o status no qual a gestão se encontra.

Fonte: Adaptado de Neuenfeldt Júnior (2014).

Figueiredo et al. (2005), procurou encontrar alguns atributos desejáveis na tentativa de guiar o pesquisador na hora de encontrar o melhor método de mensuração de desempenho nas pesquisas. Os atributos definidos pelo autor e

dissertados foram: aprendizado organizacional, análise crítica, balanceamento, clareza, dinamismo, integração, alinhamento, relacionamento causal e participação.

Dewangan e Godse (2014) descreveu um conjunto de princípios orientadores, derivados de um estudo aprofundado da literatura, em torno do qual um esquema eficaz de medição de desempenho de inovação pode ser projetado. Esses princípios segundo o autor são:

- a) O esquema de medição de desempenho deve fornecer uma visão multidimensional do desempenho.
- b) O regime deve centrar-se na medição do desempenho de várias fases no ciclo de vida da inovação; deve ser um processo de inovação orientada.
- c) O esquema deve efetivamente abordar os objetivos organizacionais das partes interessadas, pertencendo tanto dentro como fora da empresa.
- d) O regime deve apoiar uma relação de causa e efeito entre as medidas de desempenho.
- e) O esquema deve ser fácil de implementar e usar.

Com esse rol de atributos desejáveis e princípios orientadores destaca se sobre os demais métodos os *Key Performance Indicators* (KPIs) ou Indicadores Chave de Desempenho, visto que estão melhores alinhados com a proposta deste estudo. Indicadores-chave de desempenho são indicadores financeiros e não financeiros que as organizações usam para estimar e fortalecer o sucesso, objetivando metas estabelecidas previamente e duradouras (VELIMIROVIĆ; VELIMIROVIĆ; STANKOVIĆ, 2011). Para Bartz, Siluk e Barth (2011) indicadores-chave de desempenho ajudam as organizações a compreender o quão bem eles estão se saindo em relação a suas metas e objetivos estratégicos.

Thoennes, Busse e Eckstein (2014) avaliaram o potencial tecnológico das células de combustível em aplicações automotivas, do atual e do futuro desempenho dos sistemas, para identificar os parâmetros críticos e priorizar as demandas de pesquisa e desenvolvimento. Landucci, Tugnoli e Cozzani (2010) estudaram a segurança dos sistemas desde a produção em grande escala até a utilização do hidrogênio como combustível no setor automotivo, com a ajuda de um conjunto de indicadores chave de desempenho.

2.5 ABORDAGEM MULTICRITÉRIO DE APOIO A DECISÃO (MCDA)

Os problemas de tomada de decisões do mundo real são geralmente demasiadamente complexos e mal estruturados para serem considerados através do exame de um único critério, atributo ou ponto de vista que conduzirá a uma decisão ótima (DOUMPOS; GRIGOROUDIS, 2013). Dessa forma a abordagem multicritério de apoio à decisão ajuda em problemas na qual existem mais de dois critérios para serem avaliados. O apoio multicritério a decisão pode ser visto como um conjunto de métodos que se prestam a tornar claro um problema, no qual as alternativas são avaliadas por múltiplos critérios, os quais são conflitantes, na maioria dos casos (CAVALCANTE; ALMEIDA, 2005). Cho (2003) relata que a tomada de decisão multicritério trata de decisões que envolvem a escolha de uma melhor alternativa entre várias potenciais candidatas em uma decisão, sujeita a vários critérios ou atributos que podem ser tangíveis ou intangíveis.

A abordagem multicritério de apoio à decisão é uma ferramenta eficaz para resolver problemas de decisão, tais como problemas de planejamento de produção, planejamento financeiro e análise de políticas (GUPTA; MOHANTY, 2016).

O processo decisório é complexo e depende do tomador de decisões, da situação e da maneira de como é percebida a situação (CHIAVENATO, 2004). O processo decisório envolve as seguintes etapas para Chiavenato (2007): Definição e diagnóstico do problema; procura de soluções alternativas mais promissoras; análise e comparação dessas alternativas de solução; seleção e escolha da melhor alternativa como um plano de ação.

A primeira etapa de definição e diagnóstico do problema envolve a definição de dados e dos fatos referentes ao problema, e as relações com o contexto mais amplo (CHIAVENATO, 2007). Já na procura de soluções alternativas mais promissoras os autores podem utilizar ferramentas de auxílio para identificação das alternativas, incertezas, fatores críticos para o sucesso (FCS) e fatores externos (ROSA, 2016). As principais ferramentas que podem ser utilizadas são diagrama de Ishikawa, mapas cognitivos, brainstorming, árvore de decisão e hierarquias de meios e fins (GOMES; GOMES, 2014). Em específico a árvore de decisão tem como papel disciplinar decisões sequenciais, no sentido de que as alternativas que se oferecem a escolha, são decorrentes de uma decisão anterior ou terão influência decisiva na determinação de um conjunto de alternativas futuras (GOMES; GOMES, 2014).

Na análise e comparação dessas alternativas de solução utiliza-se de modelagens que permitem avaliar quantitativamente cada critério (ROSA, 2016). Nesse ponto uma necessidade importante é a definição das taxas de substituição entre os elementos do modelo (ALMEIDA, 2013). “Essas taxas de substituição ou compensação têm como propósito obter o quanto cada um dos pontos de vistas-fundamentais ou elementares (PVF) - contribuem ou representam para o todo do processo em elaboração” (ENSSLIN et al., 2007). Essas taxas são determinadas através dos métodos *Trade-Off* (ESKELINEN; MIETTINEN, 2012), o método *Swing Weights* (JUNIOR, 2016) ou ainda o método de comparação par-a-par (CATTELAN, 2015).

Para encontrar as taxas locais de substituição (P_i) o procedimento é realizado com o cálculo da razão entre o valor de importância do FCS (Z_i) e o do somatório obtido pela importância de todos os FCSs que fazem parte do critério em análise (CATTELAN, 2015). Já as taxas globais de substituição (W_i) são calculadas multiplicando as P_i dos FCS localizados nos níveis mais elevados da árvore de decisão, Eq. 3 (SANTOS, 2017).

$$W_i = P_i \times P_i \times P_i \quad (3)$$

Uma vez que as taxas locais e globais de substituição estejam calculadas, faz-se necessário à construção de uma equação global capaz de avaliar o desempenho competitivo ($V(a)$). Para agregar as avaliações locais de desempenho ($V_i(a)$) utiliza-se a Eq. 4 (BORTOLUZZI; ENSSLIN; ENSSLIN, 2011).

$$V(a) = \sum W_i \times V_i(a) \quad (4)$$

Na seleção e escolha da melhor alternativa como um plano de ação, a escolha de uma alternativa para o curso de ação provoca o abandono dos demais cursos alternativos (CHIAVENATO, 2007). Depois de encontrada a melhor alternativa ou conjunto de melhores alternativas, concentra-se esforços para a execução da solução selecionada.

Karleuša, Dragičević e Deluka-Tibljaš (2013) avaliaram a questão de tomada de decisões sobre a infra-estrutura de transporte em áreas urbanas e o uso da análise multicritério neste processo é estudada. A análise mostrou que o método de análise hierárquica (AHP) é o método MCA mais utilizado para a tomada de decisão no domínio da infra-estrutura de transportes. Os próximos métodos mais frequentes são métodos *Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE),

Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE) e *Simple Additive Weighting* (SAW). Métodos menos frequentes são o *Analytic Network Process*, REGIME, Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT / MAVT), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e outros métodos.

Taha e Daim (2013) revisaram a literatura científica a respeito das aplicações multicritérios em análise de energia renovável. Os autores concluíram que mesmo com o grande número de métodos MCDA disponíveis, nenhum deles é considerado o melhor para todos os tipos de situações de tomada de decisão. Para eles não há melhor ou pior método, mas apenas uma técnica que se encaixa melhor em uma determinada situação. Os autores notaram que a AHP é a metodologia mais utilizada entre todos os métodos, mas ainda a principal questão que permanece é como escolher a metodologia MCDA apropriada em tomada de decisão de energia alternativa.

Outro estudo sobre a análise multicritério de apoio a decisão para o planejamento energético foi desenvolvido por Loken (2007). O autor concluiu que na escolha do método é importante considerar a adequação, validade e facilidade de utilização dos métodos e que o processo de escolha depende principalmente das preferências do analista.

Tzeng, Lin e Apricovic (2005) estudaram o desenvolvimento tecnológico de um ônibus com combustíveis alternativos, como o hidrogênio, onde especialistas em diferentes grupos de tomada de decisão realizaram a avaliação de múltiplos atributos para determinar o melhor modo de combustível. A AHP foi aplicada para determinar os pesos relativos aos critérios de avaliação. Sadeghzadeh e Salehi (2011) classificaram a atratividade e a importância das células de combustível como um subsistema, bem como determinaram a quantidade de conhecimento, mão-de-obra especializada e equipamentos necessários em escalas industriais e de laboratório e, dentre os métodos de decisão multicritérios, a abordagem TOPSIS foi tratada.

Essa dissertação fará a utilização de apenas alguns conceitos associados à AHP e por esse motivo, na seção 2.5.1 é elucidado a concepção relacionada a essa ferramenta de investigação multicritério.

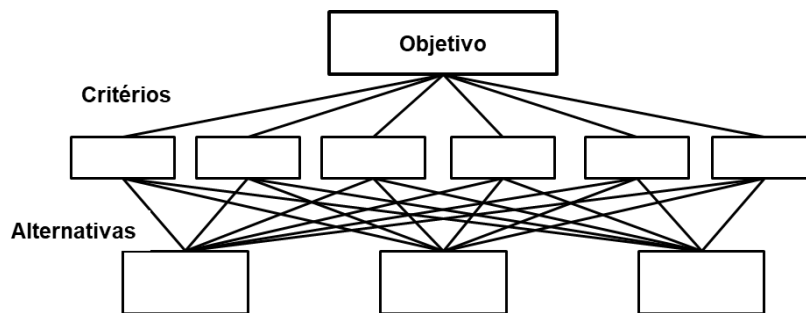
2.5.1. Análise hierárquica de processos (AHP)

A AHP é um método subjetivo para analisar critérios qualitativos para ponderar as alternativas (LEE et al, 2011), foi desenvolvido por Saaty entre 1971-1975 na Wharton School, University of Pennsylvania (SAATY, 1987). AHP é uma ferramenta de apoio à decisão que pode ser usado para resolver problemas de decisão complexos, usa uma estrutura hierárquica de múltiplos níveis, objetivos, critérios, subcritérios, e alternativas (TRIANANTAPHYLLOU; MANN, 1995).

O método AHP baseia-se em algumas etapas com o intuito de tomar uma decisão organizada para gerar prioridades (SAATY, 2008):

- a) Definição do problema e do tipo de conhecimento procurado;
- b) Estruturação da hierarquia de decisão: com o objetivo de decisão no topo, então vem os critérios nas quais os elementos subsequentes dependem, e após isso vem os subcritérios, que geralmente é um conjunto de alternativas, conforme a Figura 16;

Figura 16- Estrutura da AHP



Fonte: Adaptado de Saaty e Vargas (2012).

- c) Avaliação através do método *Swing Weights* ou comparação par-a-par: faz-se o uso de uma escala de números que indica quanto um fator é mais importante que o outro, Quadro 6. A escala varia de 1 a 9, de "menos valorizado", para "absolutamente mais importante do que" cobrindo todo o espectro de importância (VAIDYA; KUMAR, 2006).

Quadro 6- Níveis de importância do método AHP

Nível de importância	Definição
1	Importância igual
3	Importância fraca de uma sobre a outra
5	Importância forte
7	Importância muito forte
9	Importância absoluta
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os dois julgamentos adjacentes

Fonte: Zhu e Xu (2014).

- d) Síntese: Usando procedimentos de agregação (como a média aritmética ponderada e a média geométrica) para sintetizar as prioridades locais em prioridades globais das alternativas (ZHU; XU, 2014).

3 METODOLOGIA

Esse capítulo é composto por duas subseções, uma destinada a detalhar o enquadramento metodológico, e a segunda para explicitar o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

A metodologia busca instrumentos adequados para conduzir a pesquisa científica, ou seja, contribui para a escolha dos meios para se chegar à solução do problema (PRADO, 2011). Neste sentido, o enquadramento da metodologia a ser utilizada nesta dissertação é apresentado no Quadro 7.

Quadro 7- Enquadramento metodológico

Classificação	Enquadramento
Natureza	Aplicada
Abordagem	Qualitativa
Método Científico	Indutivo
Objetivos	Exploratória
	Descritiva
Procedimentos técnicos	Bibliográfica
	Documental

Fonte: Autor.

Quanto à natureza, essa pesquisa pode ser enquadrada como aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimento para um propósito prático, dirigindo a solução de um problema específico (PARANHOS; RODOLPHO, 2014).

Em relação à abordagem, a pesquisa é qualitativa, pois primeiramente busca-se descrever a complexidade do problema, levando em conta todos os componentes da situação (GRESSLER, 2004).

Quanto aos objetivos, a pesquisa é descritiva, pois os fatos são observados, registrados e analisados sem a interferência do pesquisador e também porque a

coleta de dados é através de questionários e observação sistemática (ANDRADE, 2010). Também quanto aos objetivos a pesquisa é exploratória, porque se tem a finalidade de gerar mais informações sobre o assunto a ser investigado, ou seja, conhecer com maior clareza o assunto (PRADANOV; FREITAS, 2013).

Em relação ao método, esse se enquadra como indutivo, pois a partir de observações de casos particulares, é possível chegar a uma conclusão de ordem mais geral (SANTOS; PARRA FILHO, 2012).

Os procedimentos técnicos a serem utilizados são: bibliográfico e documental. O procedimento bibliográfico é devido à necessidade de realizar buscas por publicações científicas para embasar as temáticas abordada, e documental para conseguir abstrair um melhor entendimento da utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

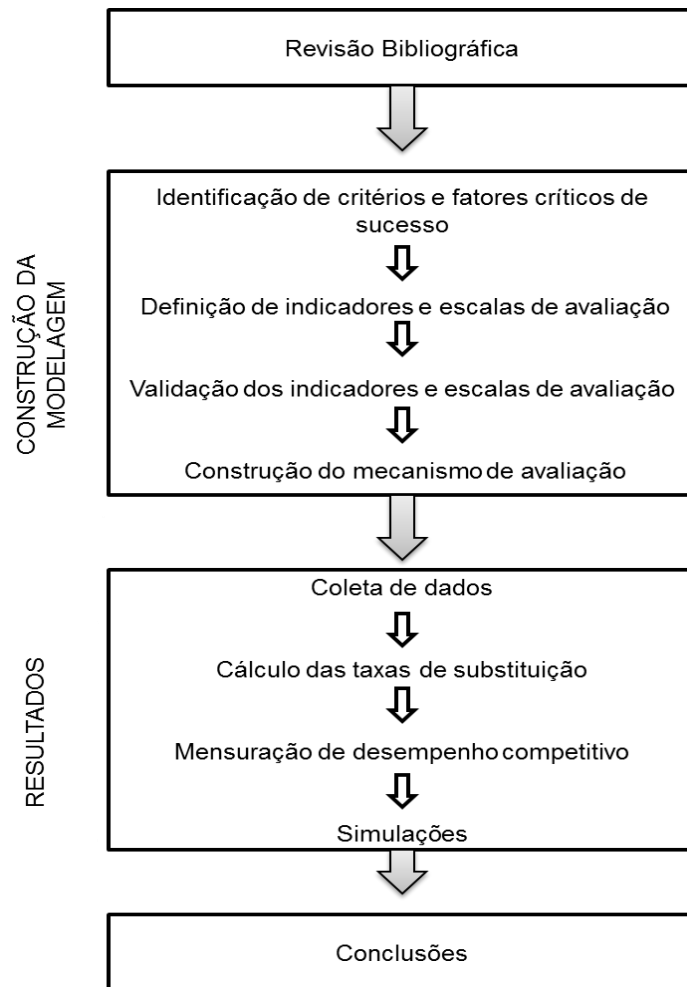
Com o intuito de compreender como está estruturada a pesquisa, a Figura 17 apresenta as etapas metodológicas para desenvolvimento da pesquisa, que são definidas como: revisão bibliográfica, construção da modelagem, resultados e conclusões.

A primeira etapa de pesquisa ao qual foi denominada de Revisão Bibliográfica foi cumprida por meio do referencial teórico apresentado no capítulo 2, onde as características que moldam a utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade foram plenamente aprofundadas. Para a realização da revisão bibliográfica, foram utilizados o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), juntamente com consultas a livros e também artigos publicados em anais de eventos científicos, a fim de realizar o embasamento teórico que é imprescindível para a realização da pesquisa. Para a pesquisa referente à utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade o principal periódico utilizado, por ser de conteúdo mais específico, foi o *International Journal of Hydrogen Energy*.

A pesquisa documental compreendeu a busca por relatórios e estatísticas referentes à utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade, disponibilizados por órgãos governamentais, departamentos de energia, de origem nacional ou internacional. Como principais órgãos consultados para a pesquisa

documental destacam-se a *International Energy Agency (IEA)*, *United States Department of Energy (DOE)*, *California Fuel Cell Partnership*, *European Hydrogen and Fuel Cell Association*, entre outros.

Figura 17- Etapas metodológicas



Fonte: Autor.

As etapas nomeadas como construção da modelagem e resultados são apresentadas e elucidadas nas seções 3.2.1 e 3.2.2.

3.2.1 Construção da modelagem

A construção da modelagem foi dividida em quatro etapas principais: Identificação de critérios e fatores críticos para o sucesso (FCS), definição de

indicadores e escalas de avaliação, validação dos indicadores e escalas de avaliação e construção do mecanismo de avaliação.

Em primeiro lugar, o objetivo central do estudo foi decomposto em PVFs, como primeiro nível na hierarquia, e posteriormente como segundo nível foi agrupado um rol de FCS. Os PVFs e FCS foram definidos a partir de um retorno a revisão bibliográfica e documental. Ao final desta etapa, o segundo objetivo específico foi atendido, ao qual exigia que fossem identificados os fatores mais relevantes para a competitividade na utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade.

Em seguida foram explicitadas as variáveis dos indicadores e as escalas de avaliação, determinadas com base na metodologia KPI apresentada por Parmenter (2012). Em específico para a construção das escalas padronizadas, foram utilizadas a metodologia de pontuação direta, para as variáveis discretas e qualitativas e para as quantitativas contínuas foi utilizado o método de bisseção (GOMES; GOMES, 2012; SOLIMAN, 2014).

Com o intuito de aumentar a confiabilidade da pesquisa os PVFs, FCSs, indicadores e escalas construídos foram submetidos à validação de um decisor neutro, ou seja, uma avaliação crítica realizada por especialistas da área. Foi enviada a modelagem para alguns especialistas nacionais através de e-mail e estes reportaram suas avaliações críticas. Consequentemente foi possível realizar adequações, para que as escalas ficassem o mais perto o possível da realidade das tecnologias do hidrogênio na mobilidade.

A última etapa da construção da modelagem trata da construção dos mecanismos de avaliação. Assim foi possível realizar a coleta de dados, para então mensurar o desempenho a partir dos indicadores elencados, bem como a importância atribuída pelos decisores para cada um dos FCS levantados.

3.2.2 Resultados

A etapa intitulada como resultados é composta pela coleta de dados, cálculo das taxas de substituição, mensuração do desempenho competitivo e simulações.

A coleta de dados foi realizada com o envio dos mecanismos de avaliação para especialistas da área, grupos de pesquisa e empresas. Foi construído um

formulário eletrônico na plataforma Google *Forms* e enviado, através de *e-mail*, aos especialistas internacionais, de regiões que existe alguma infraestrutura ou tecnologia do hidrogênio na mobilidade, como por exemplo, dos Estados Unidos, Canadá, de alguns países da Europa e alguns países asiáticos. Ao final desta etapa, o terceiro objetivo específico foi plenamente atingido, ao qual previa a construção da modelagem dos fatores indicativos identificados.

As taxas de substituição foram calculadas em uma planilha eletrônica do Microsoft Excel, a partir dos dados coletados na pesquisa. A Eq. 3 foi utilizada para os cálculos, conforme descrito na seção 2.5. As taxas de substituição foram calculadas a partir do método *Swing Weights* (GOMES; GOMES, 2014; CATTELAN, 2015), onde cada um dos níveis da estrutura hierárquica assumiu sua soma normalizada em 100%. Foi seguida a lógica *bottom-up*, iniciando pela base da estrutura hierárquica e continuando até o último nível. A importância atribuída pelos especialistas para cada um dos FCSs foi ponderada com o uso de apenas alguns conceitos associados à AHP de Saaty e Vargas (2012). Tendo em vista que a modelagem para mensurar a competitividade da utilização do hidrogênio como combustível para a mobilidade exige a análise de diversos fatores com pesos diferentes na obtenção do resultado competitivo final, optou-se por utilizar a AHP para a determinação da influência de cada FCS. A escolha da AHP é devido ao fato de esta metodologia ser bastante apropriada para ativos intangíveis.

A etapa de mensuração de desempenho competitivo foi possível considerando que os dados coletados foram utilizados como entradas para alimentar a modelagem. Os cálculos foram realizados em uma planilha eletrônica do Microsoft Excel, com o uso da Eq. 4, descrita na seção 2.5. Desta forma, o quarto objetivo foi atendido, na qual previa que fosse realizado um teste da modelagem construída. Assim foi possível realizar uma discussão dos dados analisados. Como o intuito do quarto objetivo foi apenas testar a modelagem, então não se fez necessário um cálculo de amostragem. Logo para uma análise mais fidedigna do cenário analisado é indispensável realizar cálculos de amostragem.

Na etapa de simulações foi esboçada uma lógica para formulações de ações no sentido de alavancar o desempenho competitivo do emprego do hidrogênio como combustível na mobilidade. O propósito foi propor ações para melhoria do desempenho competitivo e ver qual o impacto nos resultados. Foram propostas

algumas ações e posteriormente realizado uma simulação no Software Excel, para ver qual seria o impacto no desempenho competitivo, utilizando as taxas de substituição calculadas com a Eq. 3 e o desempenho competitivo com a ajuda da Eq. 4.

4. CONSTRUÇÃO DA MODELAGEM

Neste capítulo são descritos os procedimentos adotados para a estruturação do problema e também para a construção da modelagem de avaliação da competitividade da utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade.

Esta fase foi dividida em quatro etapas que são: identificação de critérios e fatores críticos de sucesso, definição dos indicadores e escalas de avaliação, validação dos indicadores e escalas de avaliação e construção do mecanismo de avaliação.

4.1. IDENTIFICAÇÃO DE CRITÉRIOS E FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO

Durante a leitura da bibliografia pertinente a esse contexto, buscaram-se identificar nas publicações elementos que moldam a competição no setor, ou seja, os FCS. Criou-se um banco de dados com a listagem dos FCS mais relevantes nas publicações e a origem da informação. De acordo com a recorrência nas publicações, pode-se verificar a relevância dos FCS.

Em seguida foi realizada uma triagem dos FCSs, com o intuito de identificar os PVFs. A triagem dos FCSs levou a consequente adoção de quatro PVFs, que são a Produção de hidrogênio (PVF-1), Armazenamento (PVF-2), Distribuição (PVF-3) e o Emprego do hidrogênio (PVF-4), vistos nos Quadros 8, 9, 10, 11 e 12. Na bibliografia que trata o contexto do uso do hidrogênio como combustível em veículos há a clara distinção entre produção, armazenamento, distribuição e emprego, conforme foi descrito na seção 2.2.

No Quadro 8 estão descritos os FCSs pertencentes ao PVF-1-Produção, ao total foram listados 7 FCSs. Dentro deste PVF se encaixam todos os possíveis métodos de produção de hidrogênio ao qual foram listados na seção 2.2.1 e também a produção em plantas centralizadas ou com a produção no local do uso. Em todos os métodos de produção o uso de energia renovável (FCS-1) é indispensável para justificar o hidrogênio como uma energia limpa. A eficiência energética e também exergética do processo produtivo são fatores críticos também, pois o uso eficiente da energia renovável, ou seja, pouco dispendioso, são fundamentais. O FCS-4 trata

da questão de capacidade produtiva (infraestrutura) para atender a demanda de hidrogênio produzido em larga escala.

Quadro 8- PVF-1- Produção

PVF1-PRODUÇÃO	
FCSs	Referências
FCS-1- Uso energia renovável para produção de H ₂	Balat (2008); Dutta (2014); Dufour et al. (2012); Hajjaji et al. (2013); Wang et al. (2014); Bhandari, Trudewind e Zapp (2014); Yilmaz, Balta e Selbas (2016); Salvi, Subramanian e Panwar (2013).
FCS-2- Eficiência Energética	Fayaz et al. (2012); Acar e Dincer (2014); Acar e Dincer (2015); Christopher e Dimitrios (2012); Dincer (2012); Ozbilen, Dincer e Rosen (2013); Mazloomi e Gomes (2012); Singh e Wahid (2015); Wang et al. (2014); Nikolaidis e Poullikkas (2017).
FCS-3- Eficiência exergetica	Acar e Dincer (2014); Acar e Dincer (2015); Christopher e Dimitrios (2012); Dincer (2012); Dufour et al. (2012); Ozbilen, Dincer e Rosen (2012).
FCS-4- Infraestrutura para produção de H ₂	Cetinkaya, Dincer e Naterer (2012); Mazoolomi e Gomes (2012).
FCS-5- Políticas públicas e regulamentações	Abdin, Webb e Gray (2015); Apak, Atay, Tuncer (2012); San Marchi et al. (2017).
FCS-6- Custos	FCS-6.1-Custos de produção de H ₂
	FCS-6.2- Custos de capital
FCS-7- Impactos ambientais	Cetinkaya, Dincer e Naterer (2012); Bhandari, Trudewind e Zapp (2014); Ozbilen, Dincer e Rosen (2013); Dincer (2012); Dufour et al. (2012); Acar e Dincer (2014); Yilmaz, Balta e Selbas (2016).

Fonte: Autor.

No Quadro 9, PVF-2, são listados os FCSs pertencentes ao armazenamento do hidrogênio, seja ele estacionário ou mesmo a bordo do veículo. Quanto ao PVF-2- Armazenamento optou-se por considerar o método por compressão, por ser o método de armazenamento mais utilizado estacionariamente e também a bordo dos veículos atualmente e por ser uma das tecnologias de armazenamento mais

compreendidas. Desta forma definiu-se não incluir o método de liquefação devido ao intensivo consumo de energia e também os métodos de armazenamento em hidretos devido ao fato de estarem em fase de pesquisa e desenvolvimento.

Quadro 9- PVF- 2- Armazenamento

PVF2-ARMAZENAMENTO (POR COMPRESSÃO)	
FCSs	
Referências	
FCS-8-Densidade gravimétrica	
Durbin e Malardier-Jugroot (2013); Cipriani et al. (2014); Joergensen (2011); Sharma e Ghoshal (2015); Hwang e Warma (2014); Zhang et al. (2015).	
FCS9-Densidade volumétrica	
Durbin e Malardier-Jugroot (2013); Cipriani et al. (2014); Joergensen (2011); Sharma e Ghoshal (2015); Hwang e Warma (2014).	
FCS-10- Segurança	FCS-10.1-Segurança no armazenamento a bordo do veículo
	FCS-10.2-Segurança no armazenamento estacionário
Durbin e Malardier-Jugroot (2013); Sharma e Ghoshal (2015); Hwang e Warma (2014); Cipriani et al. (2014).	
FCS-11-Eficiência energética	
Durbin e Malardier-Jugroot (2013); Zhang et al. (2015); Jorgensen (2011).	
FCS-12-Custos	
Durbin e Malardier-Jugroot (2013); Zhang et al. (2015); Cipriani et al. (2014); Jorgensen (2011); Preuster, Alekseev e Wasserscheid (2017); Balat (2008).	
FCS-13- Políticas públicas e regulamentações	
Apak, Atay, Tuncer (2012); Pique et al. (2017); San Marchi et al. (2017).	

Fonte: Autor.

No Quadro 10, PVF-3, são apresentados os FCSs referentes ao processo de distribuição do hidrogênio. Considerou-se nesta modelagem o transporte em caminhões reboque tubo (hidrogênio comprimido) e posterior distribuição em estações de abastecimento. Quanto ao PVF Distribuição considerou-se estudar o transporte em caminhões reboque tubo até as estações de abastecimento, por ser uma forma menos dispendiosa de energia como o que acontece no transporte do hidrogênio liquefeito. Contudo sabe-se que em um cenário mais desenvolvido e competitivo podem ser utilizados como meios de distribuição os gasodutos, navios e ferrovias, assim tornando a modelagem mais complexa e difícil de mensurar.

Quadro 10- PVF-3- Distribuição

PVF3- DISTRIBUIÇÃO	
FCSs	Referência
FCS-14-Disponibilidade de Infraestrutura de abastecimento	Balat (2008); Alazemi e Andrews (2015); Singh et al. (2015); Maniatopoulos, Andrews e Shabani (2015); Ogden (1999); Elgowainy et al. (2014).
FCS-15- Políticas públicas e regulamentações	Pique et al. (2017); Apak, Atay, Tuncer (2012); San Marchi et al. (2017).
FCS-16-Custos	FCS-16.1-Custo de uma estação de abastecimento
	FCS-16.2-Custo de transporte em caminhões reboque tubo
FCS-17-Eficiência energética	Balat (2008); Singh et al. (2015); Salvi e Subramanian (2015).
FCS-18-Carga útil transportada	Balat (2008); Singh et al. (2015); Yang e Ogden (2007).
FCS-19-Emissões	Singh et al. (2015); Yang e Ogden (2007); Bartolozzi e Frey (2013).

Fonte: Autor.

Quanto ao PVF-4, Quadro 11 e 12, são apresentados os FCSs referentes ao emprego do hidrogênio como combustível em veículos. Nesta etapa são listados dois conjuntos possíveis de FCS, o primeiro, Quadro 11, trata do uso do hidrogênio como combustível em veículos a célula de combustível (FCVs), e o segundo conjunto de FCSs, Quadro 12, trata do uso do hidrogênio em veículos a combustão interna (ICEV). Desta forma será possível mensurar posteriormente a criticidade desses dois possíveis cenários, e quiçá comparar a competitividade de ambos. Contudo atualmente as montadoras automotivas estão dando preferência para os FCVs. Outro fator que levou a separação entre as duas possíveis modelagens para o PVF-4 está uma pequena diferença nos FCSs. Vale observar que essas duas possíveis modelagens vão gerar taxas de substituição diferentes. Em cenários que aparecem as duas situações (FCV e ICEV) pode-se considerar que cada modelagem assume uma parcela na competitividade.

O FCS-20, eficiência do veículo, trata da eficiência energética no veículo, o que é muito dependente, mas não somente, da eficiência da célula de combustível PEM. O FCS-23, emissões, trata das emissões do “tanque a roda” somente, isto em

virtude de no PVF-1 e PVF-3 já considerarem as emissões decorrentes da produção e do transporte.

Quadro 11- PVF-4-A Emprego

PVF4- EMPREGO		
FCSs		Referência
FCVs (com PEM)	FCS-20-Eficiência do veículo	Han et al. (2014); Sharaf, Orhan (2014); Das, Tan e Yatim (2017); Ananthachar e Duffy (2005); Salvi e Subramanian (2015); Veziroglu e Macario (2011); Xu et al. (2013).
	FCS-21-Durabilidade da célula de combustível	Hua et al. (2014); Sharaf e Orhan (2014); Wang et al. (2016); Salvi e Subramanian (2015); Thoennes, Busse e Eckstein (2014).
	FCS-22-Aceitação pública dos veículos	Fayaz et al. (2012); Hardman, Shiu e Steinberger-Wilckens (2015).
	FCS-23-Emissões	Han et al. (2014); Salvi e Subramanian (2015); Hwang (2013).
	FCS-24-Autonomia do veículo	Ananthachar e Duffy (2005); Dutta (2014); Salvi e Subramanian (2015); Veziroglu e Macario (2011); Ball e Weeda (2015).
	FCS-25- Políticas públicas e regulamentações	San Marchi et al. (2017); Buttner et al. (2017); Farrell, Keith e Corbett (2003).
	FCS-26-Custos do veículo	FCS-26.1-Custo de manutenção do veículo
FCS-26.2-Custo de aquisição do veículo		

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que os FCSs referente a Custos (FCS-6, FCS-12, FCS-16, FCS-26, FCS 31), Impactos ambientais (FCS-7, FCS-19, FCS-23, FCS-29), eficiência (FCS-2, FCS-11, FCS-17, FCS-20, FCS-27), políticas públicas e regulamentações (FCS-5, FCS-13, FCS-15, FCS-25, FCS-30) estão presentes em praticamente todos os PVFs. Optou-se não criar outros PVFs (como por exemplo, um PVF impactos ambientais ou custos), pois na literatura aparece a clara distinção entre Produção, Armazenamento, Distribuição e Emprego, e como se trata de um

cenário bastante amplo e complexo torna-se difícil mensurar os custos, por exemplo, de toda a cadeia e encontrar algum especialista que compreenda toda a cadeia. Desta forma um especialista pode ser capaz de responder com propriedade sobre questões relacionadas à eficiência na produção, por exemplo, mas não com a mesma propriedade questões relacionadas à eficiência na distribuição ou armazenamento, pois é um cenário relativamente amplo.

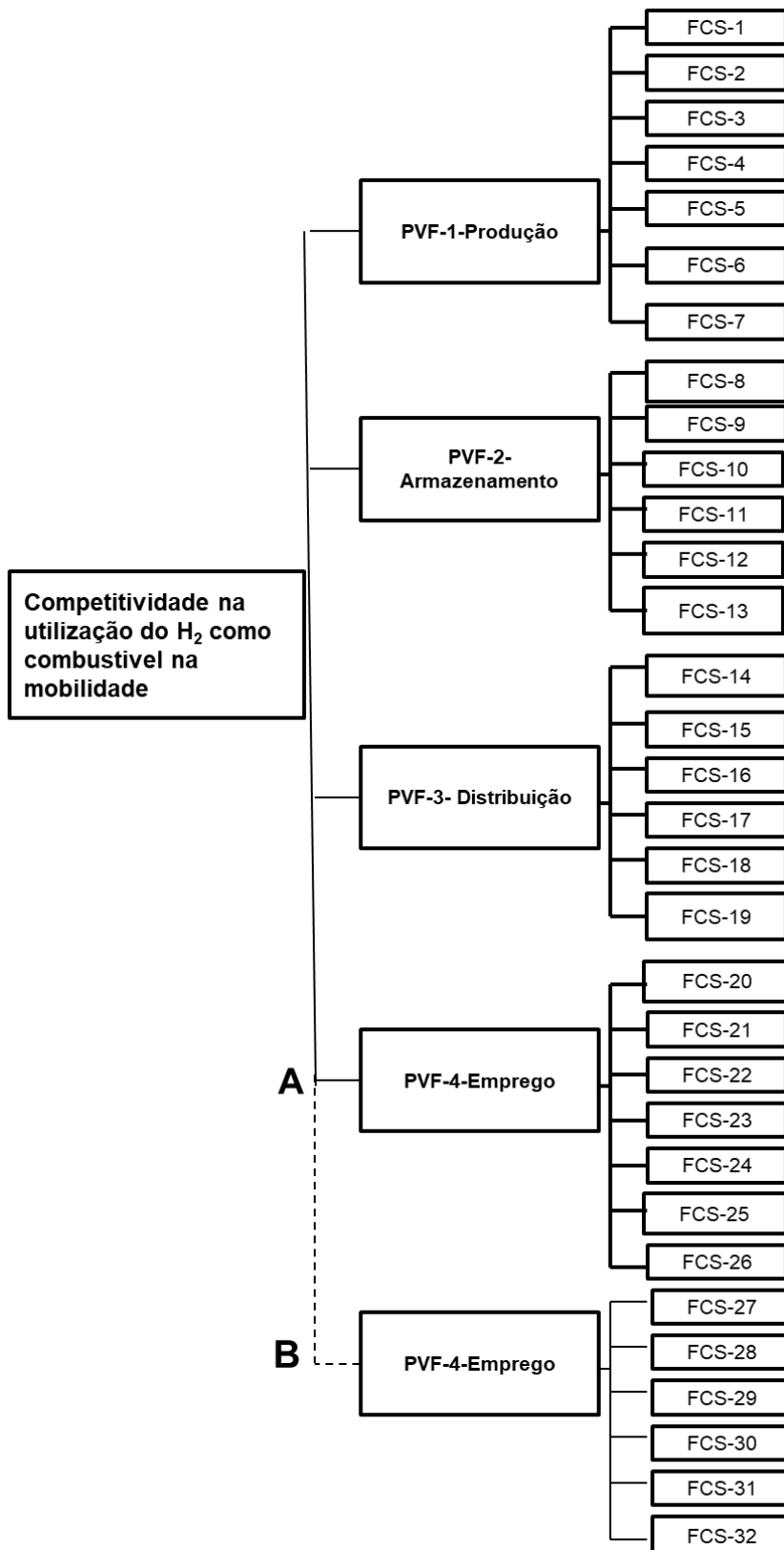
Quadro 12- PVF-4-B (hidrogênio em veículos com motor a combustão interna).

PVF-4-EMPREGO			
FCSs		Referências	
ICEV	FCS-27-Eficiência do veículo	Salvi e Subramanian (2015); Ji, Wang e Zhang (2012); Dutta (2014); Cipriani et al. (2014);	
	FCS-28-Aceitação pública dos veículos	Fayaz et al. (2012); Verhelst e Wallner (2009).	
	FCS-29-Emissões	Cipriani et al. (2014); Fayaz et al. (2012); Salvi e Subramanian (2015); Ji, Wang e Zhang (2012); Dutta (2014); Cipriani et al. (2014).	
	FCS-30-Políticas públicas e regulamentações	San Marchi et al. (2017); Buttner et al. (2017); Farrell, Keith e Corbett (2003).	
	FCS-31-Custos do veículo	FCS-31.1-Custo de aquisição do veículo	Fayaz et al. (2012); Hua et al. (2014); Wang et al. (2016); Salvi e Subramanian (2015).
		FCS-31.2-Custo de manutenção do veículo	
FCS-32-Autonomia do veículo		Ananthachar e Duffy (2005); Dutta (2014); Salvi e Subramanian (2015); Veziroglu e Macario (2011).	

Fonte: Autor.

Ao total foram levantados quatro PVFs e 32 FCSs para realizar a avaliação do desempenho competitivo do hidrogênio como combustível na mobilidade. A estrutura hierárquica para avaliação da competitividade do H₂ na mobilidade pode ser melhor visualizada na Figura 18. Na Figura 18 o PVF-4 aparece com os dois possíveis cenários, ao qual foram designados de PVF-4A e PVF-4B.

Figura 18- Estrutura hierárquica para avaliação do desempenho competitivo do H₂ na mobilidade.



Fonte: Autor.

4.2. DEFINIÇÕES DE INDICADORES E ESCALAS DE AVALIAÇÃO

A partir da definição dos FCSs, levantados na seção 4.1, pode-se dar início a construção dos indicadores e escalas de avaliação para mensurá-los. O primeiro passo foi à definição de um conceito de avaliação para cada um dos FCSs apresentados. Essa conceituação objetivou definir claramente o que se deseja mensurar, a fim de evitar interpretações equivocadas de quem for responder os indicadores propostos.

Posteriormente, cada um dos FCS foi desdobrado em cinco possíveis níveis de mensuração (N1, N2, N3, N4, N5), onde em cada caso, a situação “N1” corresponde à situação mais adequada possível, enquanto o “N5” corresponde a situação mais inadequada, ou seja, com menor grau de competitividade. O ponto médio “N3”, refere-se ao desempenho competitivo médio, neste patamar o cenário não é considerado totalmente eficiente ou ineficiente.

Com o propósito de construção de indicadores normalizados para a mesma escala, permitindo uma comparação e agregação dos mesmos, foram propostos funções lineares com pontuação entre 0 e 100. Desta forma, o nível mais alto “N1” recebeu pontuação 100%, o nível “N2” recebeu pontuação 75%, o nível “N3” recebeu pontuação 50%, “N4” recebeu como pontuação 25% e o nível mais baixo que é o “N5” foi atribuída a pontuação mínima de 0%.

O quadro 13 representa um exemplo de indicador que foi construído. Percebe-se que todos os indicadores são compostos pelo nome do indicador, pelo índice de localização de sua posição na estrutura hierárquica, níveis de avaliação, descrição dos níveis de avaliação com sua respectiva valoração. Como exemplo o KPI do Quadro 13, a numeração 2.1 significa que o indicador é subordinado ao FCS-2. A listagem completa de todos os indicadores elaborados está contida no Apêndice A.

Anteriormente aos indicadores do PVF-1 estão algumas perguntas que visam conduzir o respondente a escolha de apenas um método de produção, um recurso energético primário e tipo de planta de produção (centralizada ou com produção no local do uso), Apêndice A. O respondente então escolherá um método de produção pela qual conhece e existem plantas de produção em sua região e responderá assim os indicadores com base nessa escolha. Da mesma forma ocorre para o PVF-4-B, anteriormente o respondente é indagado quanto ao tipo de motor a combustão

interna que o veículo possui e quanto à proporção de hidrogênio usada como combustível.

Quadro 13- Exemplo de indicador construído.

PVF-1-Produção		FCS-2-Eficiência energética
Indicador: 2.1- A respeito da eficiência energética das plantas de produção de hidrogênio existentes em sua região, você considera:		
Nível	Valor	Descrição do nível de competitividade
N1	100	Muito alto.
N2	75	Alto.
N3	50	Moderado
N4	25	Baixo.
N5	0	Muito baixo.

Fonte: Autor.

A valoração, de cada um dos níveis de avaliação dos indicadores foi fundamentada com base em estatísticas encontradas na literatura. Contudo, nem sempre as estatísticas estavam disponíveis na literatura, desta forma, ficou a cargo do pesquisador propor a valoração para os níveis de avaliação. Para minimizar essa subjetividade na pesquisa e validá-la, o pesquisador buscou apoio com especialistas da área, conforme é discutido na seção 4.3.

4.3 VALIDAÇÃO DOS INDICADORES E ESCALAS DE AVALIAÇÃO

O objetivo principal da validação dos indicadores e escalas de avaliação é elevar a confiabilidade da modelagem construída através da análise crítica realizada por um especialista que conheça todas ou alguma das etapas que envolvem a utilização de hidrogênio como combustível na mobilidade. Para isso, contou-se com ajuda de alguns professores que possuem conhecimento nessa área.

Foram enviados alguns materiais contendo a descrição da pesquisa e os indicadores e escalas de avaliação que foram construídos. Os professores fizeram algumas sugestões e realizaram a aprovação dos indicadores e escalas de avaliação propostos. Uma especialista que ajudou a validar a pesquisa, principalmente quanto ao PVF-1, pertence à Universidade Federal da Integração

Latino-Americana (UNILA). Esta especialista possui experiências na área de química, com ênfase em eletroquímica, atuando em temas como energias renováveis, hidrogênio, células a combustível e eletrólise da água. Quanto ao PVF-2 um professor do Laboratório de Hidrogênio da Unicamp realizou uma análise crítica. O coordenador do Núcleo de Pesquisas em Hidrogênio do Parque Tecnológico da Itaipu também realizou uma análise dos FCS e dos indicadores e escalas de avaliação e considerou a abordagem adequada.

4.4. CONSTRUÇÃO DO MECANISMO DE AVALIAÇÃO

O mecanismo utilizado nesta pesquisa foi construído contendo uma questão de múltipla escolha para cada um dos FCS, onde as possibilidades de resposta estão relacionadas com os níveis de avaliação e as escalas construídas. Desta maneira, torna-se possível analisar e comparar o desempenho competitivo dos cenários que empregam hidrogênio como combustível para a mobilidade, permitindo uma coleta de dados padronizada.

Complementarmente, o mecanismo de avaliação questiona os respondentes quanto ao nível de importância que os mesmos atribuem para cada um dos FCS. Desta forma, aproxima-se com mais exatidão ao contexto por não tratar todos os indicadores com o mesmo nível de importância, mas outorgando uma estratificação destes em mais ou menos relevantes. Para isso, foi elaborada a escala apresentada na Figura 19, onde os questionados devem assinalar uma resposta entre 1-9 para cada indicador.

Figura 19- Exemplo de questão utilizada na coleta dos pesos dos FCS

Regarding the use of "renewable energy" for hydrogen production, what is the ^{*} level of importance do you attribute to this factor?

1-Less important; 9-Most Important; 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 are intermediate values.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fonte: Autor.

5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os dados coletados, com a aplicação do mecanismo de pesquisa, juntamente com a discussão dos resultados. Este capítulo é composto pelas seções Coleta de Dados (item 5.1), Cálculo das Taxas de Substituição (item 5.2), Mensuração do desempenho Competitivo (item 5.3) e Simulações (item 5.4).

5.1. COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada no período de dezembro de 2017 e janeiro de 2018. O questionário foi enviado para especialistas de diversas universidades, associações, centros de pesquisa e empresas, que trabalham no desenvolvimento e pesquisa do uso de hidrogênio como combustível na mobilidade. Foi enviado o questionário do *Google Forms* através de *e-mail* para 174 especialistas dos seguintes países: Estados Unidos, Canadá, Japão, Coréia do Sul, Alemanha, Inglaterra, França, Espanha, Portugal, Suécia, Suíça, Noruega, Finlândia e Itália.

O *e-mail* de contato dos especialistas foi coletado em artigos que foram utilizados na análise bibliométrica e revisão bibliográfica e também em *site* de órgãos governamentais, centros de pesquisa e associações. Alguns exemplos de centros de pesquisas e associações são: *California Fuel Cell Partnership; California Hydrogen Business Council; Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association; H₂ Mobility; UK Hydrogen and Fuel Cell Association; German Hydrogen and Fuel Cell Association; Spanish Hydrogen Association; Scandinavian Hydrogen Highway Partnership, The Hydrogen Association*, entre outros. Procurou-se enviar o questionário somente para instituições e pesquisadores que possuem comprovado conhecimento na área e de locais que há esforços atualmente para o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio na mobilidade.

Obteve-se 7 respostas, portanto uma taxa de retorno de aproximadamente 4,02%. Os respondentes foram dos Estados Unidos, Canadá, França, Finlândia e Inglaterra, conforme o Quadro 14. Alguns dos respondentes permitiram colocar seu nome e da instituição na pesquisa, enquanto outros preferiram ser designados com nomes fictícios, como por exemplo, Respondente Y.

Quadro 14- Origem dos respondentes do instrumento de coleta de dados.

Respondente	Cargo	Instituição/Empresa	Infraestrutura da região
Respondente X	-	The Hydrogen Association: instituição sem fins lucrativos que tem o objetivo de desenvolver, comprovar e educar cientistas, empresários e legisladores a respeito das tecnologias de hidrogênio de fonte solar.	Estados Unidos, Arizona: Uma estação de abastecimento, veículos a célula de combustível sendo comercializados.
Jacques Huot	Professor universitário	Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR): Possui o <i>Hydrogen Research Institute</i> , na qual são realizadas pesquisas sobre armazenamento, transporte, segurança e uso de hidrogênio.	Canadá, Quebec: Há veículos a célula de combustível na região e algumas estações de abastecimento de H ₂ .
Steve Jones	Diretor executivo	ITM Power: fabricante de soluções integradas de energia de hidrogênio, como estações de abastecimento, eletrolisadores para produção, sistemas de armazenamento.	Estados Unidos, Califórnia: Há estações públicas de abastecimento na região, veículos a célula de combustível, plantas de produção de H ₂ .
Respondente Y	-	TechnoCentre éolien: é um centro de especialização que apoia o desenvolvimento do setor de energia eólica através da pesquisa, transferência de tecnologia e atividades de suporte às empresas.	Canadá, Quebec: Há veículos a célula de combustível na região e algumas estações de abastecimento de hidrogênio.
Benno Weinberger	Gerente de R&D	INERIS (<i>Institut national de l'environnement industriel et des risques</i>): é uma instituição pública de natureza industrial e comercial, sob a supervisão do ministério do meio ambiente da França. Possui uma unidade especializada na determinação do risco de processos inovadores na indústria, como sobre sistemas de armazenagem de alta pressão de H ₂ .	França, Halatte: Há produção de hidrogênio na região, algumas estações de abastecimento e veículos a célula de combustível sendo comercializados.
Kari Alanne	Professor universitário	Aalto University: Possui o departamento de tecnologia energética, ao qual realiza pesquisas sobre energias renováveis, como o hidrogênio.	Finlândia, Espoo: Existe algumas estações de abastecimento na região, produção de hidrogênio e veículos sendo comercializados.
Respondente Z	-	University Birmingham: Possui o <i>Centre of Doctoral Training (CDT) in Fuel Cells and their Fuels</i> , na qual desenvolve uma ampla gama de campos relacionados a células de combustível.	Inglaterra, West Midlands: Há produção de hidrogênio na região, algumas estações de abastecimento e veículos a célula de combustível sendo comercializados.

Fonte: Autor.

Como se pode perceber no Quadro 14, os especialistas respondentes possuem comprovado conhecimento sobre as tecnologias do hidrogênio, trabalham em instituições que focam concentradamente ou parcialmente seus esforços nas tecnologias do H₂. Ao enviar a modelagem para os respondentes solicitou-se que respondessem de acordo com a realidade de sua região. Os respondentes foram de regiões que possuem notoriedade nas tecnologias do H₂, ou seja, que possuem alguma infraestrutura (mesmo que ainda deficitária) e esforços para o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio na mobilidade.

Na coleta de dados, como a modelagem do PVF-1 foi desenvolvida para análise de todos os possíveis métodos de produção de H₂, indagou-se os especialistas para escolher um método de produção e responder as perguntas do PVF-1 conforme a escolha. Cinco dos especialistas responderam o questionário para o método de produção de H₂ por SMR (em uma planta centralizada) e 2 especialistas responderam para a eletrólise da água com energia renovável (produção no local do uso).

5.2. CÁLCULO DAS TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO

Os dados coletados para definir a importância de cada um dos FCSs foram utilizados para calcular e definir as taxas de substituição, permitindo assim identificar quais dos FCSs possuem maior ou menor importância frente ao contexto. Utilizou-se para a coleta dessas informações a escala padronizada [1,9]. Os cálculos das taxas de substituição foram realizados em uma planilha eletrônica do software Microsoft Excel®, seguindo a sequência *bottom up* e utilizando elementos da metodologia AHP. Com o intuito de ilustrar a metodologia adotada para calcular as taxas de substituição, com um exemplo, apresentam-se no Quadro 15 os valores de importância encontrados para os indicadores 6.1 e 6.2, pertencentes ao FCS-6.

Quadro 15- Importância e taxas de substituição para os KPI-6.1 e 6.2.

FCS _i	KPI-6.1	KPI-6.2	Soma
Importância (Z _i)	6,71	6,71	13,42
Taxa local (P _i)	50%	50%	100%

Fonte: Autor.

Após a realização do cálculo da importância e das taxas de substituição neste nível (KPI), parte-se para o próximo nível da árvore decisão (FCS). Seguindo o mesmo exemplo anterior, calculou-se a importância do FCS-6- Custos. O valor de importância do FCS-6 foi calculado com a média de importância do KPI-6.1 e do KPI-6.1, que foi de 6,71 e sua taxa local de substituição foi de 12,6%. Esta taxa local de substituição representa o peso do FCS-6, dentro do PVF-1-Produção. A importância dos demais FCS e suas respectivas taxas locais de substituição são apresentadas no Quadro 16.

Quadro 16- Importância e taxas de substituição locais para os FCS.

PVF	FCS	Importância (Z_i)	Taxa de substituição, P_i (%)
PVF-1	FCS-1	8,43	15,82
	FCS-2	7,57	14,21
	FCS-3	7,29	13,67
	FCS-4	7,29	13,67
	FCS-5	8,29	15,55
	FCS-6	6,71	12,6
	FCS-7	7,71	14,48
PVF-2	FCS-8	6	13,50
	FCS-9	6,71	15,11
	FCS-10	8,43	18,97
	FCS-11	8	18,01
	FCS-12	7,29	16,40
	FCS-13	8	18,01
PVF-3	FCS-14	8,57	16,76
	FCS-15	8	15,64
	FCS-16	7	13,69
	FCS-17	7,29	14,25
	FCS-18	7	13,69
	FCS-19	6,29	12,29
PVF-4-A	FCS-20	8	14,47
	FCS-21	7,86	14,21
	FCS-22	8,14	14,73
	FCS-23	8,14	14,73
	FCS-24	8	14,47
	FCS-25	8	14,47
	FCS-26	7,14	12,92
PVF-4-B	FCS-27	7,86	16,57
	FCS-28	7,71	16,27
	FCS-29	8,14	17,17
	FCS-30	7,86	16,57
	FCS-31	7,57	15,96
	FCS-32	8,29	17,47

Fonte: Autor.

O próximo passo foi calcular a importância e a taxa de substituição para os PVFs. Calculou-se a média dos valores de importância dos FCS que estão em cada

um dos PVF, Quadro 17. As duas situações de modelagem para o PVF-4 apresentaram coincidentemente resultados muito próximos de importância, o que é um facilitador para a pesquisa, pois desta forma pode ser utilizado a mesma taxa de substituição para ambos os PVFs-4. Caso as duas modelagens apresentassem diferenças consideráveis tornava-se necessário calcular as taxas de substituição locais para as duas situações.

Quadro 17- Importância e taxa de substituição para os PVFs.

PVF	PVF-1	PVF-2	PVF-3	PVF-4-A	PVF-4-B	Soma
Importância	7,61	7,40	7,31	7,90	7,83	38,05
Taxa de substituição	25,19	24,5	24,18	26,1	25,96	≅125%

Fonte: Autor.

Com as taxas de substituição locais calculadas, parte-se para as taxas de substituição globais (W_i). O cálculo das taxas globais é realizado multiplicando-se as taxas locais de substituição dos FCS localizados no nível superior da árvore de decisão. Por exemplo, para o caso do KPI-6.1, a taxa global encontrada é de 1,58, utilizando a Eq.3.

$$W_{6.1} = P_1 * P_6 * P_{6.1}$$

$$W_{6.1} = 50 * 12,6 * 25,19$$

$$W_{6.1} = 1,59\%$$

As taxas de substituição globais foram aplicadas em todos os elementos que fazem parte da árvore de decisão. No Quadro 18 são mostradas as taxas de substituição para os FCSs e KPIs do PVF-1-Produção. O PVF-1 possui peso relativo de 25,19% em relação aos demais PVFs. Pode-se notar que os pesos dos critérios apresentam baixa variação, o que transmite a ideia de uniformidade nas respostas dos especialistas quanto o nível de importância.

Com os dados apresentados no Quadro 18 permite-se ultimar que os especialistas respondentes atribuem a utilização de energia de fontes renováveis como um fator muito importante para a produção de hidrogênio. Em segundo lugar os especialistas julgaram como um fator importante na produção de hidrogênio à disponibilidade de políticas públicas e regulamentações. Como fator menos importante os especialistas consideraram os custos (de capital e de produção) a

eficiência exergética do processo produtivo e também a disponibilidade de infraestrutura para produção de hidrogênio.

Quadro 18- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-1.

PVF-1- Produção (25,19%)		
Taxa de substituição global do FCSs, W_i (%)	Taxa de substituição global, W_i KPIs (%)	KPI
3,98	3,98	KPI-1.1
3,58	3,58	KPI-2.1
3,44	3,44	KPI-3.1
3,44	3,44	KPI-4.1
3,92	3,92	KPI-5.1
3,18	1,59	KPI-6.1
	1,59	KPI-6.2
3,65	3,65	KPI-7.1

Fonte: Autor.

No Quadro 19 encontram-se as taxas de substituição globais para o PVF-2, a qual recebeu peso relativo de 24,50%. O fator crítico que recebeu a mais alta ponderação foi à segurança, seja ela no armazenamento a bordo do veículo ou mesmo o armazenamento estacionário. Com ponderações de 4,41 os FCSs que também se destacaram importantes foram à eficiência energética no processo de compressão do hidrogênio e as políticas públicas e regulamentações no armazenamento. Como fator crítico julgado como menos importantes pelos especialistas estão às densidades volumétricas e gravimétricas do método de armazenamento por compressão.

Quadro 19- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-2.

PVF-2- Armazenamento (24,50%)		
Taxa de substituição global do FCSs, W_i (%)	Taxa de substituição global, W_i KPIs (%)	KPI
3,31	3,31	KPI-8.1
3,70	3,70	KPI-9.1
4,65	2,32	KPI-10.1
	2,32	KPI-10.2
4,41	4,41	KPI-11.1
4,02	4,02	KPI-12.1
4,41	4,41	KPI-13.1

Fonte: Autor.

As taxas globais de substituição para a distribuição do hidrogênio, PVF-3, aparecem no Quadro 20. O FCS que recebeu a mais alta pontuação dentro deste PVF foi à disponibilidade de estações de abastecimento para os veículos, comprovando-se a importância deste fator. As políticas públicas e regulamentações também foram julgadas como um dos FCSs mais importantes, dentro do PVF-Distribuição. Na distribuição o fator crítico julgado como menos importante pelos especialistas foi às emissões no transporte em caminhões reboque tubo.

Quadro 20- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-3.

PVF-3- Distribuição (24,18%)		
Taxa de substituição global do FCSs, W_i (%)	Taxa de substituição global KPIs, W_i (%)	KPI
4,05	4,05	KPI-14.1
3,78	3,78	KPI-15.1
3,31	1,65	KPI-16.1
	1,65	KPI-16.2
3,44	3,44	KPI-17.2
3,31	3,31	KPI-18.1
2,97	2,97	KPI-19.1

Fonte: Autor.

Na primeira das modelagens, que considera o emprego do hidrogênio em veículos a célula de combustível, Quadro 21, apresenta-se as taxas de substituições globais para o PVF-4. O FCS julgado como mais importante foi à aceitação pública dos veículos, com taxa global de substituição de 3,85, empatado com as emissões no veículo. A aceitação pública dos veículos pode justificar-se como mais importante fator, pois o conceito de células de combustível ainda é algo desconhecido para o público geral. O FCS ponderado como menos importante pelos especialistas foi os custos de manutenção e aquisição do veículo.

Quadro 21- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-4-A.

PVF-4- Emprego (26,13%)		
Taxa de substituição global do FCSs, W_i (%)	Taxa de substituição global KPIs, W_i (%)	KPI
3,78	3,78	KPI-20.1
3,71	3,71	KPI-21.1
3,85	3,85	KPI-22.1
3,85	3,85	KPI-23.1
3,78	3,78	KPI-24.1
3,78	3,78	KPI-25.1
3,38	1,55	KPI-26.1
	1,82	KPI-26.2

Fonte: Autor.

Na segunda modelagem, proposta para o emprego do hidrogênio em veículos com motores a combustão, apresenta-se as taxas de substituição globais no Quadro 22. O FCS que recebeu maior importância foi à autonomia do veículo com o tanque de combustível cheio. Já o FCS julgado como menos representativo foi os custos de aquisição e manutenção do veículo.

Quadro 22- Taxas de substituição global para os FCSs e KPIs do PVF-4-B.

PVF-4- Emprego (25,96)		
Taxa de substituição global do FCSs, W_i (%)	Taxa de substituição global KPIs, W_i (%)	KPI
4,30	4,30	KPI-27.1
4,22	4,22	KPI-28.1
4,46	4,46	KPI-29.1
4,30	4,30	KPI-30.1
4,14	2,07	KPI-31.1
	2,07	KPI-31.2
4,54	4,54	KPI-32.2

Fonte: Autor.

5.3 MENSURAÇÃO DO DESEMPENHO COMPETITIVO

A mensuração do desempenho competitivo envolve a obtenção de resultados quantitativos da aplicação da modelagem, que representam um diagnóstico seja de cada um dos PVFs, ou ainda os resultados obtidos em alguns cenários atuais.

A avaliação global da competitividade do cenário (V(a)) foi obtida por meio de uma função de agregação aditiva, que leva em conta o desempenho obtido (V_i) por cada KPI e sua taxa de substituição global (W_i), Eq. 4, seção 2.5.

Foram propostos quatro faixas para avaliar o nível de competitividade dos cenários avaliados, conforme o Quadro 23. Um desempenho de 50% representa que o cenário está em um patamar mediano, enquanto um desempenho de 51% até 75 representa que o cenário tem potencial de ser competitivo.

Quadro 23 - Faixas de avaliação da competitividade.

Nível competitividade	Descrição
0% --- 25%	Sem competitividade
25% --- 50%	Pouco competitiva
50% --- 75%	Potencialmente competitiva
75% --- 100%	Plenamente competitiva

Fonte: Autor.

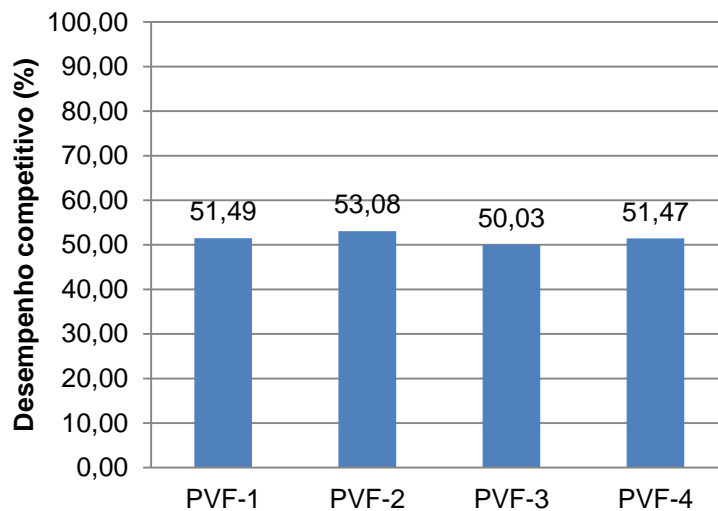
5.3.1. Desempenho competitivo global

Na avaliação global da competitividade do hidrogênio como combustível para a mobilidade, considerando todos os cenários avaliados, o desempenho foi de 51,52%, localizado no nível “potencialmente competitivo”. Esse desempenho é baseado no PVF-4-A, hierarquizado na Figura 17, que considera o uso de veículos a célula de combustível. Com o PVF-4-B, que considera veículos a hidrogênio com motores de combustão interna, não foram coletados dados, pois esses veículos não estão sendo comercializados atualmente pelas montadoras e, portanto não se encontram em uso nas ruas.

Contudo ao avaliar o desempenho competitivo por PVF, Figura 20, o PVF-3 apresentou 50,03%. Isto se deve ao fato da baixa disponibilidade de estações para abastecimento, da ineficiência energética na entrega do hidrogênio comprimido e da baixa carga útil transportada nos caminhões reboques tubo. O PVF-2 apresentou o melhor desempenho competitivo, de 53,08%, em decorrência da segurança existente no armazenamento a bordo do veículo e estacionário e também do desempenho da densidade gravimétrica dos sistemas de armazenamento. Contudo

ao comparar o desempenho de todos os PVFs nota-se o desempenho semelhante. O desempenho dos PVFs estão dentro da faixa de “potencialmente competitivo”, contudo estão muito mais próximos do desempenho “pouco competitivo” do que do “plenamente competitivo”.

Figura 20-Desempenho competitivo global por PVF.



Fonte: Autor.

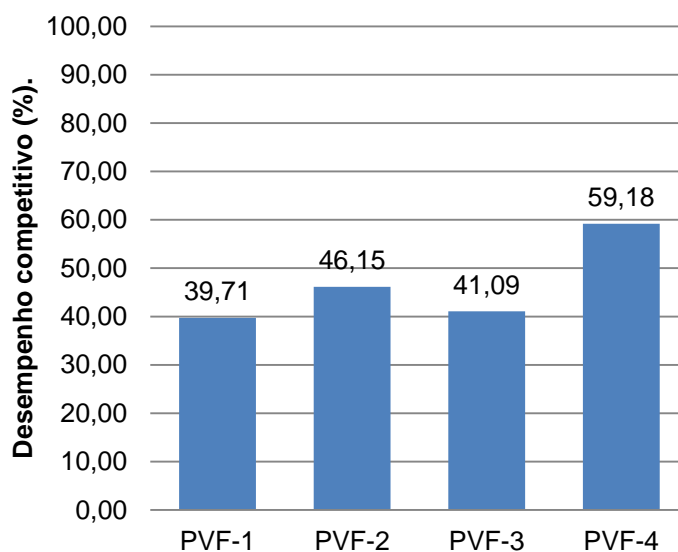
5.3.2. Desempenho por respondente

Na avaliação do desempenho competitivo por respondente apresenta-se a competitividade baseada na resposta do Respondente X, *The Hydrogen Association*, localizada no estado do Arizona, Estados Unidos. Utilizou-se a resposta do respondente do estado da Arizona nos Estados Unidos, pois se trata de um cenário ao qual não há muito desenvolvimento nas tecnologias do H₂, se comparado ao cenário da Califórnia nos Estados Unidos. O desempenho competitivo baseado na resposta deste especialista foi de 46,69%, definido como “pouco competitivo”. Nesta etapa utilizou-se a resposta de um dos respondentes (de um cenário) e apresentou-se o desempenho, para posteriormente na seção 5.4 realizar algumas simulações.

Ao apresentar este desempenho em função dos PVFs, o que apresentou o pior desempenho foi PVF-1-Produção, Figura 21. Este resultado deu-se em função da baixa utilização de energias de fontes renováveis para a produção de hidrogênio, do alto custo de capital das plantas de produção do hidrogênio e da baixa disponibilidade de infraestrutura para produção em larga escala para fins de

mobilidade. O melhor desempenho competitivo foi alcançado pelo PVF-4, tendo em vista os bons resultados alcançados nos quesitos emissões no veículo e eficiência energética do veículo a célula de combustível.

Figura 21- Desempenho competitivo com dados de um respondente dos Estados Unidos.



Fonte: Autor.

5.4 SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO

O foco nesta etapa é propor melhorias, através de um plano de ação, para então alavancar o desempenho competitivo. As soluções visam impactar as taxas de substituição que possuem maior nível de importância dentro da modelagem.

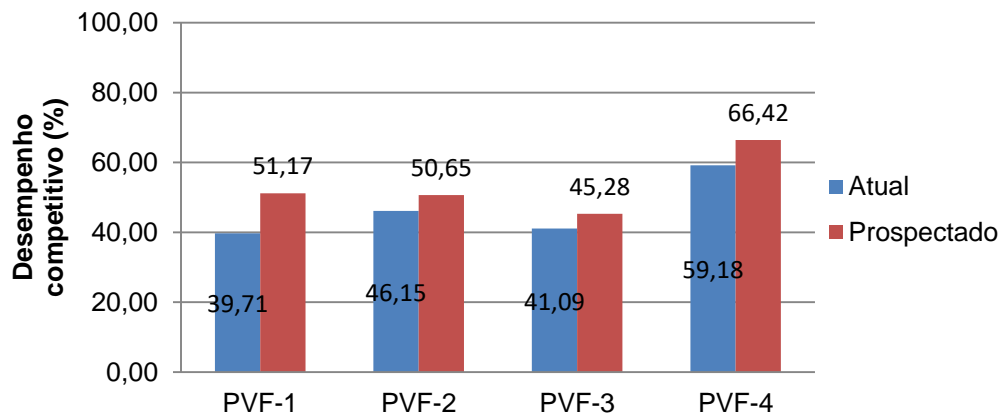
Para demonstrar o efeito do plano de ação foi analisado o caso mencionado no item 5.3.2. O resultado do desempenho competitivo da situação mencionada anteriormente foi de 46,69%, visando alavancar este desempenho as seguintes propostas de melhorias são indicadas:

- Investimento na produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis;
- Criação de mais políticas governamentais para fomentar a produção de hidrogênio;
- Investimento em tecnologia e em rotas de produção com baixo potencial de aquecimento global;

- d) Investimento em pesquisa e desenvolvimento com o intuito de aumentar a eficiência energética do armazenamento por compressão;
- e) Investimento em infraestrutura de abastecimento;
- f) Criação de mais incentivos fiscais para comercialização dos veículos.

A partir da aplicação das ações de melhoria elencadas anteriormente realizou-se uma simulação, conforme a Figura 22. O desempenho prospectado foi de 53,58%, definido qualitativamente como “potencialmente competitivo”, portanto obteve-se uma melhora de 6,89% no desempenho.

Figura 22- Desempenho simulado.



Fonte: Autor.

6. CONCLUSÕES

A pesquisa realizada nesta dissertação de mestrado teve como objetivo principal criar uma modelagem com o intuito de medir o desempenho competitivo do uso do hidrogênio como combustível na mobilidade. Como objetivos específicos estavam criar a modelagem e após isso testá-la.

Esses objetivos foram alcançados a partir da identificação de quatro pontos de vistas fundamentais, 32 fatores críticos para o sucesso e 37 indicadores de desempenho. Houve ainda a validação desta modelagem construída por alguns especialistas que trabalham na área. A partir da investigação teórica realizada, dos dados coletados e da aplicação prática da modelagem construída, as seguintes considerações podem ser elencadas:

- a) Os principais influenciadores da competitividade da utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade podem ser visualizados sob a óptica de quatro pontos de vistas fundamentais. O primeiro diz respeito ao processo produtivo, métodos e plantas de produção, enquanto o segundo diz respeito a forma de armazenamento de hidrogênio. O terceiro está relacionado à distribuição e transporte do hidrogênio e o último diz respeito ao uso do hidrogênio em veículos;
- b) Os cálculos das taxas de substituição levaram a entender como cada fator crítico para o sucesso possui uma importância relativa. As ponderações obtidas por cada ponto de vista fundamental tiveram pouca variação, o que confirma uma proximidade nas respostas dadas pelos especialistas.
- c) O teste da modelagem propiciou mostrar que a modelagem funciona e que pode ser aplicada nos cenários das tecnologias do hidrogênio na mobilidade. Contudo como o intuito era apenas testar e aplicar a modelagem, não foi realizado uma coleta exaustiva com dados estatísticos representativos do cenário. A fundamentação teórica e o desempenho competitivo alcançado permitem dizer que a competitividade dos cenários que utilizam hidrogênio na mobilidade estão em uma transição entre “pouco competitivo” e “potencialmente competitivo”.
- d) A modelagem pode ser utilizada para criar simulações e montar um plano de ação que ajude os decisores a focar seus esforços, permitindo atacar as

prioridades e visualizar como as melhorias influenciam na maximização dos resultados.

A utilização do hidrogênio como combustível na mobilidade carece de muitos avanços ainda para ser “plenamente competitiva” frente aos combustíveis convencionais. Grandes avanços em questões tecnológicas, infraestruturais e políticas são essenciais.

6.1. LIMITAÇÕES

Uma das principais limitações que pode ser mencionada para este estudo é a complexidade existente nas tecnologias do hidrogênio, o que dificultou a criação da modelagem. Como a abrangência de estudo é relativamente grande, pois são estudadas todas as etapas das tecnologias do hidrogênio na mobilidade, desde a produção até a utilização em veículos, os FCS apresentados são apenas os mais importantes, contudo existem outros FCSs de menor importância que não foram considerados e que podem influenciar a competitividade. Como o universo do estudo é relativamente abrangente foi apenas testada a modelagem, logo em uma coleta de dados estatisticamente representativa os resultados podem vir a ser diferentes dos apresentados. O número de respondentes deste estudo também pode ser julgado como uma limitação.

6.2. ESTUDOS FUTUROS

O presente estudo possui pontos que podem ser avançados em estudos futuros. Destaca-se a possibilidade de desenvolver uma modelagem que considere a competitividade no armazenamento por liquefação e armazenamento físico/químico em hidretos. Na etapa de distribuição não foram considerados o transporte em gasodutos e navios, o que pode ser explorado em um estudo futuro. Ainda pode ser possível o desenvolvimento de uma ferramenta ou *software* que traga maior praticidade na mensuração do desempenho competitivo. Outro ponto que pode ser estudado é a comparação com outras técnicas de apoio a decisão.

6.3. PUBLICAÇÕES REFERENTES AO ESTUDO

Com base nas pesquisas relativas a esse estudo foram publicados alguns artigos. No mês de agosto de 2017 foi publicado na revista *International Journal of Hydrogen Energy* o artigo intitulado “*Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review*”. No mês de novembro de 2017 foi publicado o artigo intitulado “*Viability and impacts of hydrogen economy in mobility- a review*” nas seções técnicas do 26º congresso SAE Brasil 2017 de Mobilidade.

Pretende-se publicar mais um artigo com a descrição da modelagem e aplicação, ao qual será enviado para a revista *International Journal of Hydrogen Energy*.

REFERÊNCIAS

- AARDAHL, C. L.; RASSAT, S. D. Overview of systems considerations for on-board chemical hydrogen storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 16, p. 6676-6683, 2009.
- ABDIN, Z.; WEBB, C. J.; GRAY, E. M. Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1791-1808, 2015.
- ABU-QUDAIS, M.; HADDAD, O.; QUDAISAT, M. The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions. **Energy conversion and management**, v. 41, n. 4, p. 389-399, 2000.
- ACAR, C.; DINCER, I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 1, p. 1-12, 2014.
- ACAR, C.; DINCER, I. Impact assessment and efficiency evaluation of hydrogen production methods. **International Journal of Energy Research**, v. 39, n. 13, p. 1757-1768, 2015.
- ALAZEMI, J; ANDREWS, J. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 48, p. 483-499, 2015.
- AIGINGER, K.; BÄRENTHALER-SIEBER, S.; VOGEL, J. **Competitiveness under new perspectives**. Manuscript. Welfare, Wealth and Work—a New Growth Path for Europe, 2013.
- AMIT, R.; SCHOEMAKER, P. J. H. Strategic assets and organizational rent. **Strategic Management Journal**, v. 14, n. 1, p. 33-46, 1993.
- ANANTHACHAR, V.; DUFFY, J. J. Efficiencies of hydrogen storage systems onboard fuel cell vehicles. **Solar Energy**, v. 78, n. 5, p. 687-694, 2005.
- ANANDARAJAH, G.; MCDOWALL, W.; EKINS, P. Decarbonising road transport with hydrogen and electricity: Long term global technology learning scenarios. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 8, p. 3419-3432, 2013.
- ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico**. 10. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2010.
- ANFAVEA. **Produção, vendas e exportação de autoveículos**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2016.html>> Acesso: 20 fev. 2017.
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustíveis. **Boletim abastecimento em números, nº 53**. 2016. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/boletins-anp/2394-boletim-abastecimento-em-numeros>> Acesso em: 19 fev. 2017.

APAK, Sudi; ATAY, Erhan; TUNCER, Güngör. Renewable hydrogen energy regulations, codes and standards: Challenges faced by an EU candidate country. **International Journal Of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 7, p. 5481-5497, 2012.

BALL, M.; WEEDA, M. The hydrogen economy—vision or reality?. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 25, p. 7903-7919, 2015.

BALAT, M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 15, p. 4013-4029, 2008.

BASTOS-NETO, M. et al. Assessment of hydrogen storage by physisorption in porous materials. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 8, p. 8294-8303, 2012.

BARTOLOZZI, I.; RIZZI, F.; FREY, M. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: a case study in Tuscany, Italy. **Applied energy**, v. 101, p. 103-111, 2013.

BARTZ, T.; SILUK, J. C. M.; BARTH, L. E. Importance of industrial performance measurement in industry: a case study. **Rebrae. Revista Brasileira de Estratégia**, v. 4, n. 1, p. 91-104, 2011.

BHANDARI, R.; TRUDEWIND, C. A.; ZAPP, P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis—a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 151-163, 2014.

BHUIYA, Md M. H.; KUMAR, A.; KIM, K. J. Metal hydrides in engineering systems, processes, and devices: a review of non-storage applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 5, p. 2231-2247, 2015.

BOCKRIS, J. O.' M. The hydrogen economy: Its history. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 6, p. 2579-2588, 2013.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. Tradução da 7ª edição americana. São Paulo: Ed. Blucher, 2009.

BORTOLUZZI, S. C.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Avaliação de desempenho multicritério como apoio à gestão de empresas: aplicação em uma empresa de serviços. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 3, p. 633-650, 2011.

BOUDRIES, R. Comparative economic competitiveness assessment of hydrogen as a fuel in the transport sector in Algeria. **Chem Eng Trans**, v. 42, p. 61-66, 2014.

BOUDRIES, R. Hydrogen as a fuel in the transport sector in Algeria. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 27, p. 15215-15223, 2014.

BRAGA, L. B. et al. Hydrogen Production Processes. In: SILVEIRA, J. L. (Editor). **Sustainable Hydrogen Production Processes**. Springer International Publishing, 2017. p. 5-76.

BROWN, D. R. US and World Hydrogen Production -2014. **CryoGas International**, março de 2016.

BUCKLEY, P. J.; PASS, C. L.; PRESCOTT, K. Measures of international competitiveness: A critical survey. **Journal of Marketing Management**, v. 4, n. 2, p. 175-200, 1988.

BUTTNER, W. et al. Hydrogen monitoring requirements in the global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 11, p. 7664-7671, 2017.

CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP. **Stations map**. Califórnia, 2016. Disponível em: <<http://cafcp.org/stationmap>>. Acesso em: 08 dez. 2016.

CAPROS, P. et al. **EU Reference Scenario 2016-Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050**. 2016.

CATTELAN, V. D. **Modelagem para mensuração de desempenho competitivo das empresas do setor vitivinícola na região Sul do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)- Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. de. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, v. 25, n. 2, p. 279-296, 2005.

CEVIZ, M. A. et al. Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variations in a lean-burn SI engine fueled by gasoline–hydrogen blends. **Applied Thermal Engineering**, v. 36, p. 314-324, 2012.

CETINKAYA, E.; DINCER, I.; NATERER, G. F. Life cycle assessment of various hydrogen production methods. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 3, p. 2071-2080, 2012.

CHIAVENATO, I. **Introdução à teoria geral da administração: uma visão abrangente da moderna administração das organizações**. Rio de Janeiro: Elsevier Campus, 2004.

CHIAVENATO, I. **Administração: Teoria, Processo e Prática**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2007.

CHO, K. T. Multicriteria decision methods: an attempt to evaluate and unify. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 37, n. 9-10, p. 1099-1119, 2003.

CHRISTOPHER, K.; DIMITRIOS, R. A review on exergy comparison of hydrogen production methods from renewable energy sources. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 5, p. 6640-6651, 2012.

CIPRIANI, G. et al. Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 16, p. 8482-8494, 2014.

COUTINHO, L. G.; FERRAZ, J. C. **Estudo da competitividade da indústria brasileira**. Campinas, São Paulo: Papyrus, 1994.

DAS, H. S.; TAN, C. W.; YATIM, A. H. M. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 268-291, 2017.

DAVIS, S. C. et al. **2015 Vehicle Technologies Market Report**. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2016. Disponível em: <<https://www.osti.gov/scitech/biblio/1255689> > Acesso em: 11 fev. 2017.

DE CONTO, E. **O emprego de um sistema de mensuração de desempenho empresarial como instrumento de apoio ao controle gerencial de uma indústria metalúrgica**. Dissertação (Mestrado em Administração)- Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2001.

DE MIRANDA, P. E. V. et al. Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2017.

DE PAIVA, R. V. C. **Competitividade, estratégia e desempenho financeiro: Um estudo das instituições privadas de educação superior brasileiras**. Tese (Doutorado Administração)- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

DINCER, I. Green methods for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 2, p. 1954-1971, 2012.

DINCER, I.; ACAR, C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 34, p. 11094-11111, 2015.

DINCER, I.; ZAMFIRESCU, C. Sustainable hydrogen production options and the role of IAHE. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 21, p. 16266-16286, 2012.

DE SOUZA CAMPOS, L. M.; DE MELO, D. A. Indicadores de desempenho dos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA): uma pesquisa teórica. **Production**, v. 18, n. 3, p. 540-555, 2008.

DE SOUZA MELO, A.; SAMPAIOB, Y. de S. B. Impactos dos preços da gasolina e do etanol sobre a demanda de etanol no Brasil. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 18, n. 1, p. 56-83, 2014.

DE SHAZO, J. R. Improving Incentives for Clean Vehicle Purchases in the United States: Challenges and Opportunities. **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 10, n. 1, p. 149-165, 2016.

DEWANGAN, V.; GODSE, M. Towards a holistic enterprise innovation performance measurement system. **Technovation**, v. 34, n. 9, p. 536-545, 2014.

DOE. **Hydrogen and Fuel Cells Program**. Disponível em: <[www.eere.energy.gov/hydrogenand/fuel cells](http://www.eere.energy.gov/hydrogenand/fuel%20cells)>. Acesso em: 10 dez. 2016.

_____. **Alternative fueling station locator**. Disponível em: <http://www.afdc.energy.gov/locator/stations/results?utf8=%E2%9C%93&location=&fuel=HY&private=false&planned=false&owner=all&payment=all&radius=false&radius_miles=5>. Acesso em: 18 jan. 2017.

_____. **Maps and Data- U. S. Transit buses by fuel type**. Disponível em : <<http://www.afdc.energy.gov/data/10302>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

_____. **Search federal and state laws and incentives**. Alternative Fuels Data Center. Estados Unidos, 2016. Disponível em: <<http://www.afdc.energy.gov/>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

DOUMPOS, M.; GRIGOROUDIS, E. **Multicriteria decision aid and artificial intelligence: links, theory and applications**. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2013. 368p.

DUFOUR, J. et al. Life cycle assessment of alternatives for hydrogen production from renewable and fossil sources. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 2, p. 1173-1183, 2012.

DURBIN, D. J.; MALARDIER-JUGROOT, C. Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 34, p. 14595-14617, 2013.

DUTTA, S. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 1148-1156, 2014.

ELGOWAINY, A. et al. Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 35, p. 20197-20206, 2014.

ELSEMARY, I. M. M. et al. Experimental investigation on performance of single cylinder spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline mixture. **Applied Thermal Engineering**, v. 106, p. 850-854, 2016.

ENSSLIN, L. et al. Construção de um Modelo Multicritério para Apoiar a Seleção de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento da CELESC. 2007. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/citene12007/pdf/it60.pdf>> Acesso em: 22 jun. 2017.

ENKE, W. et al. The Bi-fuel V12 Engine of the new BMW Hydrogen 7. **MTZ worldwide**, v. 68, n. 6, p. 6-9, 2007.

ESKELINEN, P.; MIETTINEN, K. Trade-off analysis approach for interactive nonlinear multiobjective optimization. **OR spectrum**, v. 34, n. 4, p. 803-816, 2012.

EUDY, L.; POST, M.; JEFFERS, M. **Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2016**. National Renewable Energy Laboratory: 2016. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67097.pdf>> Acesso em: 27 fev. 2017.

EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY-EAFO. **Hydrogen Filling stations**. Disponível em: <<http://www.eafo.eu/infrastructurestatistics/hydrogen-filling-stations>>. Acesso em: 06 dez. 2016.

_____. **Passenger cars FCEV**. Disponível em: <<http://www.eafo.eu/vehicle-statistics/fcev>> Acesso em: 18 jan. 2017.

_____. **Incentivos e legislação**. Disponível em: <<http://www.eafo.eu/content/norway>> Acesso: 02 fev. 2017.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Final Energy consumption by mode of transport**. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-final-energy-consumption-by-mode/assessment-6>>. Acesso em: 02 mar. 2017.

_____. **Towards clean and smart mobility: Transport and environment in Europe**. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/signals-2016>> Acesso em: 02 mar. 2017.

FARRELL, A. E.; KEITH, D. W.; CORBETT, J. J. A strategy for introducing hydrogen into transportation. **Energy Policy**, v. 31, n. 13, p. 1357-1367, 2003.

FAYAZ, H. et al. An overview of hydrogen as a vehicle fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5511-5528, 2012.

FERNANDES, B. Á. O. F. **Análise dos fatores de competitividade que influenciaram a migração de valor entre as empresas Nokia e Apple no período de 2007 a 2012**. Dissertação (Mestrado Administração)-Universidade Municipal de São Caetano do Sul, São Caetano do Sul, 2014.

FEKETE, J. R.; SOWARDS, J. W.; AMARO, R. L. Economic impact of applying high strength steels in hydrogen gas pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 33, p. 10547-10558, 2015.

FIGUEIREDO, M. A. D. et al. Definição de atributos desejáveis para auxiliar a auto-avaliação dos novos sistemas de medição de desempenho organizacional. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 2, p. 305-315, 2005.

FILHO, N. C.; MINUZZI, J.; DOS SANTOS, P. C. F. Competitividade sistêmica de distritos industriais no desenvolvimento regional: uma comparação. **Revista da FAE**, v. 9, n. 2, 2006.

GALINARI, R. et al. A competitividade da indústria de móveis do Brasil: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, n. 37, mar. 2013, p. 227-272, 2013.

GHAZAL, O. H. Performance and combustion characteristic of CI engine fueled with hydrogen enriched diesel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 35, p. 15469-15476, 2013.

GOMES, C.F.; GOMES, L.F.A.M. **Tomada de decisão gerencial: Enfoque Multicritério**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2014.

GOWTHAMAN, S.; SATHIYAGNANAM, A. P. Effects of charge temperature and fuel injection pressure on HCCI engine. **Alexandria Engineering Journal**, v. 55, n. 1, p. 119-125, 2016.

GREEN CAR CONGRESS. **Hamburg putting its first Citaro FuelCELL Hybrid buses into service**. Disponível em: <<http://www.greencarcongress.com/2011/08/hamburg-putting-its-first-citaro-fuelcell-hybrid-buses-into-service-hamburger-hochbahn-ag-has-acquired-four-mercedes-benz.html>> Acesso em: 25 fev. 2017.

GREENWOOD, J. B. et al. Experimental results of hydrogen enrichment of ethanol in an ultra-lean internal combustion engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 24, p. 12980-12990, 2014.

GRESSLER, L. A. **Introdução a Pesquisa: Projetos e relatórios**. 2. Ed. São Paulo: Layola, 2004.

GUPTA, M.; MOHANTY, B. K. Attribute Partitioning in Multiple Attribute Decision Making Problems for a Decision with a Purpose—a Fuzzy Approach. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 23, n. 3-4, p. 160-170, 2016.

GUANDALINI, G.; CAMPANARI, S.; VALENTI, G. Comparative assessment and safety issues in state-of-the-art hydrogen production technologies. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 42, p. 18901-18920, 2016.

H₂ STATIONS. **Hydrogen filling stations worldwide**. Disponível em: <<http://www.netinform.net/H2/H2Stations/Default.aspx>>. Acesso: 07 fev. 2017.

HADDADI, F.; YAGHOUBI, T. Key indicators for organizational performance measurement. **Management Science Letters**, v. 4, n. 9, p. 2021-2030, 2014.

HAIRUDDIN, A. A.; YUSAF, T.; WANDEL, A. P. A review of hydrogen and natural gas addition in diesel HCCI engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 739-761, 2014.

HAJJAJI, N. et al. Comparative life cycle assessment of eight alternatives for hydrogen production from renewable and fossil feedstock. **Journal of Cleaner Production**, v. 44, p. 177-189, 2013.

HAMDAN, Mohammad O. et al. Hydrogen supplement co-combustion with diesel in compression ignition engine. **Renewable Energy**, v. 82, p. 54-60, 2015.

HAN, W. et al. Demonstrations and marketing strategies of hydrogen fuel cell vehicles in China. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 25, p. 13859-13872, 2014.

HARDMAN, S.; SHIU, E.; STEINBERGER-WILCKENS, R. Changing the fate of Fuel Cell Vehicles: Can lessons be learnt from Tesla Motors?. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 4, p. 1625-1638, 2015.

HORDESKI, M F. **Hydrogen & Fuel Cells: Advances in Transportation and Power**. The Fairmont Press, Inc., 2009.

HOSSEINI S. E.; WAHID M. A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v.57, p. 850–866, 2016.

HUA, Thanh et al. Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide. **Journal of Power Sources**, v. 269, p. 975-993, 2014.

HYDE, D.; FAST, M. **Southern Nevada Alternative Fuels Demonstration Project**. City of Las Vegas, Las Vegas, NV; Ford Motor Company, Dearborn, MI, 2009. Disponível em: < <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1000080/>> Acesso: 07 fev. 2017.

HYDROGEN ANALYSIS RESOURCE CENTER. **Hydrogen data book**. Disponível em: < <http://hydrogen.pnl.gov/hydrogen-data/hydrogen-production>>. Acesso em: 27 abr. 2017.

HYUNDAI. **Tucson Fuel Cell**. Disponível em: <<https://www.hyundaiusa.com/tucsonfuelcell/index.aspx>>. Acesso em: 14 fev. 2017.

HWANG, H. T.; VARMA, A. Hydrogen storage for fuel cell vehicles. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 5, p. 42-48, 2014.

HWANG, J.-J. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 220-229, 2013.

INTERNATIONAL FUEL CELL BUS COLLABORATIVE. Hamburgo Fuel CELL Hybrid. Disponível em:< <http://gofuelcellbus.com/index.php/project/hamburg-fuelcell-hybrid>> Acesso em: 15 fev. 2017

JORGENSEN, S. W. Hydrogen storage tanks for vehicles: Recent progress and current status. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 15, n. 2, p. 39-43, 2011.

JI, C.; WANG, S.; ZHANG, B. Performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine under various operating conditions. **Applied energy**, v. 97, p. 584-589, 2012.

JÚNIOR, A. S. **Metodologia multicritério para avaliar as condições de operação do transporte de carga por cabotagem no Brasil, sob a ótica dos armadores.** Tese (Doutorado em Transportes)- Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

KARLEUŠA, B.; DRAGIČEVIĆ, N.; DELUKA-TIBLJAŠ, A. Review of multicriteria-analysis methods application in decision making about transport infrastructure. **Građevinar**, v. 65, n. 7, 619-631, 2013.

KHALIQ, A. et al. Energetic and exergetic analyses of a hydrogen-fuelled HCCI engine for environmentally benign operation. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 33, n. 2, p. 367-385, 2014.

KIM, Y. S.; LEE, K.. Fuel Cell Membrane Characterizations. **Polymer Reviews**, v. 55, n. 2, p. 330-370, 2015.

KIRUBAKARAN, A.; JAIN, S.; NEMA, R. K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2430-2440, 2009.

LANDUCCI, G.; TUGNOLI, A.; COZZANI, V. Safety assessment of envisaged systems for automotive hydrogen supply and utilization. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 3, p. 1493-1505, 2010.

LEBAS, M. J. Performance measurement and performance management. **International Journal of Production Economics**, v. 41, n. 1-3, p. 23-35, 1995.

LEE, S. K. et al. Prioritizing the weights of hydrogen energy technologies in the sector of the hydrogen economy by using a fuzzy AHP approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 2, p. 1897-1902, 2011.

LEY, M. B. et al. Complex hydrides for hydrogen storage–new perspectives. **Materials Today**, v. 17, n. 3, p. 122-128, 2014.

LØKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 7, p. 1584-1595, 2007.

LOVATEL, E. **Fatores empresariais determinantes da competitividade da indústria de vinhos finos da serra gaúcha.** Dissertação (Mestrado em Administração)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LU, Z.; XU, Q. Recent progress in boron-and nitrogen-based chemical hydrogen storage. **Functional Materials Letters**, v. 5, n. 01, p. 1230001, 2012.

MANIATOPOULOS, P.; ANDREWS, J.; SHABANI, B. Towards a sustainable strategy for road transportation in Australia: The potential contribution of hydrogen. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 24-34, 2015.

MATTOS, J. F.; BELTRAND, M. de; BERTÉ, R. S. **Cooperar para competir: o novo desafio da competitividade.** Porto Alegre: MBC/SEBRAE, 2002.

MAZLOOMI, K.; GOMES, C. Hydrogen as an energy carrier: prospects and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3024-3033, 2012.

MCFETRIDGE, D. **Competitiveness Concepts and Measures**. Gouvernement du Canada-Industry Canada, 1995. Disponível em: <[https://www.ic.gc.ca/eic/site/eas-aes.nsf/vwapj/op05e.pdf/\\$file/op05e.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/eas-aes.nsf/vwapj/op05e.pdf/$file/op05e.pdf)>. Acesso em: 12 fev. 2017.

MCWHORTER, S. et al. Moderate temperature dense phase hydrogen storage materials within the US department of energy (DOE) H₂ storage program: Trends toward future development. **Crystals**, v. 2, n. 2, p. 413-445, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Projeto ônibus Brasileiro a Hidrogênio**. 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/onibus_hidrogenio>. Acesso em: 07 fev. 2017.

MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY. **Compilation of the Revised Version of the Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells**. 2016. Disponível em: <http://www.meti.go.jp/english/press/2016/0322_05.html>. Acesso em: 09 fev. 2016.

MORAIS, A. M. et al. Hydrogen impacts on performance and CO₂ emissions from a diesel power generator. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 16, p. 6857-6864, 2013.

MORAES, E. A. de. **Inovação e competitividade: uma proposta de redefinição da importância e escopo da inovação no modelo de estratégia competitividade baseado em competências cumulativas**. Dissertação (Mestrado em Administração)-Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2003.

MOUSSA, G. et al. Boron-based hydrides for chemical hydrogen storage. **International Journal of Energy Research**, v. 37, n. 8, p. 825-842, 2013.

MOURY, R.; DEMIRCI, U. B. Hydrazine borane and hydrazinidoboranes as chemical hydrogen storage materials. **Energies**, v. 8, n. 4, p. 3118-3141, 2015.

MÜLLER, C. et al. **Hydrogen Safety: New challenges based on BMW Hydrogen 7**. In: Proceedings of the Second International Conference on Hydrogen Safety. 2007. p. 11-13.

MURESAN, M.; CORMOS, C. C.; AGACHI, P. S. Comparative life cycle analysis for gasification-based hydrogen production systems. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 6, n. 1, p. 013131, 2014.

MURPHY, G. B.; TRAILER, J. W.; HILL, R. C. Measuring performance in entrepreneurship research. **Journal of business research**, v. 36, n. 1, p. 15-23, 1996.

NAJJAR, Y. SH. Hydrogen safety: The road toward green technology. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 25, p. 10716-10728, 2013.

NAVIGANT RESEARCH. **Advanced energy now 2016 market report: Global and U.S.** Markets by Revenue 2011-2015 and Key Trends in Advanced Energy Growth. Advanced Energy Economy. Washington DC, San Francisco, Boston, 2016. Disponível em: <<http://info.aee.net/aen-2016-market-report>>. Acesso em: 07 fev. 2017.

NIAZ, S.; MANZOOR, T.; PANDITH, A. H. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 457-469, 2015.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. A comparative overview of hydrogen production processes. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 67, p. 597-611, 2017.

NEWBERT, S. L. Value, rareness, competitive advantage, and performance: a conceptual-level empirical investigation of the resource-based view of the firm. **Strategic Management Journal**, v. 29, n. 7, p. 745-768, 2008.

NEUENFELDT JÚNIOR, A. L. **Modelagem para a mensuração de desempenho dos sistemas BRT no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

OGDEN, Joan M. Prospects for building a hydrogen energy infrastructure. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 24, n. 1, p. 227-279, 1999.

OZBILEN, A.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 42, p. 1-9, 2013.

OZBILEN, A.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. Exergetic life cycle assessment of a hydrogen production process. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 7, p. 5665-5675, 2012.

PARANHOS, L. R. L.; RODOLPHO, P. J. **Metodologia de pesquisa aplicada a tecnologia**. São Paulo: Senai-SP, 2014.

PARMENTER, D. **Key Performance Indicators (KPI): Developing, Implementing, and Using Winning KPIs**. 2. ed. Wiley: Hoboken, 2010.

PARK, C. et al. The influence of hydrogen-enriched gas on the performance of lean NOx trap catalyst for a light-duty diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 4, p. 1789-1796, 2010.

PATNAIK, Pradyot. **A comprehensive guide to the hazardous properties of chemical substances**. John Wiley & Sons, 2007.

PIQUE, S. et al. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 11, p. 7429-7439, 2017.

PRADANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PRADO, F. L. do. **Metodologia de projetos**. São Paulo: Saraiva, 2011.

PREUSTER, P.; ALEKSEEV, A.; WASSERSCHIED, P. Hydrogen Storage Technologies for Future Energy Systems. **Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, v. 8, n. 1, 2017.

PRINCE-RICHARD, S.; WHALE, M.; DJILALI, N. A techno-economic analysis of decentralized electrolytic hydrogen production for fuel cell vehicles. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 30, n. 11, p. 1159-1179, 2005.

PORTER, M. E.; STERN, S. National innovative capacity. **The global competitiveness report**, v. 2002, p. 102-118, 2001.

PORTER, M. E.; VAN DER LINDE, C. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. **The journal of Economic Perspectives**, v. 9, n. 4, p. 97-118, 1995.

PUDUKUDY, M. et al. Renewable hydrogen economy in Asia—Opportunities and challenges: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 743-757, 2014.

PUKAZHSELVAN, D.; KUMAR, V.; SINGH, S. K. High capacity hydrogen storage: basic aspects, new developments and milestones. **Nano Energy**, v. 1, n. 4, p. 566-589, 2012.

QIN, C. et al. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Reversal: A Review. **Catalysts**, v. 6, n. 12, p. 197, 2016.

REDDI, K. et al. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2017.

REITENBACH, V. et al. Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 11, p. 6927-6937, 2015.

ROES, A. L.; PATEL, M. K. Ex-ante environmental assessments of novel technologies—Improved caprolactam catalysis and hydrogen storage. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 14, p. 1659-1667, 2011.

ROSA, C. B. **Modelagem para a mensuração da competitividade na geração de energia fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

ROSEN, M. A.; DINCER, I.; KANOGLU, M. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. **Energy policy**, v. 36, n. 1, p. 128-137, 2008.

SADEGHZADEH, K; SALEHI, M. B. Mathematical analysis of fuel cell strategic technologies development solutions in the automotive industry by the TOPSIS multi-criteria decision making method. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 20, p. 13272-13280, 2011.

SALA-I-MARTIN, X. et al. The Global Competitiveness Index 2014–2015: accelerating a robust recovery to create productive jobs and support inclusive growth. **The Global Competitiveness Report**, v. 2015, p. 3-52, 2014.

SALVI, B. L.; SUBRAMANIAN, K. A. Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 1132-1155, 2015.

SALVI, B. L.; SUBRAMANIAN, K. A.; PANWAR, N. L. Alternative fuels for transportation vehicles: a technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 404-419, 2013.

SAN MARCHI, C. et al. Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program, part 3: Advances in research and development to enhance the scientific basis for hydrogen regulations, codes and standards. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 11, p. 7263-7274, 2017.

SANTOS, J. A.; PARRA FILHO, D. **Metodologia científica**. 2. Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

SANTOS, A. M. **Avaliação da competitividade em empresas de base tecnológica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

SARAVANAN, N.; NAGARAJAN, G. An experimental investigation on hydrogen fuel injection in intake port and manifold with different EGR rates. **Energy Environ**, v. 1, p. 221-248, 2010.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International journal of services sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process**. Springer Science & Business Media, 2012.

SHARMA, S.; GHOSHAL, S. K. Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1151-1158, 2015.

SHARAF, O. Z.; ORHAN, M. F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 810-853, 2014.

SHARMA, T; RAO GAP, K.; MURTH, K. M. Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines: **A Review. archives of computational Methods in Engineering** 2015; 1-35.

SEMELSBERGER, T. A.; BROOKS, K. P. Chemical hydrogen storage material property guidelines for automotive applications. **Journal of Power Sources**, v. 279, p. 593-609, 2015.

SHIVAPRASAD, K. V. et al. Experimental investigation of the effect of hydrogen addition on combustion performance and emissions characteristics of a spark ignition high speed gasoline engine. **Procedia Technology**, v. 14, p. 141-148, 2014.

SINGH, L.; WAHID, Z. A. Methods for enhancing bio-hydrogen production from biological process: a review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, p. 70-80, 2015.

SINGH, S. et al. Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 623-633, 2015.

SOLIMAN, M. **Avaliação da competitividade em indústrias de transformação de plástico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SULEMAN, F.; DINCER, I.; AGELIN-CHAAB, M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 21, p. 6976-6987, 2015.

SULEMAN, F.; DINCER, I.; AGELIN-CHAAB, M. Comparative impact assessment study of various hydrogen production methods in terms of emissions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 19, p. 8364-8375, 2016.

SZWAJA, S.; GRAB-ROGALINSKI, K. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 10, p. 4413-4421, 2009.

TAHA, R. A.; DAIM, T. Multi-criteria applications in renewable energy analysis, a literature review. **Research and Technology Management in the Electricity Industry. Springer London**, p. 17-30, 2013.

TAN, Y.; YU, X. Chemical regeneration of hydrogen storage materials. **RSC Advances**, v. 3, n. 46, p. 23879-23894, 2013.

TANG, C.; ZHANG, Y.; HUANG, Z. Progress in combustion investigations of hydrogen enriched hydrocarbons. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 195-216, 2014.

THOENNES, M.; BUSSE, A.; ECKSTEIN, L. Forecast of Performance Parameters of Automotive Fuel Cell Systems–Delphi Study Results. **Fuel Cells**, v. 14, n. 6, p. 781-791, 2014.

TOYOTA. Toyota to start sales of fuel cell buses from early 2017. 2016. Disponível em: <<http://www.toyota.com.au/news/toyota-to-start-sales-of-fuel-cell-buses-from-early-2017>>. Acesso em: 09 fev. 2017.

TRIANANTAPHYLLOU, E.; MANN, S. H. Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges. **International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice**, v. 2, n. 1, p. 35-44, 1995.

TZENG, G-H.; LIN, C.-W.; OPRICOVIC, S.. Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. **Energy Policy**, v. 33, n. 11, p. 1373-1383, 2005.

UDDIN, M. N.; DAUD, W. W. Technological diversity and economics: coupling effects on hydrogen production from biomass. **Energy & Fuels**, v. 28, n. 7, p. 4300-4320, 2014.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of operational research**, v. 169, n. 1, p. 1-29, 2006.

VELIMIROVIĆ, D.; VELIMIROVIĆ, M.; STANKOVIĆ, R. Role and importance of key performance indicators measurement. **Serbian Journal of Management**, v. 6, n. 1, p. 63-72, 2011.

VENKATARAMANAN, N. S.; KAWAZOE, Y. DFT Perspective of Hydrogen Storage on Porous Materials. arXiv preprint arXiv:1102.0849, 2011.

VERHELST, S.; WALLNER, T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, n. 6, p. 490-527, 2009.

VERHELST, S. Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 2, p. 1071-1085, 2014.

VEZIROGLU, A.; MACARIO, R. Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 1, p. 25-43, 2011.

WANG, C. et al. Recent progress on the key materials and components for proton exchange membrane fuel cells in vehicle applications. **Energies**, v. 9, n. 8, p. 603, 2016.

WANG, J. Barriers of scaling-up fuel cells: cost, durability and reliability. **Energy**, v. 80, p. 509-521, 2015.

WANG, S.; JI, C.; ZHANG, B. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignited ethanol engine at idle and stoichiometric conditions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 17, p. 9205-9213, 2010.

WANG, M. et al. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 573-588, 2014.

WANG, K. et al. A review on solid oxide fuel cell models. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 12, p. 7212-7228, 2011.

WAN, Z. et al. A review on cold start of proton exchange membrane fuel cells. **Energies**, v. 7, n. 5, p. 3179-3203, 2014.

WEEDA, M.; ELGOWAINY, A. Large-Scale Hydrogen Delivery Infrastructure. 2015. Disponível em: <http://ieahia.org/Activities/Task-28/Task-28-report_final_v2_ECN_12_2_v2.aspx>. Acesso em: 15 dez. 2016.

WONG, Y. M.; WU, T. Y.; JUAN, J. C. A review of sustainable hydrogen production using seed sludge via dark fermentation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 471-482, 2014.

WOOD JR, T.; P CALDAS, M. Empresas brasileiras e o desafio da competitividade. **Revista de Administração de Empresas**, v. 47, n. 3, p. 1-13, 2007.

XU, L. et al. Optimal sizing of plug-in fuel cell electric vehicles using models of vehicle performance and system cost. **Applied Energy**, v. 103, p. 477-487, 2013.

YADAV, M.; XU, Q. Liquid-phase chemical hydrogen storage materials. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 12, p. 9698-9725, 2012.

YANG, C.; OGDEN, J. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 2, p. 268-286, 2007.

YILMAZ, F.; BALTA, M. T.; SELBAŞ, R. A review of solar based hydrogen production methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 171-178, 2016.

ZACHARIA, R.; RATHER, S. Review of solid state hydrogen storage methods adopting different kinds of novel materials. **Journal of Nanomaterials**, v. 2015, p. 4, 2015.

ZHANG, Long et al. How can fuel cell vehicles bring a bright future for this dragon? Answer by multi-criteria decision making analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 39, p. 17183-17192, 2016.

ZHANG, Y.-H. et al. Development and Application of Hydrogen Storage. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 22, n. 9, p. 757-770, 2015.

ZHANG, Z.; HU, C. System design and control strategy of the vehicles using hydrogen energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 24, p. 12973-12979, 2014.

ZHU, B.; XU, Z. Analytic hierarchy process-hesitant group decision making. **European Journal of Operational Research**, v. 239, n. 3, p. 794-801, 2014.

ZHU, Q.; XU, Q. Liquid organic and inorganic chemical hydrides for high-capacity hydrogen storage. **Energy & Environmental Science**, v. 8, n. 2, p. 478-512, 2015.

APÊNDICE A- INDICADORES CONSTRUÍDOS PARA A MODELAGEM

This questionnaire aims to collect information to measure the competitiveness in the use of hydrogen as a fuel in the automotive industry. In the research, it is considered the stages of production of hydrogen, storage, including distribution and its application in vehicles. In this questionnaire, you are invited to answer the questions that you have knowledge about. Answer based on the results of your researches, in the public-private (public institutions and/or private companies) scenarios that exist in your region. The questions of multiple choice are divided in five possible options of answers. The first option of choice is about the “MOST COMPETITIVE” scenario (100% competitive), and the last being the scenario with “NO COMPETITIVENESS” (0% competitive). The other options of answer are intermediary.

Name:

Company/institution:

Job Title:

Your region (city and state):

PVF-1-PRODUCTION

Answer according to the results of hydrogen production sites and locations you have experienced, with the structural details and/or issues of your region. It can be done according also with the results of your researches.

A-What is the method of hydrogen production that you have knowledge and is used in your region/country?

B-What is the source of energy that is usually used in the production of hydrogen in your region/country?

C- The production of hydrogen is: () in a centralized plant; () On-site production.

Answer according to the production method given in question A. In the primary energy source according to question B and based on the type of production plant/site, consider question C.

PVF-1-Production		FCS-1-Use renewable energy for H ₂ production
Indicator: 1.1-What is the percentage of renewable energy often used in the production of hydrogen in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	More than 40% of the energy used is renewable.
N2	75	Between 31 and 40% of the energy used is renewable.
N3	50	Between 21 and 30% of the energy used is renewable.
N4	25	Between 11 and 20% of the energy used is renewable.
N5	0	Between 0 and 10% of the energy used is renewable.
Regarding the use of "renewable energy" for hydrogen production, what is the level of importance do you attribute to this factor?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-1-Production		FCS-2-Energetic efficiency
Indicator: 2.1- About the energetic efficiency of the sites of hydrogen production existing in your region, you consider:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very high.
N2	75	High.
N3	50	Moderate.
N4	25	Low.
N5	0	Very low.
What level of importance do you attribute to "energy efficiency" in hydrogen production?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-1-Production		FCS-3-Exergetic efficiency
Indicator: 3.1- About the exergetic efficiency of the hydrogen production sites in your region, you consider:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very high.
N2	75	High.
N3	50	Moderate.
N4	25	Low.
N5	0	Very low.
What level of importance do you attribute to the exergetic efficiency factor in hydrogen production?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-1-Production		FCS-4- Infrastructure capable producing hydrogen
Indicator: 4.1- Is there already an infrastructure capable of producing hydrogen in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Large-scale production, capable of supplying more than 20% of the vehicular matrix of your region.
N2	75	Large scale production, capable of supplying the demand of 10-19% of the total vehicular matrix of your region.
N3	50	Production capable of supplying 2-9% of the total vehicular matrix of the region.
N4	25	Extremely low production, capable of supplying the demand of less than 1% of the vehicular matrix of the region.
N5	0	There is no hydrogen production directed to mobility (vehicles) in the region.
What importance do you attribute to the "infrastructure availability" factor for hydrogen production?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-1-Production		FCS-5- Public policies and regulations
Indicator: 5.1-Are there already public policies and regulations intended to the production of hydrogen in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	There are already attractive state and federal government funding, subsidies, tax exemptions and other incentives for production that are strongly improving the production of hydrogen for mobility purposes.
N2	75	There are government funding (state or federal), subsidies, tax exemptions and other incentives for production.
N3	50	There are unattractive government benefits that are not enough to boost the production of hydrogen for mobility purposes.
N4	25	The government is studying / proposing to create projects with the intent of fomenting and encouraging the production of hydrogen for mobility purposes.
N5	0	There are no government incentives, subsidies, tax exemptions or any other form of benefit for hydrogen production.
How important you consider the "availability of government incentives" for hydrogen production?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-1-Production		FCS-6-Costs
Indicador: 6.1- What is the production cost of hydrogen (disregarding distribution and storage) in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Cheaper or the same price as gasoline.
N2	75	Between 1 and 20% higher than the price of gasoline.
N3	50	Between 21 and 60% higher than the price of gasoline.
N4	25	Between 61 and 110% higher than the price of gasoline.
N5	0	More than 110% higher than the price of gasoline.
What importance do you attribute to the "cost of production hydrogen"?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-1-Production		FCS-6-Costs
Indicator:6.2- The capital cost for building a hydrogen production plant/site in your region is considered:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very low.
N2	75	Low.
N3	50	Moderate.
N4	25	High.
N5	0	Very high.
What level importance do you attribute to the "cost of capital" factor for the implementation of a plant for hydrogen production?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-1-Production		FCS-7- Environmental impacts
Indicator: 7.1- The global warming potential of the hydrogen production plants/sites in your region is:		
Nível	Valor	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very low.
N2	75	Low.
N3	50	Moderate.
N4	25	High.
N5	0	Very high.
What level of importance do you attribute to the "environmental impacts" factor for hydrogen production?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-2-STORAGE

Answer based on the state of the art technology and the results of the researches in your region. It comprises stationary storage and on board the vehicle.

PVF-2-Storage		FCS-8- Gravimetric capacity
Indicator: 8.1- What is the gravimetric capacity of today's compressed-vehicle hydrogen storage systems:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very high.
N2	75	High.
N3	50	Moderate.
N4	25	Low.
N5	0	Very low.
What is the level of importance of the "gravimetric capacity" factor of the compression storage systems?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-2-Storage		FCS-9- Volumetric density
Indicator: 9.1- What is the volumetric density of today's compressed-vehicle hydrogen storage systems in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very high.
N2	75	High.
N3	50	Moderate.
N4	25	Low.
N5	0	Very low.
What is the level of importance of the volumetric density factor of the compression storage systems on-board the vehicle?		
1. () 2.() 3.() 4.() 5.() 6.() 7.() 8.() 9.()		

PVF-2-Storage		FCS- Storage safety
Indicator: 10.1- About the storage safety of hydrogen by compression on board the vehicle, in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	100 % safe.
N2	75	Between 98 and 99% safe.
N3	50	Between 94 and 97% safe.
N4	25	Between 90 and 93% safe.
N5	0	Less than 90% safe.
What level of importance do you attribute to the "storage safety" factor for the compression storage on board the vehicle?		
1. () 2.() 3.() 4.() 5.() 6.() 7.() 8.() 9.()		

PVF-2-Storage		FCS- Storage safety
Indicator: 10.2- About the storage safety of hydrogen by stationary compression in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	100 % safe.
N2	75	Between 98 and 99% safe.
N3	50	Between 94 and 97% safe.
N4	25	Between 90 and 93% safe.
N5	0	Less than 90% safe.
What level of importance do you attribute to "safety" factor for the stationary compression storage?		
1. () 2.() 3.() 4.() 5.() 6.() 7.() 8.() 9.()		

PVF-2-Storage		FCS- Energy efficiency
Indicator: 11.1- About the energy efficiency obtained in the compression storage in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very high.
N2	75	High.
N3	50	Moderate.
N4	25	Low.
N5	0	Very low.
What level of importance do you attribute to the "energy efficiency" factor for the compression storage?		
1. () 2.() 3.() 4.() 5.() 6.() 7.() 8.() 9.()		

PVF-2-Storage		FCS- Costs
Indicator: 12.1- As for the cost of the on-vehicle hydrogen storage system (\$/vehicle) in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very low.
N2	75	Low.
N3	50	Moderate.
N4	25	High.
N5	0	Very high.
What level of importance do you attribute to the "cost" factor for the storage system on board the vehicle?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-2-Storage		FCS-13- Public regulations and policies
Indicator: 13.1- About the availability of public regulations and policies for the storage of hydrogen in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	There are many public regulations and policies, that are strongly improving the storage of hydrogen (100% attractive policies and regulations).
N2	75	There are many public policies and regulations, but they are still not fully sufficient (75% attractive policies and regulations).
N3	50	There are some public policies and regulations (50% attractive policies and regulations).
N4	25	There are minimal public policies and regulations (25% attractive policies and regulations).
N5	0	They do not exist (0% attractive policies and regulations).
What level of importance do you attribute to the "public policy and regulations" factor for hydrogen storage?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-3-DISTRIBUTION

Answer the questions based on the current state of the technology and research results in your region. Considering the transport of the compressed hydrogen in tube trailers and the distribution in filling stations.

PVF-3-Distribution		FCS-14- Availability of filling stations
Indicator: 14.1-Regarding to the availability of infrastructure for supply in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	There are many filling stations (public and private), distributed in various locations, capable of serving more than 10% of the total number of vehicles in the region.
N2	75	There are many filling stations (public and private), distributed in various locations, capable of serving between 1 and 9% of the total vehicles.
N3	50	There are between 1 and 5 filling stations in the region, and many others in planning stage and more stations are being built.
N4	25	There are between 1 and 5 filling stations in the region.
N5	0	There are no hydrogen filling stations in the region.
How important is the factor "availability of supply infrastructure" of hydrogen?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-3-Distribution		FCS-15- Public policies and regulations
Indicator: 15.1-Regarding the availability of public policies and regulations for the hydrogen distribution in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	There are already attractive state and federal government funding, subsidies, tax exemptions and other incentives (100% attractive policies and regulations).
N2	75	There are government funding (state or federal), subsidies, tax exemptions and other incentives (75% attractive policies and regulations).
N3	50	There are unattractive government benefits that are not enough (50% attractive policies and regulations).
N4	25	The government is studying / proposing to create projects with the intent of fomenting and encouraging for the hydrogen distribution (25% attractive policies and regulations).
N5	0	There are no government incentives, subsidies, tax exemptions or any other form of benefit (0% attractive policies and regulations).
What level of importance do you attribute to the "public policy and regulations" factor for the hydrogen distribution?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-3-Distribution		FCS-16- Costs
Indicator:16.1-Regarding the installation cost of a hydrogen filling station in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	The cost is very low.
N2	75	The cost is low.
N3	50	The cost is moderate.
N4	25	The cost is high.
N5	0	The cost is very high.
What is the level of importance of the factor "cost of capital" of a filling station?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-3-Distribution		FCS-16- Costs
Indicator: 16.2-What is the transport cost of compressed hydrogen in tube trailers in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Less than 0,5 \$/kg.
N2	75	Between 0,5 and 1\$/kg.
N3	50	Between 1,1 and 1,5 \$/kg.
N4	25	Between 1,6 and 2\$/kg.
N5	0	More than 2\$/kg.
What is the level of importance of the "hydrogen transport cost" factor in tube trailers?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-3-Distribution		FCS-17- Energy efficiency
Indicator: 17.1- Regarding the energy efficiency of compressed hydrogen transport in tube trailers in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	The efficiency is very high.
N2	75	The efficiency is high.
N3	50	The efficiency is moderate.
N4	25	The efficiency is low.
N5	0	The efficiency is very low.
What is the level of importance of the "energy efficiency" factor for the hydrogen transport in tube trailers?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-3-Distribution		FCS-18- Useful load transported
Indicator: 18.1-What is the useful load of compressed hydrogen usually transported in tube trailers in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	More than 15000kg.
N2	75	Between 10000 and15000 kg.
N3	50	Between 5000 and 9999 kg.
N4	25	Between 500 and 4999kg.
N5	0	Less than 500 kg.
What is the level of importance of the "useful load transported" factor?		
1. () 2.() 3.() 4.() 5.() 6.() 7.() 8.() 9.()		

PVF-3-Distribution		FCS-19- Emissions
Indicator: 19.1- Regarding the global warming potential of the transport of compressed hydrogen in tube trailers in your region (gCO _{2eq} / MJ of hydrogen):		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	It is very low, or nonexistent.
N2	75	It is low.
N3	50	It is moderate.
N4	25	It is high.
N5	0	It is very high.
What is the level of importance of the "global warming potential" factor in hydrogen transport in tube trailers?		
1. () 2.() 3.() 4.() 5.() 6.() 7.() 8.() 9.()		

PVF-4-EMPLOYMENT IN VEHICLES

Fuel cell vehicle

PVF-4- Employment in vehicles		FCS-20- Energy efficiency
Indicator: 20.1-Current energy efficiency (tank to wheels) reached by vehicles powered by fuel cell (%) in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	More than 50%.
N2	75	Between 40 and 49%.
N3	50	Between 30 and 39%.
N4	25	Between 20 and 29%.
N5	0	Less than 20%.
What is the level of importance of the "energy efficiency" factor for the fuel cell vehicle?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS-21- Durability of a fuel cell
Indicator: 21.1-Average durability of a PEM fuel cell (life span in km) of the existing vehicles in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	More than 250000 km.
N2	75	Between 170000 and 249000 km.
N3	50	Between 120000 and 169000 km.
N4	25	Between 80000 and 119000 km.
N5	0	Less than 80000 km.
What is the level of importance of the "fuel cell durability" factor?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles	FCS-22-Public acceptance	
Indicator: 22.1 Public acceptance of the fuel cell vehicles in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	They are fully accepted.
N2	75	They are very accepted.
N3	50	They are moderately accepted.
N4	25	They are little accepted.
N5	0	They are not accepted.
What is the level of importance of the factor "public acceptance" of fuel cell vehicles?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles	FCS-23- Emissions	
Indicator: 23.1-Emissions of the vehicle (tank to wheels) powered by fuel cell (g CO ₂ eq / km) in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very low.
N2	75	Low.
N3	50	Moderate.
N4	25	High.
N5	0	Very high.
What is the level of importance of the "emissions" factor for the fuel cell vehicle?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS-24- Driving range
Indicator: 24.1- What is the driving range of vehicles powered by fuel cell (km) in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Greater than or equal to 600 km.
N2	75	Between 500 and 599 km.
N3	50	Between 400 and 499 km.
N4	25	Between 300 and 399 km.
N5	0	Less than 300 km.
What is the level of importance of the "vehicle autonomy" factor for fuel cell vehicle?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS-25-Public polices and regulations
Indicator: 25.1- Regarding the availability of public policies and regulations for vehicles powered by fuel cell in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very low.
N2	75	Low.
N3	50	Moderate.
N4	25	High.
N5	0	Very high.
What level of importance do you attribute to the "public policy and regulations" factor for fuel cell vehicles?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS-26- Cost
Indicator: 26.1- The maintenance cost of a vehicle powered by fuel cell in your region is:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very low.
N2	75	Low.
N3	50	Moderate.
N4	25	High.
N5	0	Very high.
What level of importance do you attribute to the "maintenance cost" factor for the fuel cell vehicle?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS-26- Cost
Indicator: 26.2-What is the purchasing cost of a fuel cell vehicle in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Lower purchase cost, equal or even up to 9% higher than a conventional vehicle with gasoline internal combustion engine.
N2	75	The cost of purchase is 10 to 30% higher than a conventional vehicle with gasoline-fueled internal combustion engine.
N3	50	The cost of purchase is 31 to 60% higher than a conventional vehicle with gasoline-fueled internal combustion engine.
N4	25	The cost of purchase is 61 to 90% higher than a conventional vehicle with gasoline-fueled internal combustion engine.
N5	0	More than 90% higher than a conventional vehicle with gasoline-fueled internal combustion engine.
What is the level of importance of the fuel cell "vehicle acquisition cost" factor?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

Internal combustion engine vehicle

A- The vehicles that you know of have what type of engine?

() Compression ignition engine; () Spark ignition engine; () HCCI (homogeneous charge compression ignition engine); () Rotary engine.

B- They operate with what proportion of hydrogen? If there is mixing with another fuel, please describe what it is and also the proportions.

Answer the following questions according to your answers to questions A and B.

PVF-4- Employment in vehicles		FCS-27- Energy efficiency
Indicator: 27.1-Efficiency (tank to wheels) usually achieved by vehicles powered by hydrogen-fueled combustion engine (%):		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	More than 50%.
N2	75	Between 40 and 49%.
N3	50	Between 30 and 39%.
N4	25	Between 20 and 29%.
N5	0	Less than 20%.
What is the level of importance of the "energy efficiency" factor?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS- 28-Public acceptance
Indicator: 28.1 - Regarding the public acceptance of vehicles powered by hydrogen-fueled combustion engines, in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	They are fully accepted.
N2	75	They are very accepted.
N3	50	They are moderately accepted.
N4	25	They are little accepted.
N5	0	They are not accepted.
What is the level of importance of the "public acceptance of vehicles" factor?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS- 29-Emissions
Indicator: 29.1-Emissions (tank to wheels) of vehicles with hydrogen-fueled combustion engine (g CO _{2eq} / km):		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Very low.
N2	75	Low.
N3	50	Moderate.
N4	25	High.
N5	0	Very high.
What is the level of importance of the "emissions" factor?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS- 30-Public policies and regulations
Indicator: 30.1- Regarding the availability of public policies and regulations for vehicles powered by hydrogen-fueled combustion engine in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	There are already attractive state and federal government funding, subsidies, tax exemptions and other incentives.
N2	75	There are government funding (state or federal), subsidies, tax exemptions and other incentives.
N3	50	There are unattractive government benefits that are not enough.
N4	25	The government is studying / proposing to create projects with the intent of fomenting and encouraging.
N5	0	There are no government incentives, subsidies, tax exemptions or any other form of benefit.
What level of importance do you attribute to the "public policies and regulations" factor for hydrogen-fueled combustion engine vehicles?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS- 31-Cost
Indicator: 31.1 What is the purchase cost of a vehicle powered by hydrogen-fueled internal combustion engine in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Lower purchase cost, equal or even up to 9% higher than a conventional vehicle with gasoline internal combustion engine.
N2	75	Purchase cost 10-30% higher than a conventional vehicle with gasoline-fueled internal combustion engine.
N3	50	Purchase cost 31-60% higher than a conventional vehicle with gasoline-fueled internal combustion engine.
N4	25	Purchase cost 61-90% higher than a conventional vehicle with gasoline-fueled internal combustion engine.
N5	0	More than 90% higher than a conventional vehicle with gasoline-fueled internal combustion engine.
What level of importance do you attribute to the "cost of acquisition of the vehicle" powered by a hydrogen-fueled combustion engine?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles		FCS- 31-Cost
Indicator:31.2-Regarding the maintenance cost of a vehicle powered by hydrogen-fueled combustion engine in your region:		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	It is very low.
N2	75	It is low.
N3	50	It is moderate.
N4	25	It is high.
N5	0	It is very high.
What level of importance do you attribute to the "vehicle maintenance cost" factor?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		

PVF-4- Employment in vehicles	FCS- 32-Driving range	
Indicator: 32.1-What is the average driving range of a vehicle powered by a hydrogen-fueled combustion engine (km) in your region?		
Level	Value	Description of the level of competitiveness
N1	100	Greater than or equal to 600 km.
N2	75	Between 500 and 599 km.
N3	50	Between 400 and 499 km.
N4	25	Between 300 and 399 km.
N5	0	Less than 300 km.
What is the level of importance of the "vehicle autonomy" factor?		
1. () 2. () 3. () 4. () 5. () 6. () 7. () 8. () 9. ()		