unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

WAGNER PINHO MONTEIRO

Análise econômica da produção e armazenamento de biohidrogênio para uso em células a combustível no transporte coletivo de passageiros

Guaratinguetá - SP
2018

Wagner Pinho Monteiro

Análise econômica da produção e armazenamento de biohidrogênio para uso em células a combustível no transporte coletivo de passageiros

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Co-Orientador: Fernando Henrique M. Araujo

Guaratinguetá - SP
2018

Monteiro, Wagner Pinho
M775a Análise econômica da produção e armazenamento de biohidrogênio para uso em células a combustível no transporte coletivo de passageiros / Wagner Pinho Monteiro – Guaratinguetá, 2017.
84 f : il.
Bibliografia: f. 65-70

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Co-orientador: Fernando Henrique M. Araujo

1. Células à combustível. 2. Etanol. 3. Hidrogênio. I. Título

CDU 662.7

Luciana Máximo
Bibliotecária-CRB-8-3595

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

WAGNER PINHO MONTEIRO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. FERNANDO HENRIQUE M. DE ARAUJO
UNESP-FEG

Prof. Dr. NESTOR PROENZA PÉREZ
UNESP-FEG

Junho 2018

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família que sempre foi o pilar da minha educação, me incentivando e me apoiando em meus projetos de vida.

aos meus orientadores e membros da banca que, durante a realização deste projeto, me apoiaram e instruíram.

à todos os meus irmãos de república e amigos pessoais que contribuíram de certa forma para meu crescimento.

à república Casa do Cai Alho, meu amado lar na cidade de Guaratinguetá.

à FEG-UNESP que, de uma forma geral, me proporcionou muitas oportunidades e aprendizagens ao longo dos anos.

RESUMO

Há muitas gerações o ser humano vem degradando o meio ambiente, causando danos irreversíveis ao planeta e seus habitantes. Um dos grandes causadores dessa deterioração do meio e diminuição da qualidade de vida das pessoas são os gases emitidos na queima de combustíveis fósseis. Esses problemas, juntamente com o fato dos combustíveis fósseis serem encontrados de forma limitada na natureza, fazem com que a utilização de novas fontes energéticas seja de extrema importância no cenário em que vivemos. A implementação de frotas de ônibus para o transporte coletivo urbano operando com biohidrogênio, utilizando energia elétrica proveniente de células a combustível se torna uma opção viável para a mitigação das emissões de poluentes nesse setor. Existem diversos processos possíveis para a produção de hidrogênio, entre os quais podem ser citados os eletrolíticos, fotolíticos e termoquímicos. Nesse trabalho são estudados o processo de produção de hidrogênio pela reforma a vapor do etanol e o processo de armazenamento de hidrogênio por compressão, a altas pressões. O objetivo principal é realizar uma análise econômica do uso de frotas de ônibus urbanos para o transporte coletivo de passageiros, movidos com eletricidade gerada por células a combustível operando com biohidrogênio proveniente da reforma a vapor do etanol, comparando sua implementação com a implementação de uma frota similar, porém dentro dos padrões atuais, que utilizam motores de combustão interna. Verifica-se ao final do trabalho que, infelizmente, a implementação da frota proposta ainda não é uma opção economicamente viável.

PALAVRAS-CHAVE: Reforma a vapor do etanol. Células a combustível. Biohidrogênio. Frotas de ônibus. Análise econômica.

ABSTRACT

For many generations the human being has been degrading the environment, causing irreversible damage to the planet and its inhabitants. One of the greatest factors of the environment deterioration and the decrease of human's quality of life is the gas emitted by the burning of fossil fuels. These problems, together with the fact that fossil fuels are a limited resource in nature, makes the use of renewable sources of energy a subject of extreme importance in the actual scenario in which we live in. The implementation of electric bus fleets for urban collective transport using fuel cells powered by biohydrogen is an interesting option for the mitigation of pollutant emissions in the transportation sector. There are several processes for hydrogen production, among which can be cited the electrolytic, photolytic and thermochemical. In this work the production of hydrogen by ethanol steam reforming and the storage by compression at high pressure are studied. The main objective is to perform an economic analysis of the use of urban bus fleets for the collective transportation of passengers, driven by electricity generated by fuel cells supplied with biohydrogen from the steam reforming of ethanol. A comparative analysis was also carried out between the proposed system and the current fleet, that use internal combustion engines. Unfortunately it is verified that the implementation of the proposed fleet is not economically practicable.

KEYWORDS: Ethanol steam reforming. Fuel cell. Biohydrogen. Bus fleet. Economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Matriz Energética Mundial 10
Figura 2 - Matriz Energética Brasileira 11
Figura 3 - Consumo Energético por Fonte 12
Figura 4 - Ciclo Energético do Hidrogênio 14
Figura 5 - Princípio de Funcionamento de uma Célula a Combustível 21
Figura 6 - Pilha de Células a Combustível 22
Figura 7 - Sistemas Auxiliares de Veículos à MCI 26
Figura 8 - Sistemas Auxiliares de Veículos Elétricos 27
Figura 9 - Sistema Automotivo com Células a Combustível 29
Figura 10 - Instalação de um Sistema Automotivo com Células em Ônibus 30
Figura 11 - Custo da Produção de Hidrogênio por Diversos Processos 35
Figura 12 - Caminhos para a produção de Hidrogênio Renovável 36
Figura 13 - Configuração do Processo de Reforma a Vapor 38
Figura 14 - Protótipo de Reforma a Vapor de Etanol 39
Figura 15 - Processos de Compressão 41
Figura 16 - Compressores Conforme Princípio de Operação 42
Figura 17 - Gráfico para Seleção de Compressores 43
Figura 18 - Custo do Transporte Urbano (sem armazenamento) 47
Figura 19 - Custo de Armazenamento do Biohidrogênio 51
Figura 20 - Custo Total - Fonte Eólica 52
Figura 21 - Custo Total – Fonte Solar 53
Figura 22 - Economia Anual - Fonte Eólica 55
Figura 23 - Economia Anual - Fonte Solar 56
Figura 24 - Composição de Custos - MCI 59
Figura 25 - Composição de Custos - PEMFC 1000 US$/kW Eólica 59
Figura 26 - Composição de Custo - MCI 76
Figura 27 - Composição de Custo - 1000US$/kW Fonte Eólica 76
Figura 28 - Composição de Custo - 1000US$/kW Fonte Solar 77
Figura 29 - Composição de Custo - 3000US$/kW Fonte Eólica 77
Figura 30 - Composição de Custo - 3000US$/kW Fonte Solar 78
Figura 31 - Composição de Custo - 5000US$/kW Fonte Eólica 78
Figura 32 - Composição de Custo - 5000US$/kW Fonte Solar 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fatores a Serem Considerados 13
Tabela 2 - Composição da Frota de São Paulo 15
Tabela 3 - Quilometragem Programada e Consumo 16
Tabela 4 - Inflação Norte Americana Acumulada 17
Tabela 5 - Gastos com Diesel da Frota de Ônibus da Cidade de São Paulo 18
Tabela 6 - Grupos de Células a Combustível 23
Tabela 7 - Sistemas Auxiliares MCI 25
Tabela 8 - PCI de Alguns Combustíveis 33
Tabela 9 - Processos de Compressão 41
Tabela 10 - Custo do Transporte Urbano (sem armazenamento) 46
Tabela 11 - Dados da Estação de Abastecimento 48
Tabela 12 - Custos de Armazenamento 50
Tabela 13 - Composição de Custos - MCI 57
Tabela 14 - Composição de Custos - PEMFC 1000 US$/kW Eólica 58
Tabela 15 - Resultados dos Cálculos de Amortização 66
Tabela 16 - Custos Referentes ao Investimento 66
Tabela 17 - Custos Referentes ao Combustível Consumido 67
Tabela 18 - Custos Referentes à Manutenção da Frota 67
Tabela 19 - Custo de Implementação (Sem Armazenamento) 68
Tabela 20 - Custos Relacionados ao Armazenamento 68
Tabela 21 - Custo Total do Armazenamento 69
Tabela 22 - Custo Total - Fonte Eólica 69
Tabela 23 - Custo Total - Fonte Solar 70
Tabela 24 - Economia Anual Esperada - Fonte Eólica 70
Tabela 25 - Economia Anual Esperada - Fonte Solar 71
Tabela 26 - Composição de Custo - MCI 72
Tabela 27 - Composição de Custo - 1000US$/kW Fonte Eólica 72
Tabela 28 - Composição de Custo - 1000US$/kW Fonte Solar 73
Tabela 29 - Composição de Custo - 3000US$/kW Fonte Eólica 73
Tabela 30 - Composição de Custo - 3000US$/kW Fonte Solar 74
Tabela 31 - Composição de Custo - 5000US$/kW Fonte Eólica 74
Tabela 32 - Composição de Custo - 5000US$/kW Fonte Solar 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC - Alternating Current

AFC - Células Alcalinas

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BCB - Banco Central do Brasil

C2H5OH - Etanol

CH4 - Metano

CMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CO - Monóxido de Carbono

CO2 – Dióxido de Carbono

DC – Direct Current

EMTU - Empresa Metropolitana de Transporte Urbano

FC – Fuel Cell

FINEP - Agencia Financiadora de Pesquisa e Projetos

GOSE - Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos

H2 – Hidrogênio

H2O - Água

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MCFC - Células de Carbonatos Fundidos

MCI – Motor de Combustão Interna

MME – Ministério de Minas e Energia

PAFC - Células de Ácido Fosfórico

PCI - Poder Calorífico Inferior

PEMFC- Célula de Membrana de Troca de Prótons

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PPM - Parte por milhão

SOFC - Células de Óxidos Sólidos

SPTrans - Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes da Cidade de São Paulo

UNESP - Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS **10**

1.2 FROTA DE ÔNIBUS DA CIDADE DE SÃO PAULO **15**

1.3 OBJETIVOS **19**

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO **19**

2 CARACTARÍSTICAS DAS FROTAS DE ÔNIBUS COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL 21

2.1 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL 21

2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS E COM MCI 24

2.3 UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS 28

3 REFORMA A VAPOR DO ETANOL E ARMAZENAMENTO POR COMPRESSÃO DO HIDROGÊNIO 32

3.1 HIDROGÊNIO 32

3.2 REFORMA A VAPOR DO ETANOL 37

3.3 ARMAZENAMENTO POR COMPRESSÃO 40

4 ECONOMIA ANUAL ESPERADA COMPARATIVAMENTE COM FROTA UTILIZANDO MOTORES A DIESEL 44

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DE ÔNIBUS UTILIZANDO PEMFC 44

4.2 CUSTOS COM O ARMAZENAMENTO DO BIOHIDROGÊNIO 47

4.3 CUSTOS TOTAL DA IMPLEMENTAÇÃO 51

4.4 COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO 57

5 CONCLUSÕES 61

REFERÊNCIAS 63

APÊNDICE A – Resultados dos custos de investimento e receita anual 63

APÊNDICE B – Resultados da composição de gastos. 72

1. INTRODUÇÃO

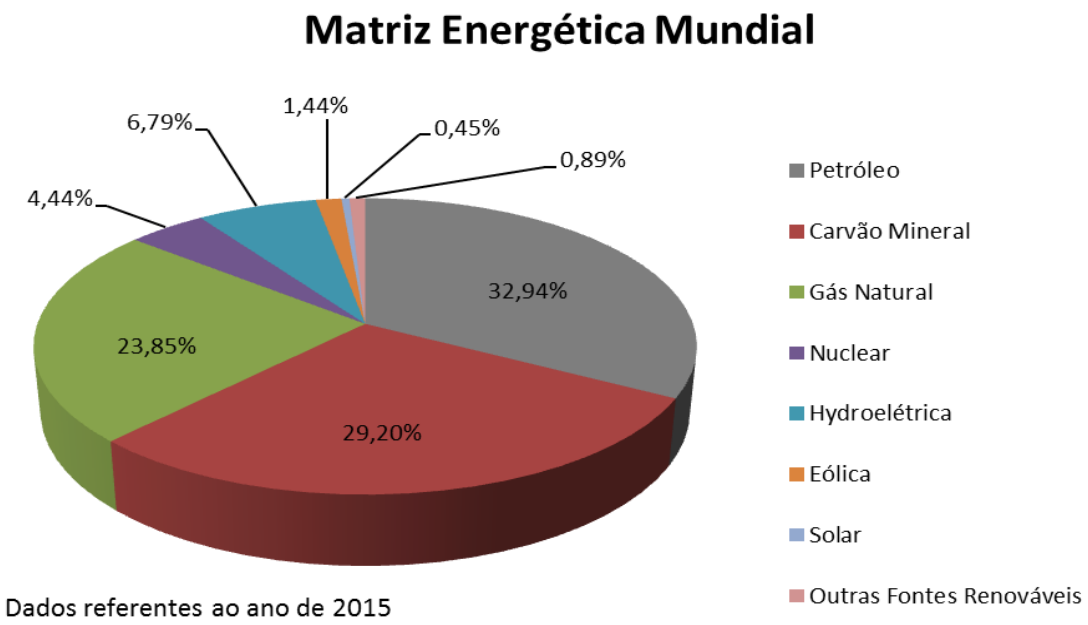
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em busca de melhores condições de sobrevivência, o ser humano tem influenciado no meio ambiente há milhares de anos. Entretanto, segundo o relatório de 2014 da *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), as emissões antropogênicas de gases causadores do efeito estufa nunca foram tão altas quando atualmente e a temperatura da Terra vem crescendo suscetivelmente nas últimas três décadas (IPCC, 2014).

As emissões de dióxido de carbono (CO_2) pela queima de combustíveis fósseis e processos industriais contribuíram com 78% do crescimento da emissão de gases causadores do efeito estufa entre as décadas de 1970 e 2010, sendo que em 2010 foram emitidos aproximadamente $32x10^{12}$ kg de CO_2 (IPCC, 2014). Dessa forma, a busca por novas tecnologias e fontes energéticas com menor impacto ambiental tornou-se uma necessidade para sustentabilidade das futuras gerações.

A matriz energética mundial é composta por 32,94% de petróleo e seus derivados, 29,20% de carvão mineral, 23,85% de gás natural, 4,44% de energia de fonte nuclear, 6,79% de hidroeletricidade, 1,44% de energia eólica, 0,45% de energia solar e 0,89% de outras fontes renováveis, dados que podemos verificar na Figura 1 (World Energy Resources, 2016).

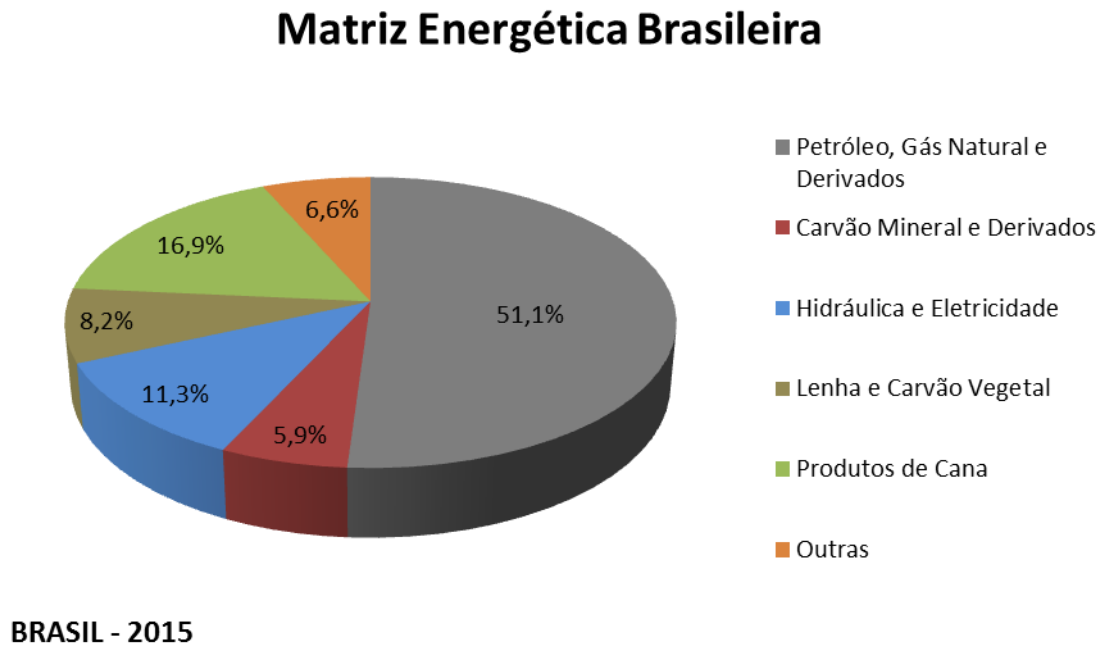
Figura 1- Matriz Energética Mundial



Fonte: World Energy Resources (2016).

Analisando os dados do relatório do Balanço Energético Nacional, Figura 2, a matriz energética brasileira é composta por 51,1% de petróleo, gás natural e derivados, 5,9% de carvão mineral e derivados, 11,3% de hidroeletricidade, 8,2% de lenha e carvão vegetal, 16,9% de produtos de cana-de-açúcar e 6,6% de outras fontes (MME, 2016).

Figura 2 - Matriz Energética Brasileira

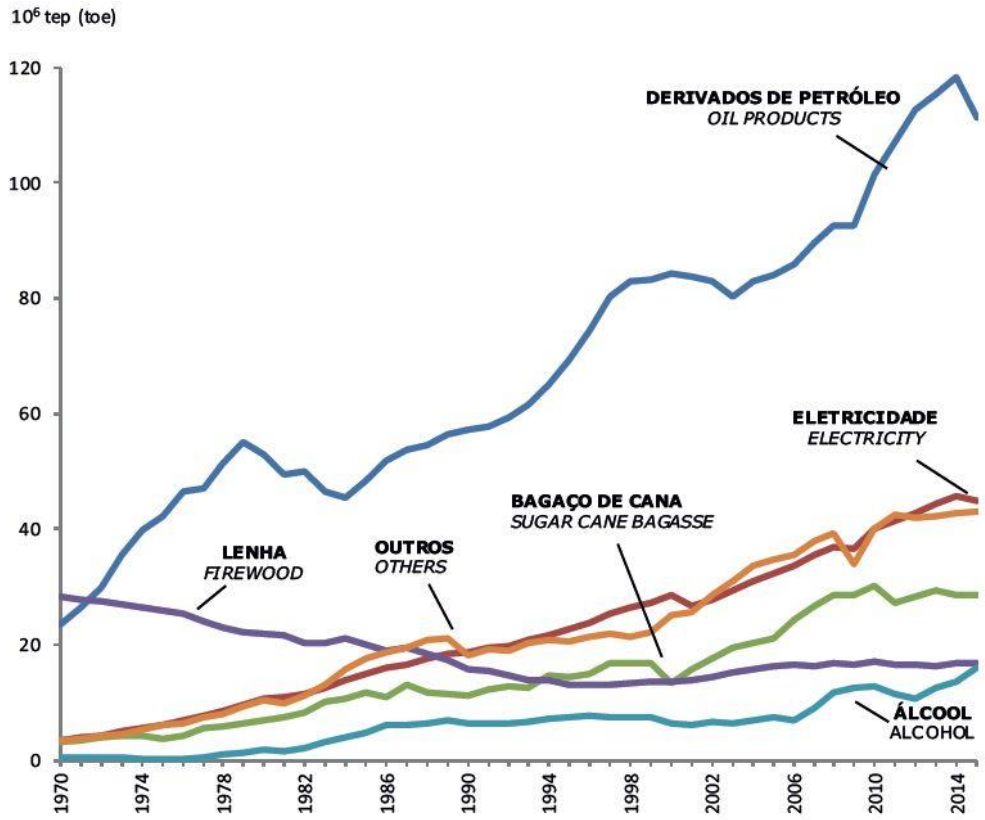


Fonte: MME (2016).

Comparando as matrizes energéticas, é possível observar claramente que a porcentagem de energias renováveis que constituem a matriz energética brasileira é muito mais significativa quando comparada com o resto do mundo. Porém isso não exclui ou minimiza o fato de que existe um significativo consumo de combustíveis fósseis em nosso país. Em 2015 o consumo energético de diesel foi de 558.623,79 GWh (18% da energia total consumida no Brasil), sendo o maior percentual dentre todas as outras fontes de energia (eletricidade 17,2%, gasolina 8,9%, álcool etílico 6,1%) (MME, 2016).

O consumo de derivados de petróleo no Brasil como fonte energética vem crescendo historicamente, atingindo seu ápice em 2014 (1.374.956,75 GWh), como mostrado na Figura 3 (MME, 2016).

Figura 3 - Consumo Energético por Fonte



Fonte: MME (2016).

Em 2015 o setor de transporte consumiu 43.059x10³ m³ de diesel de petróleo (sem incluir Biodiesel). O setor representa 56,7% do consumo de derivados de petróleo do país e teve um consumo final de energia de 977.350,31 GWh (32,2% do total de energia consumida no país), sendo rodoviário 910.245,21 GWh (30,0% do total), ferroviário, aéreo e hidroviário somam 67.116,73 GWh (2,2% do total) (MME, 2016).

Considerando os dados apresentados, o fato que reservas de combustíveis fósseis são limitadas e concentradas em poucas regiões do globo (possibilitando grandes variações de preço), conclui-se que estudos para a viabilização de novas fontes energéticas, menos

agressivas ao meio ambiente, são necessários para garantir a sustentabilidade das próximas gerações, justificando a análise proposta neste trabalho.

Na Tabela 1 são apontados os fatores apresentados pela Empresa Metropolitana de Transporte Urbano (EMTU), que são de extrema relevância para a realização deste trabalho. São destacados diversos fatores econômicos e ambientas que foram considerados para a escolha do tema proposto, e a importância do mesmo.

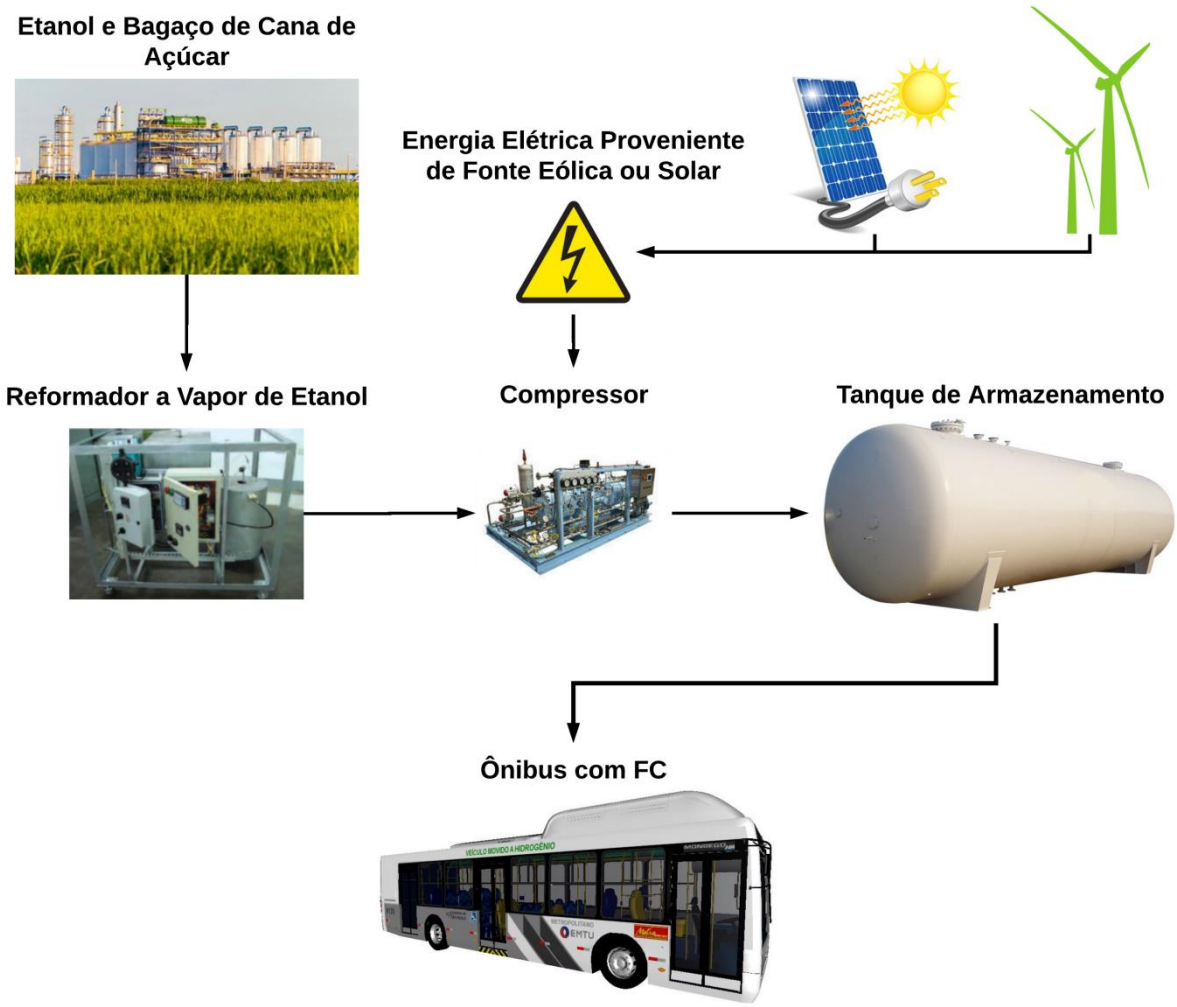
Tabela 1- Fatores a Serem Considerados

Aspectos Econômicos	**Aspectos Ambientais**
Brasil é uma economia emergente	São Paulo tem um dos maiores problemas de poluição a nível mundial
Maior mercado mundial de ônibus	Veículos com motores a combustão interna são responsáveis por 90% das emissões de poluentes na atmosfera
Maior produtor mundial de ônibus (50mil/ano)	A maioria dos ônibus possuem motores a diesel com alta emissão de gases tóxicos e poluentes e materiais particulados
Um dos maiores exportadore mundiais de ônibus	Há várias fontes de energia para a obtenção de hidrogênio no Brasil
Os ônibus possuem papel importante no transporte urbano brasileiro e a frota da Região Metropolitana de São Paulo é a maior do mundo.	O brasil é o líder na redução de gases de efeito estufa devido ao uso de fontes energéticas renováveis, como o etanol.

Fonte: EMTU (2017).

O esquema representado na Figura 4 representa o processo para produção (reforma a vapor do etanol utilizando bagaço de cana com combustível) e armazenamento do hidrogênio (por compressão utilizando energia eólica e solar) que serão apresentados, discutidos e analisado no decorrer deste presente trabalho.

Figura 4 - Ciclo Energético do Hidrogênio



Fonte: Elaboração própria

1.2 FROTA DE ÔNIBUS DA CIDADE DE SÃO PAULO

A cidade de São Paulo é a cidade mais populosa do Brasil, com a população estimada para 2017 de 12.106.920 habitantes (IBGE, 2017). E a quantidade de ônibus que compõe o transporte público da cidade não deixa de ser tão impressionante. A sua frota de ônibus é composta por 14703 veículos, sendo a quantidade máxima programada para operar em horário de pico é de 13741, tendo uma média de 671 passageiros transportados por veículo por dia (SPTrans, 2017).

É apresentado na Tabela 2 a composição da frota de ônibus da cidade de São Paulo.

Tabela 2 - Composição da Frota de São Paulo

Tipo de veículo	Sem Ar Condicionado	Com Ar Condicionado	TOTAL	%
MIDIÔNIBUS	1.400	216	1.616	10,99%
BÁSICO	2.677	295	2.972	20,21%
MINIÔNIBUS	3.382	203	3.585	24,38%
PADRON	815	0	815	5,54%
PADRON 15m	23	0	23	0,16%
PADRON 15m ETANOL	10	0	10	0,07%
PADRON LE	2.439	329	2.768	18,83%
PADRON LE 15m	140	30	170	1,16%
TROLEBUS	201	0	201	1,37%
ARTICULADO	141	0	141	0,96%
ARTICULADO LE	1.169	34	1.203	8,18%
ARTICULADO 23m	505	485	990	6,73%
BIARTICULADO	209	0	209	1,42%
TOTAL	**13.111**	**1.592**	**14.703**	**100%**

Fonte: Detalhamento de Tarifas – SPTrans (2017).

Apenas os veículos dos tipos PADRON 15m ETANOL e TROLEBUS, apresentados na Tabela 2 não são abastecidos com o combustível diesel. Existe uma hegemonia de sistemas a diesel quando se trata do transporte público em São Paulo, e isso fica ainda mais evidente quando verificamos que menos de 2% da frota não utiliza diesel como fonte energética. Tendo a energia elétrica (nos Trólebus) e o etanol uma ínfima participação.

Na Tabela 3 são apresentados os valores programados de quilometragem mensal para cada categoria e o consumo de combustível em litros por quilômetro para cada tipo de veículo que compõe a frota de ônibus da cidade de São Paulo, sendo que para os trólebus a unidade é quilo Watt por hora. Os valores de índice de consumo de combustível foram todos obtidos a partir de valores históricos da SPTrans.

Tabela 3 - Quilometragem Programada e Consumo

Tipo de Veículo	Quilometragem Mensal Programada	Índice de Consumo de Combustível [litro/km]
SEM AR CONDICIONADO		
MICRO E MINIÔNIBUS	19.749.705	0,30
MIDIÔNIBUS	8.215.714	0,40
BÁSICO	16.114.924	0,46
PADRON	19.547.009	0,55
PADRON 15M	1.045.393	0,65
ARTICULADO	6.944.841	0,71
ARTICULADO 23M	2.724.543	0,75
BIARTICULADO	637.007	0,80
TRÓLEBUS	867.659	2,905
COM AR CONDICIONADO		
MICRO E MINIÔNIBUS	1.185.449	0,3510
MIDIÔNIBUS	1.267.567	0,4680
BÁSICO	1.775.832	0,5290
PADRON	2.052.778	0,6325
PADRON 15M	0	0,7475
ARTICULADO	180.248	0,8023
ARTICULADO 23M	2.616.641	0,8475
BIARTICULADO	0	0,9040
TRÓLEBUS	0	3,341
TOTAL	**84.925.310,00**	

Fonte: Detalhamento de Tarifas – SPTrans (2017) - modificado

O preço do Diesel S10 utilizado para os cálculos foi de R$3,001. Esse é o preço médio para as distribuidoras na cidade de São Paulo na semana do dia 05 ao dia 11/11/2017, disponibilizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Os valores monetários utilizados neste trabalho são apresentados em dólar norte americano, possibilitando a comparação dos resultados obtidos os de outros estudos realizados. Valores em Reais foram convertidos usando a cotação do Dólar disponibilizada pelo Banco Central Do Brasil no fechamento do dia 14/11/2017, onde US$1,00 equivale à R$3,2828 (BCB, 2017). A taxa de conversão de Libras Esterlinas para Dólar utilizada foi de £1,00 equivalente à US$ 1,40, cotação disponibilizada no dia 19/02/2018 às oito horas e trinta minutos da manhã (BLOOMBERG, 2017).

Valores obtidos a partir de outros trabalhos tiveram seu valor corrigido conforme a inflação norte americana acumulada no período, entre o ano do trabalho de origem e 2017, de acordo com Inflation (2017). Conforme mostrado na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 - Inflação Norte Americana Acumulada

Ano	**Inflação Acumulada**
2010	1,50%
2011	2,96%
2012	1,74%
2013	1,50%
2014	0,76%
2015	0,73%
2016	2,07%
Acumulada até 2017	**11,26%**

Fonte: Inflation (2017).

Os valores gastos mensalmente com combustível (cálculo realizado somente com o preço do diesel, veículos a etanol e elétricos foram desconsiderados) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Gastos com Diesel da Frota de Ônibus da Cidade de São Paulo

	Tipo de veículo	Consumo Energético [GWh/mês]	Gasto Mensal [US$/mês]
SEM AR CONDICIONADO	MICRO E MINIÔNIBUS	60,23	1.810.902,91
	MIDIÔNIBUS	33,41	1.004.427,52
	BÁSICO	75,35	2.265.684,28
	PADRON	109,29	3.285.914,82
	PADRON 15M	6,91	207.685,53
	ARTICULADO	50,12	1.507.071,84
	ARTICULADO 23M	20,77	624.551,46
	BIARTICULADO	5,18	155.756,97
COM AR CONDICIONADO	MICRO E MINIÔNIBUS	4,23	127.175,45
	MIDIÔNIBUS	6,03	181.313,47
	BÁSICO	9,55	287.124,89
	PADRON	13,20	396.840,34
	ARTICULADO	1,47	44.199,82
	ARTICULADO 23M	22,54	677.793,11
	TOTAL	**418,28**	**$ 12.576.442,41**

Fonte: Elaboração Própria

A análise dos dados apresentados permite avaliar o impacto financeiro e a importância, tanto para a população como condições de trânsito, da utilização do ônibus no transporte urbano coletivo de uma grande cidade. O alto número de veículos que compõe a frota da cidade de São Paulo, seus custos e emissões, são fatores que influenciaram fortemente o desenvolvimento das análises que serão apresentadas neste trabalho.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade econômica da implementação de uma pequena frota urbana de ônibus para transporte coletivo, movida através da energia elétrica produzida por células a combustível utilizando hidrogênio proveniente da reforma a vapor do etanol como combustível.

Para essa análise os aspectos técnicos do hidrogênio e sua produção por diferentes métodos serão estudadas, porém dando ênfase e maior aprofundamento no processo de produção de hidrogênio por reforma a vapor de etanol. O motivo da escolha desse método para a produção será melhor explicado futuramente.

O armazenamento de hidrogênio para a utilização em aplicações não estacionárias é um desafio tecnológico que deve ser superado para possibilitar expansão do uso deste recurso energético no setor de transportes. Nesse sentido estudos recentes realizados indicam que o armazenamento por processo de compressão a altas pressões com sendo o mais viável econômica e tecnicamente para esta aplicação (ARAUJO, 2016).

Estudar as características de frotas de ônibus urbanos a célula de combustível e a apresentação de programas para a utilização de ônibus a FC no mundo.

Tendo assim o embasamento para a análise econômica proposta.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Inicialmente são apresentados os aspectos tecnológicos referentes a células a combustível (FC), sendo posteriormente apresentada uma visão geral sobre as características de ônibus movidos a energia elétrica proveniente de FC que utilizam hidrogênio como combustível, suas características e comparando essas características com as de veículos que utilizam motores de combustão interna.

No capítulo 3 será dado um maior enfoque no hidrogênio e em suas caraterísticas como combustível, seus processos de obtenção e armazenamento. É realizada uma análise mais detalhada do processo de reforma a vapor do etanol e do processo de armazenamento por

compressão, utilizando energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como a eólica e solar, o caracterizando assim, Biohidrogênio.

Com base em estudos realizados pelo Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos (GOSE), coordenado pelo professor doutor José Luz Silveira do departamento de energia da Universidade Estadual Paulista (UNESP) campus de Guaratinguetá, será realizada uma análise econômica visando estudar a receita anual esperada para a frota a FC comparativamente com frota operando com óleo diesel.

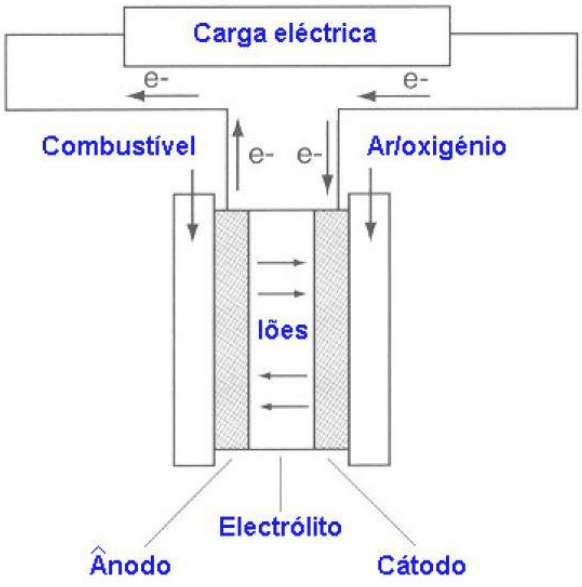
2. CARACTARÍSTICAS DAS FROTAS DE ÔNIBUS COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

2.1 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

O princípio de funcionamento da célula a combustível foi descoberto em 1838 por Christian Friedrich Schönbein, cientista alemão. Porém teve sua aplicação prática demonstrada pelo inglês Sir William Robert Grove um ano depois, quando ele construiu uma bateria voltaica a gás, combinando hidrogênio e oxigênio. Só em 1959 foi construída, pelo engenheiro francês Francis Thomas Bacon a primeira célula a combustível do tipo alcalina, que já apresentava as características das células atuas (HARMTMUT et al., 2000).

Uma célula a combustível pode ser definida como um dispositivo eletroquímico que utiliza a combinação química entre um combustível (Hidrogênio) e um oxidante (Oxigênio) para produzir continuamente energia elétrica e calor (SANTOS; SANTOS, 2004). E seu princípio de funcionamento pode ser melhor observado na Figura 5.

Figura 5 - Princípio de Funcionamento de uma Célula a Combustível

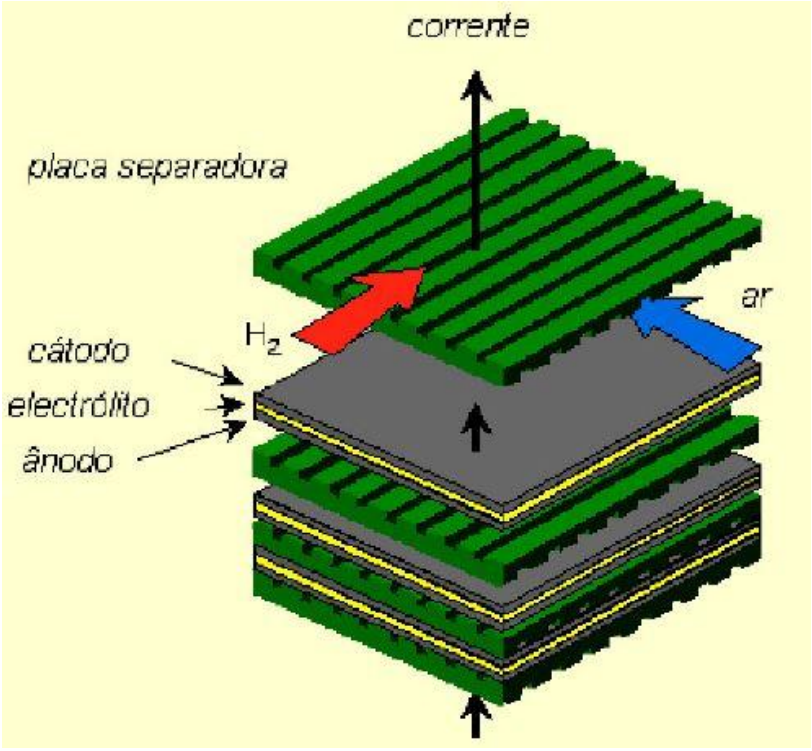


Fonte: Santos; Santos (2004).

A maioria das células a combustível gera tensões relativamente baixas, o que normalmente inviabiliza a utilização de células solitárias. Por esse motivo múltiplas células

agrupadas, formando uma pilha de células, geralmente são utilizadas. Conseguindo assim, atingir a tensão de saída pretendida para a aplicação determinada. Se existir a necessidade de elevar a corrente que uma pilha de células pode fornecer, as células da mesma devem ser conectadas entre em paralelo, como demonstrado na Figura 6 (SANTOS; SANTOS, 2004).

Figura 6 - Pilha de Células a Combustível



Fonte: Santos; Santos (2004)

Existem diversos tipos de células a combustível, porém podemos dividi-los em dois grupos principais, segundo suas temperaturas de operação. A Tabela 6 nos auxilia a enxergar a analisar algumas características de cada grupo.

Tabela 6 - Grupos de Células a Combustível

	Pilhas de combustível de baixa e média temperatura (<250ºC)	**Pilhas de combustível de alta temperatura (>600ºC)**
Tecnologias Aplicáveis	- Alcalinas (AFC) - Ácido Fosfórico (PAFC) - Membrana de Troca de Protons (PEMFC)	- Carbonatos Fundidos (MCFC) - Óxidos Sólidos (SOFC)
Dimensão Típica	- Produtos disponíveis no mercado e em desenvolvimento com potências até 250 kW	- A maioria dos equipamentos em desenvolvimento têm potências na ordem de 2 MW, mas também se desenvolvem unidades com menos de 1 MW
Vantagens	- Rendimento elevado - Emissões reduzidas - Arranque rápido (especialmente as PEMFC) - Potencial para redução significativa do custo resultante de produção em larga escala se for alcançado sucesso na área dos transportes	- Rendimento muito elevado - Emissões reduzidas - Processamento de combustível mais simples - Não existe a necessidade de utilizar catalisadores de metais preciosos - Não são danificadas pelo CO - Potências mais elevadas
Desvantagens	- Potencial de cogeração limitado - Processamento de combustível relativamente complexo - Mais sensíveis ao CO - Requerem catalisadores de metais preciosos - Custo elevado (PAFC)	- Mercado limitado inicialmente à produção de electricidade (o que reduz o potencial para a redução do custo) - Complexidade dos sistemas híbridos

Fonte: Santos; Santos (2004).

Dentre as tecnologias conhecidas a mais apropriada para a utilização veicular é a célula a combustível do tipo Célula de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC). Segundo Ricardo. (2004) algumas das características que fazem com que a PEMFC seja a mais amplamente utilizada para esse fim, são:

- Temperatura abaixo dos 80°C;

- Eficiência em torno de 55%;
- Alta densidade de energia;
- Pouco peso e volume;
- Atualmente é a célula a combustível com menor custo de produção;
- Eletrólito imóvel (membrana) simplifica a selagem no processo de produção, reduz a corrosão e possui maior vida útil;
- Baixa temperatura de operação o que permite rápida resposta para mudanças na demanda de potência;
- Robustez, mais resistente ao choque e vibrações em função do eletrólito sólido;
- Capacidade de seguir as variações de cargas;

As características apresentadas devem ser consideradas na análise da utilização de veículos com motores elétricos e células a combustível em substituição aos movidos a motores de combustão interna (MCI).

2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS E COM MCI

Um dos fatores que mais vem limitando o aumento da utilização de veículos elétricos no mundo é a geralmente baixa autonomia dos veículos, problema que acaba sendo minimizado com a utilização de células a combustível como a fonte geradora de energia elétrica, integradas ao veículo. Diminuindo também a necessidade de utilização de volumosos e pesados sistemas de armazenamento de energia, as baterias.

Em veículos que utilizam MCI, além da própria poluição gerada pela queima dos combustíveis, que acaba sendo emitida em grande quantidade nos centros urbanos, a utilização de outros fluídos (óleos e aditivos) e peças descartáveis (filtros) acabam contribuindo para a poluição do meio. Outro grande inconveniente da utilização de veículos utilizadores de MCI é o fato de possuírem muitos sistemas auxiliares, o que diminui ainda mais a eficiência dos sistemas desse tipo, que dificilmente ultrapassa os 30% (BRAGA, 2010).

Segundo Bueno (2004), os sistemas auxiliares que são necessários para o funcionamento plenos de um sistema automotivo que utiliza MCI estão resumidamente apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Sistemas Auxiliares MCI

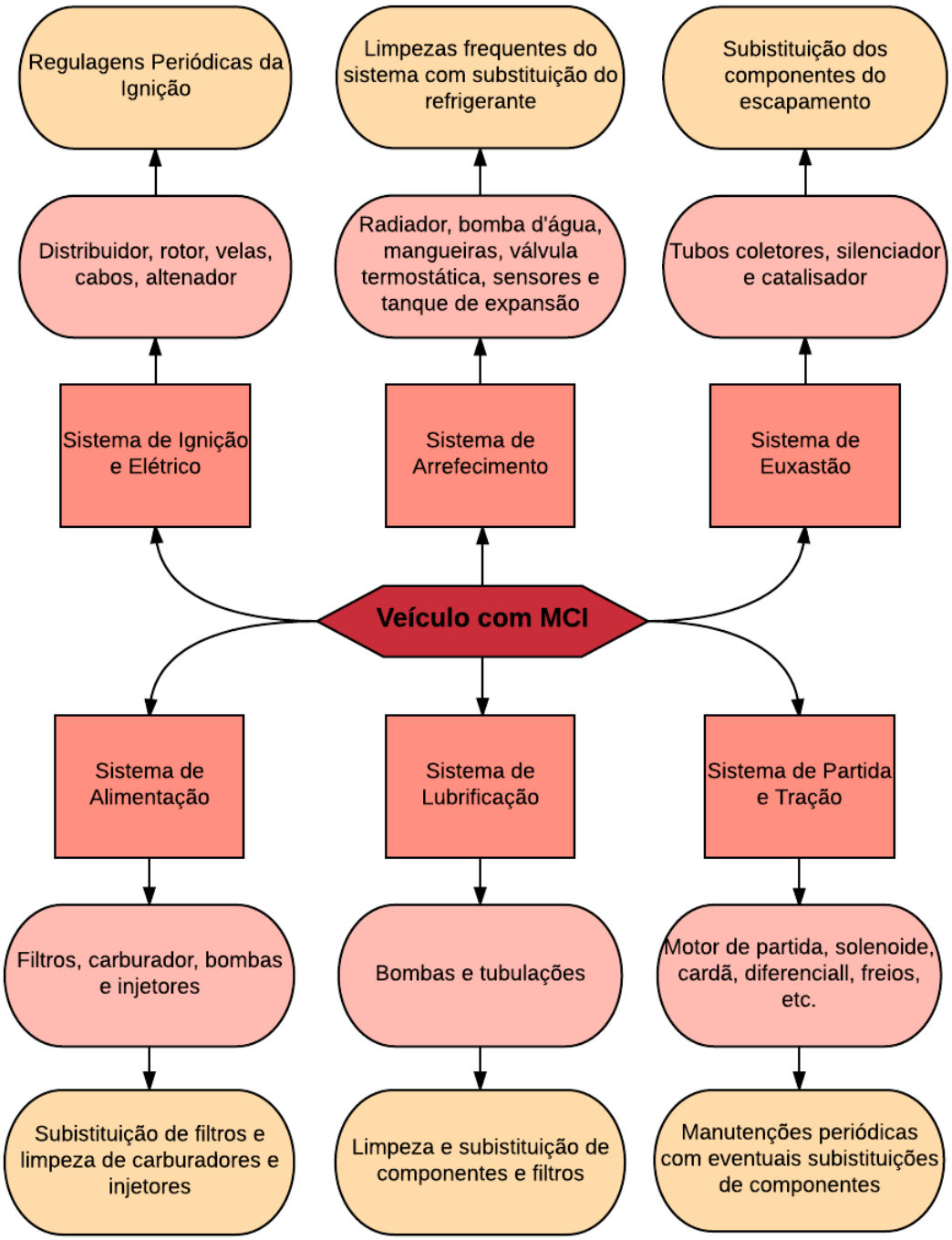
SISTEMAS AUXILIARES	
Sistema de arrefecimento	Responsável pela eliminação do excesso de calor gerado no cilindro do motor. Esse calor é gerado por diversos meios, sendo os principais a queima do combustível e o atrito entre as partes moveis do motor. O sistema de arrefecimento é composto por radiador, bomba d'água, tubulações, válvulas, ventiladores, correias, etc.
Sistema de alimentação	Na maioria dos casos, o próprio movimento de êmbolo dentro do cilindro promove a admissão da mistura ar/combustível. É o sistema que menos prejudica o motor, sendo composto por filtros, tubulações, carburador, bomba de injeção entre outros.
Sistema de exaustão	É responsável pela retirada dos gases queimados de dentro do cilindro, permitindo que uma nova queima possa ocorrer. Constitui-se de: válvulas, tubulações, silenciadores, etc.
Sistema elétrico/ignição	Neste sistema é gerada a faísca necessária para o inicio do funcionamento do motor. Constitui-se de: módulos eletrônicos, cabos, velas, bobinas, alternador e outros.
Sistema de lubrificação	Minimiza o atrito entre as peças móveis do motor, aumentando a vida útil das peças. É composto por bombas e tubulações.
Sistema de partida	É necessário que haja um pequeno motor elétrico para fazer o MCI inicialmente girar à uma determinada rotação, possibilitando que o ciclo térmico seja iniciado.

Fonte: Bueno (2004).

A grande quantidade de sistemas e suas complexidades fazem com que o funcionamento do sistema como um todo se torne muito complexo, aumentando as chances de ocorrerem problemas e consequentemente aumenta o risco de intervenções para a manutenção. A grande quantidade de peças móveis é um dos fatores que faz com que os veículos movidos à MCI tenham uma baixa eficiência quando comparados com veículos com motores elétricos, que possuem uma única peça móvel, o próprio rotor do motor (BUENO, 2004).

A Figura 7 mostra esquematicamente um diagrama da composição de um veículo movido à MCI, sendo notável a complexidade do mesmo.

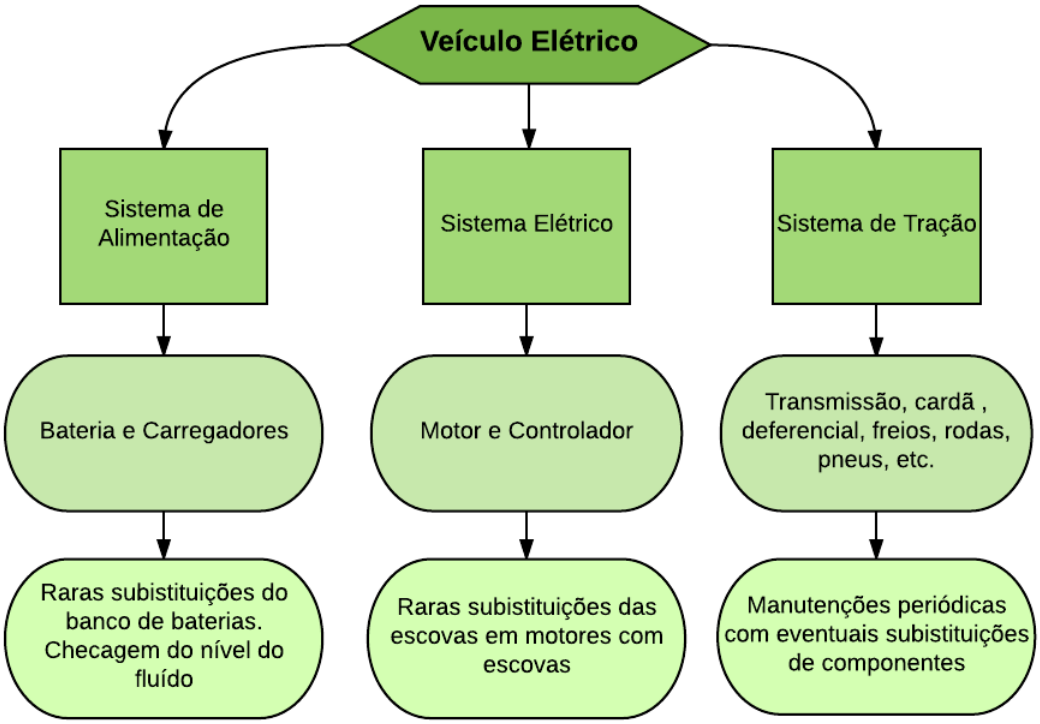
Figura 7 - Sistemas Auxiliares de Veículos à MCI



Fonte: Bueno (2004).

Em um veículo movido através de motor elétrico retira-se diversos componentes que auxiliam o MCI, ficando assim composto somente do sistema de alimentação, sistema elétrico e o sistema de tração. Podemos analisar a simplicidade de um veículo elétrico através da Figura 8.

Figura 8 - Sistemas Auxiliares de Veículos Elétricos



Fonte: Bueno (2004).

A energia utilizada no sistema de alimentação de um veículo elétrico não precisa necessariamente ser oriunda do armazenamento químico das baterias, é possível que a energia elétrica seja produzida em sistemas no próprio veículo. Esse é o caso de estudo desse trabalho, onde ao invés de conjuntos de baterias o veículo é equipado com células a combustível e tanques de armazenamento de hidrogênio.

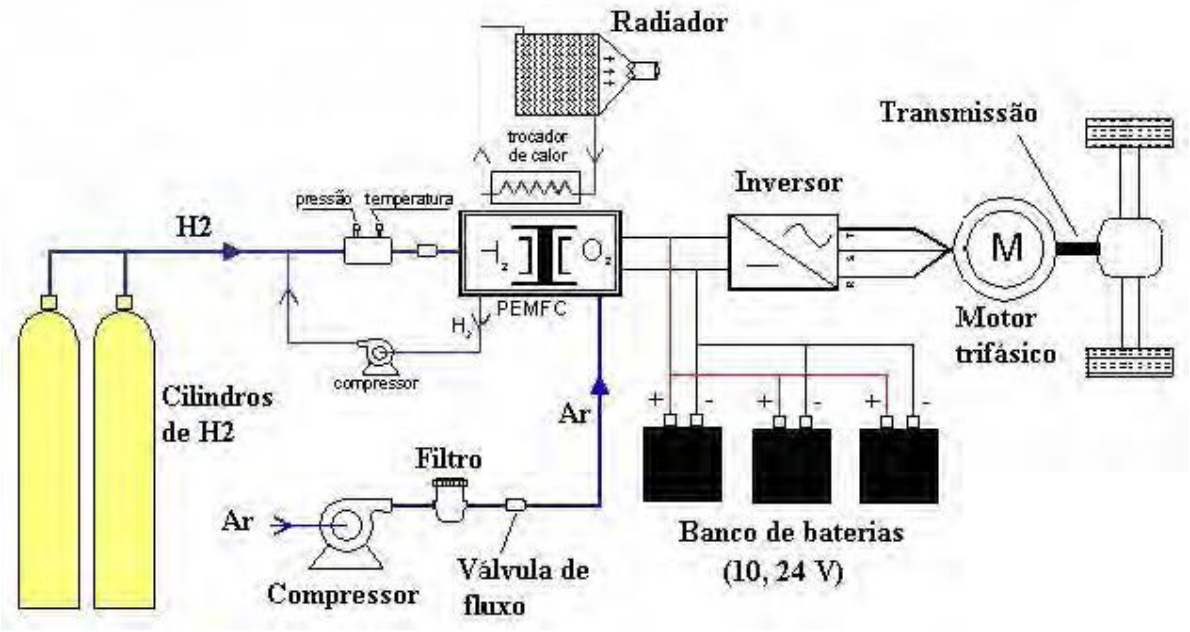
2.3 UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS

Para que se torne possível à utilização de células a combustível em sistemas de transporte veicular, é necessário que haja um funcionamento harmonioso entre todos os componentes desse sistema. Segundo Torres (2002) um sistema para esse tipo de aplicação deve ser leve e compacto, sendo constituído principalmente pelos seguintes componentes:

- Tanque de armazenamento de hidrogênio;
- Dispositivo de célula a combustível e um compressor de ar, para abastecer a célula a combustível com oxigênio;
- Sistema de arrefecimento, para suportar a temperatura de operação;
- Um sistema de gerenciamento de água, para manter a membrana da célula úmida;
- Inversor de tensão DC para AC e frequência variável para comandar o motor de elétrico;
- Um motor de elétrico e transmissão AC;
- Uma bateria ou ultracapacitor (que recebem energia do freio regenerativo) pode ser conectada para abastecer a potência suplementar ao sistema.

Na Figura 9 é apresentado um sistema automotivo com células a combustível, destacando seus principais componentes.

Figura 9 - Sistema Automotivo com Células a Combustível



Fonte: Sordi (2008).

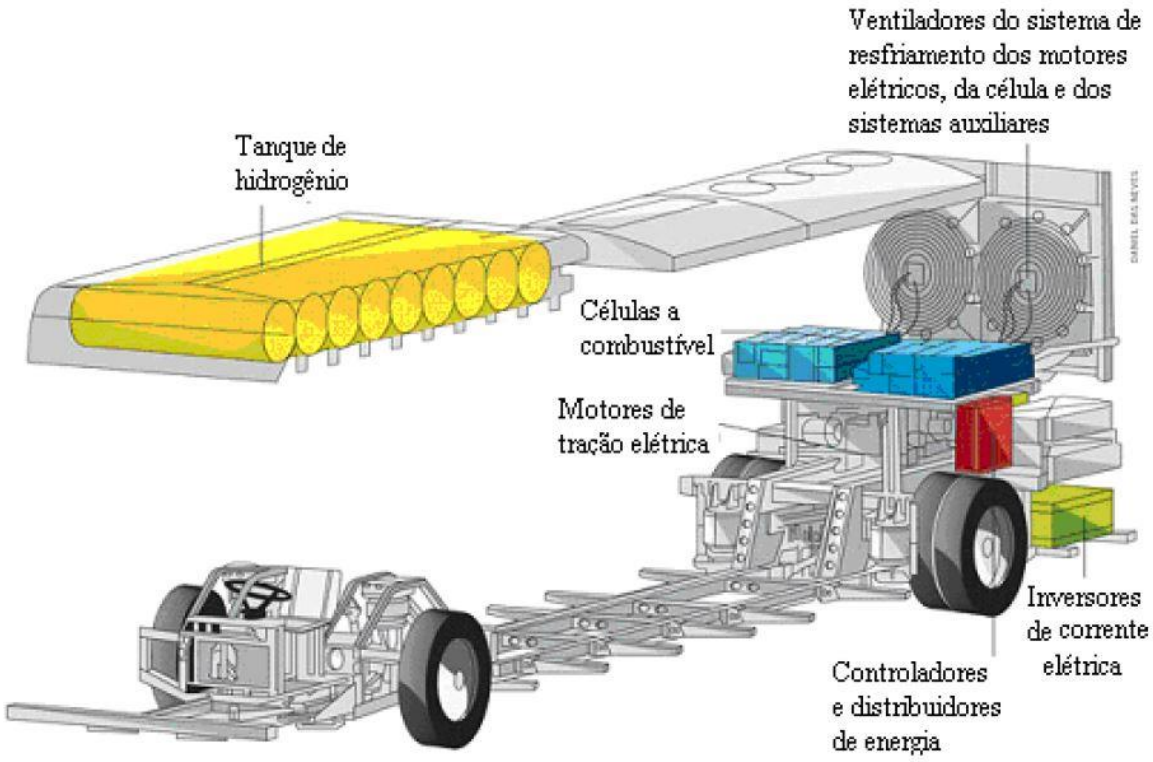
O presente trabalho visa estudar os impactos da utilização desse sistema automotivo em frotas de ônibus, apesar de ser possível a utilização e adaptação em outros tipos de veículos. E os motivos para essa escolha são, segundo Santarelli et al. (2002):

- A implementação dos sistemas necessários é facilitada devido às dimensões e estrutura de um ônibus. O peso dos sistemas seria percentualmente menor quando comparado com veículos menores;
- Um ônibus pesando 18 toneladas e trafegando a uma velocidade média de 70km/h possui uma potência de 150kW, tendo assim uma relação de potência e peso mais baixa que a de um carro comum;
- Na atualidade as tecnologias disponíveis de células a combustível são mais caras que as convencionais, com MCI, e o fato de ônibus serem comprados e administrados em frotas faz com que o custo do investimento e manutenção sejam reduzidos;
- A grande quantidade de ônibus que circula em centros urbanos, onde a poluição do ar é mais concentrada;

- Os órgãos públicos geralmente administram as frotas de ônibus de transporte público, e têm um interesse maior pelos benefícios sociais e uma menor preocupação com o retorno em curto prazo do investimento;
- O motor silencioso, ausência de vibrações e suave operação são características de sistemas de células combustível que são interessantes para o transporte público, almejando um maior conforto para os usuários.

Na Figura 10 é demonstrado como o sistema automotivo com células a combustível pode ser adaptado em um ônibus padrão, seus componentes e distribuição.

Figura 10 - Instalação de um Sistema Automotivo com Células em Ônibus



Fonte: Revista Fapesp (2009).

Projetos de ônibus movidos a hidrogênio já foram e ainda continuam sendo implementados ao redor do mundo, inclusive no Brasil. O projeto brasileiro foi desenvolvido com a parceria de diversos órgãos e empresas, dentre elas o Ministério de Minas e Energia,

EMTU, PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento) e FINEP (Agencia Financiadora de Pesquisa e Projetos).

3. REFORMA A VAPOR DO ETANOL E ARMAZENAMENTO POR COMPRESSÃO DO HIDROGÊNIO

3.1 HIDROGÊNIO

Até a década de 1970 o hidrogênio como combustível tinha sua grande aplicação voltada principalmente para missões espaciais, porém após a primeira grande crise petrolífera passou-se a considera-lo como uma possível fonte de energia para outras aplicações. O hidrogênio não pode ser considerado uma fonte energética primária, pois não se encontra "pronto" na natureza, sendo preciso através de diversos processos possíveis, produzi-lo. O elemento hidrogênio (H) é o mais simples da tabela periódica, composto de apenas um próton e um elétron. Na natureza é encontrado em seu estado molecular (H_2) como o gás mais abundante na atmosfera terrestre.

Todo combustível é capaz de liberar uma quantidade de energia ao reagir com o oxigênio, e podemos expressar essa quantidade de energia pelo Poder Calorífico Inferior (PCI), que é obtido experimentalmente para cada combustível, sendo que o hidrogênio possui a mais alta relação entre energia por unidade de peso dentre todos os combustíveis, tendo em média 2,5 vezes mais energia liberada durante a reação do que de um hidrocarboneto (SANTOS et al., 2005).

Segundo Silveira et al. (2009) o PCI do hidrogênio é de 119.742,48 kJ/kg. Por possuir um elevado PCI juntamente com o fato de sua densidade ser quatorze vezes menor que a do ar, o hidrogênio é uma ótima alternativa para a substituição dos combustíveis fósseis (BRAGA, 2010).

Analisando a Tabela 8 podemos comparar o PCI do hidrogênio com alguns combustíveis comumente utilizados, inclusive no setor de transporte.

Tabela 8 - PCI de Alguns Combustíveis

Combustível	PCI [MJ/kg]
Hidrogênio	120,1
Gás Natural	47,1
Gasolina A	43,4
Óleo Diesel	42,6

Fonte: The Engineering Toolbox (2018).

Assim como qualquer combustível o hidrogênio é inflamável, porém com o manuseio e armazenamento corretos, é tão seguro quanto qualquer outro. O que difere o hidrogênio em relação à maioria dos outros combustíveis é sua característica de velocidade de queima, que é altíssima, o que o torna muito explosivo quando confinado. Porém os cilindros de armazenamento de hidrogênio são projetados com um altíssimo coeficiente de segurança, podendo suportar até três vezes a pressão aconselhada antes de sofrerem qualquer dano (BRAGA, 2010).

Uma propriedade que influencia positivamente a utilização do hidrogênio como combustível é seu alto coeficiente de difusão, o que o faz se dissipar rapidamente no ar, raramente ocasionando explosões ao ar livre. Em caso de qualquer vazamento esse combustível não causa danos ambientais, por ser uma substância atóxica, diferentemente do vazamento de combustíveis fósseis, que comumente causam catástrofes ambientais.

O hidrogênio pode ser obtido através de diversos processos, sejam eles processos, fotolíticos, eletrolíticos ou termoquímicos. Os processos fotolíticos utilizam a energia da luz e as atividades naturais de enzimas em microrganismos e algumas algas. O hidrogênio então é produzido através das atividades metabólicas desses organismos, porém com uma baixa eficiência. Um exemplo de processo eletrolítico é o de eletrólise da água, que utiliza eletricidade originária de uma fonte externa (muitas vezes utilizando o excedente de uma usina hidrelétrica, quando ocorre de verter água) para romper os átomos de água em oxigênio e hidrogênio. A corrente elétrica tem o papel de ocasionar a quebra das ligações químicas atômicas. Já os processos termoquímicos envolvem a matéria-prima, podendo ser de origem renovável ou não, calor e catalisadores para promover as reações químicas necessárias para a transformação (BRAGA, 2010).

O processo mais utilizado e conhecido para a produção de hidrogênio é o de reforma a vapor, que é um processo termoquímico endotérmico, ou seja, necessita de uma fonte externa de calor. Segundo Braga, os processos dentro de um reformador podem ser descritos como (BRAGA et al., 2008):

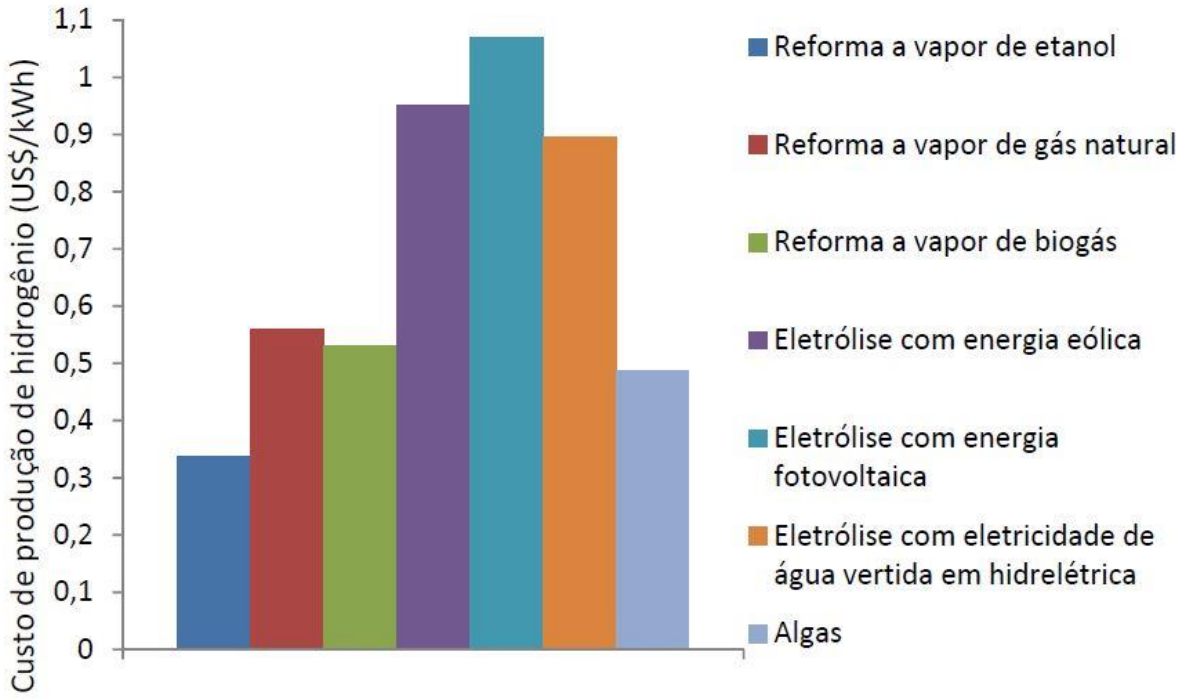
- Limpeza do combustível: Remoção de enxofre e amônia para prevenir a degradação do reformador e da célula de combustível.
- Conversão de combustível: Conversão do combustível em um gás reformado rico em hidrogênio que contém CO, CO_2 e H_2O, em forma de vapor.
- Alteração do gás reformado: Conversão do monóxido de carbono (CO) e água (H_2O) em H_2 e CO_2, através da reação de simples troca, e oxidação seletiva para redução CO a uma baixa PPM, ou remoção da água por condensação para aumento da concentração de H_2.

A escolha de um processo produtivo de hidrogênio depende de vários fatores a serem analisados. No caso específico deste trabalho a escolha pela reforma a vapor do etanol se baseou nos seguintes aspectos:

- Dentre os processos existentes, o de reforma a vapor (sendo de combustíveis fosseis ou renováveis) é o mais eficiente;
- Existe um grande foco do trabalho na utilização de fontes de energias renováveis, e o etanol é uma opção viável em nosso país que se encaixa nesse critério;
- O Brasil é um grande produtor de etanol (segundo dados do governo nacional o país produziu mais de 30 bilhões de litros de etanol no ano de 2015).

Na Figura 11 é possível realizar uma análise comparativa entre os custos da produção do hidrogênio por diversas formas. Além dos fatores destacados anteriormente, verificamos que a produção do hidrogênio por meio da reforma a vapor do etanol utilizando o bagaço de cana como combustível para geração do vapor, tem o menor custo médio de produção dentre os métodos comparados.

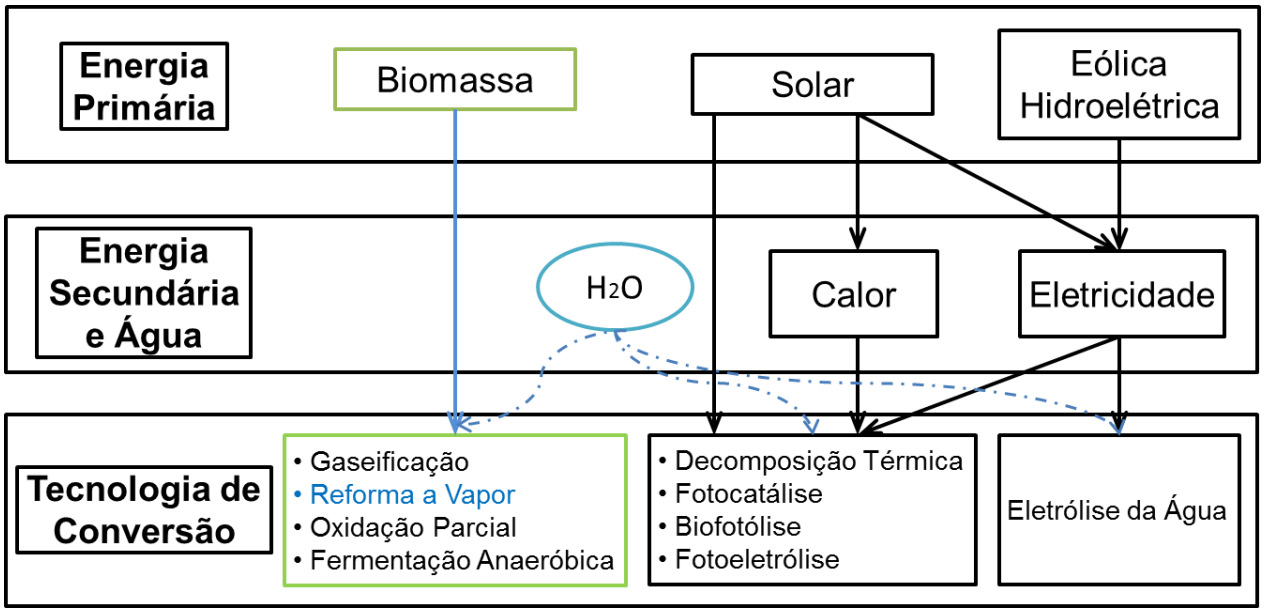
Figura 11 - Custo da Produção de Hidrogênio por Diversos Processos



Fonte: Braga (2014).

Os recursos e processos utilizados para a produção de hidrogênio fazem com que o combustível produzido possa ser considerado hidrogênio renovável ou não. A Figura 12 esquematiza os principais caminhos para a produção de hidrogênio renovável, e assim podemos verificar que a escolha do processo de reforma a vapor de etanol está de acordo com os propósitos deste trabalho.

Figura 12 - Caminhos para a produção de Hidrogênio Renovável



Fonte: Gandia; Gurutze; Pedro (2013).

Quando se trata de produção de hidrogênio, na maioria dos casos, o seu consumo é quase que imediato, como na utilização de hidrogênio no processo de hidrocraqueamento em refinarias de petróleo, fabricação de fertilizantes, na indústria alimentícia, dentre outros (LOPES, 2009).

Porém para o caso específico de estudo deste trabalho, a utilização de hidrogênio como combustível de frotas de ônibus para transporte coletivo, é necessário que haja o abastecimento desse combustível. Seu armazenamento envolve certas dificuldades. Como já citado anteriormente, o hidrogênio possui baixíssima densidade e, apesar de ser o combustível com maior relação de energia-massa, quando a quantidade de energia é relacionada ao volume, a situação se inverte, o que faz com que seu armazenamento no estado gasoso demande sistemas de grandes volumes e pressões, fazendo com que a vantagem de ser um combustível leve seja ofuscada pelo peso dos tanques de armazenamento. Uma solução para este problema seria o armazenamento do mesmo em estado líquido, porém isso demandaria um armazenamento que utilize sistemas criogênicos, com temperaturas em torno de -253˚C (BRAGA et al., 2009). E nesse caso a energia gasta para deixa-lo no estado líquido representa de 25% a 45% da energia armazenada, sem contar os altos gastos com isolamento térmico (ARAUJO, 2016).

Uma outra forma de armazenamento seria através de hidretos metálicos, esse processo se sustenta no princípio de certos metais terem a capacidade de absorver em sua estrutura química o hidrogênio, isso sob altas pressão e temperaturas moderadas, e sendo capazes de libera-lo a altas temperaturas e baixas pressões. São a opção mais segura de armazenamento de hidrogênio, porem possuem baixa densidade energética e podem ter sua capacidade de armazenamento afetada quando não utilizado hidrogênio livre de impurezas (BRAGA, 2010).

Ainda existe a alternativa de armazenamento em hidretos alcalinos, que utilizam compostos como sódio, potássio e lítio.

Para o estudo mais aprofundado e análise econômica, o processo de armazenamento do hidrogênio por compressão foi selecionado. Esta escolha foi pautada nos seguintes fatos:

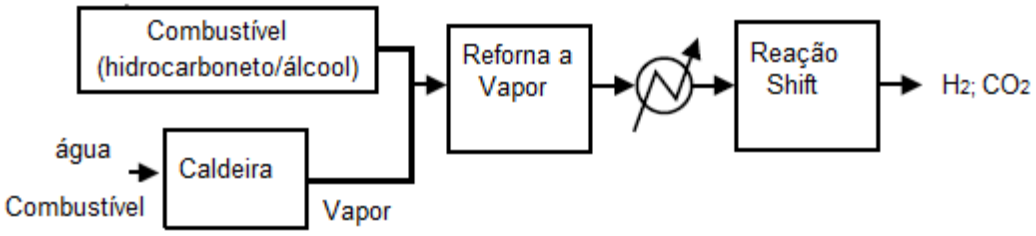
- O processo de compressão é o mais utilizado, já que apresenta maior eficiência e menores custos (ARAUJO, 2016);
- E o mesmo pode ser efetuado usufruindo de fontes de energia consideradas limpas, como solar e eólica.

3.2 REFORMA A VAPOR DO ETANOL

O processo de reforma a vapor é constituído de duas etapas principais, uma onde o combustível, seja ele um hidrocarboneto ou álcool, reage com vapor em alta temperatura e é convertido em uma mistura gasosa de H_2, CO, CO_2 e uma parcela do combustível não reagido. Essa etapa é denominada de reforma a vapor (*steam reforming*). A próxima etapa ocorre com uma temperatura mais baixa, no denominado reator *shift*, onde o CO presente no gás síntese reage com H_2O formando CO_2 e H_2, essa reação é denominada de reação de deslocamento (BRAGA, 2014).

A Figura 13 mostra a configuração simplificada do processo de reforma a vapor.

Figura 13 - Configuração do Processo de Reforma a Vapor



Fonte: Spath, Mann (2000).

De acordo com o tipo de célula a combustível em que o hidrogênio produzido for ser utilizado, deverá haver uma etapa adicional para a remoção de CO, visando uma maior purificação dos gases de síntese.

A seguir serão apresentadas as principais reações que ocorrem no processo de reforma a vapor do etanol, equações (3.1), (3.2) e (3.3) (BRAGA, 2014).

Reação Global da Reforma a Vapor do Etanol

A reação global de conversão do etanol em hidrogênio através da reforma a vapor do etanol é mostrada na equação (3.1):

$$C_2H_5OH + 3\ H_2O \leftrightarrow 2CO_2 + 6H_2 \qquad (3.1)$$

As reações que dão origem a reação global são a reação de reforma e de deslocamento, que serão demonstradas a seguir.

Reação de Reforma a Vapor (*Steam Reformin Reaction)*

Essa reação consiste na reação catalítica endotérmica do combustível com o vapor de água, que resulta na formação, principalmente de CO e H_2. Ocorre na faixa de temperaturas de 400-700˚C.

$$C_2H_5OH + H_2O \leftrightarrow 2CO_2 + 4H_2 \qquad (3.2)$$

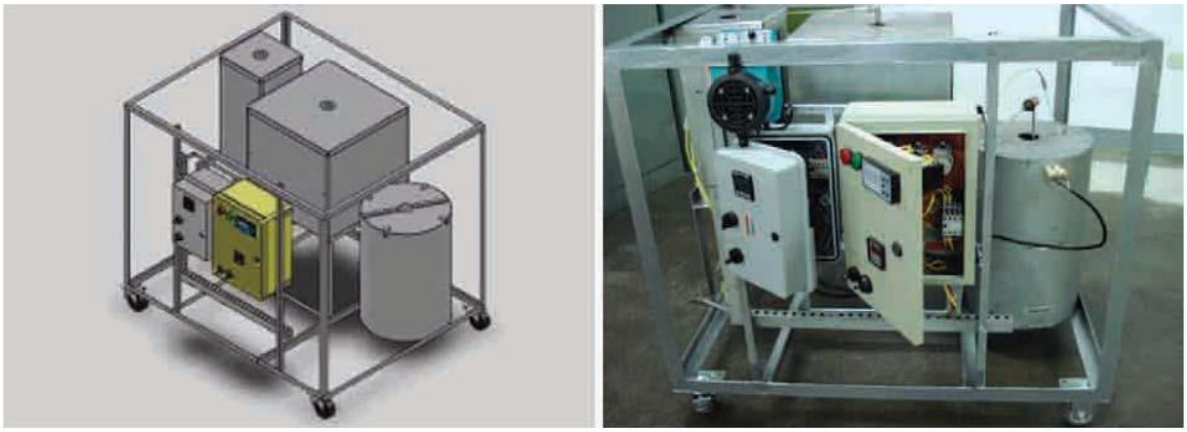
Reação de Deslocamento (*Water Gas Shift Reaction)*

Reação catalítica de troca água-gás e resulta na produção adicional de hidrogênio e na eliminação de certa parte do monóxido de carbono. Essa reação é realizada através de um reator catalítico, reator de troca (*shift reactor*). Ocorre na faixa de temperatura de 200-300˚C.

$$2CO + 2\ H_2O \leftrightarrow 2CO_2 + 2H_2 \qquad (3.3)$$

A Figura 14 mostra um protótipo elétrico, composto por um gerador de vapor, um reator de reforma a vapor e um reator shift, e desenvolvido pelo Grupo de Otimizações de Sistemas Energéticos de reforma a vapor a etanol, que foi financiado por um projeto da Companhia Energética de Minas Gerais (CMIG).

Figura 14 - Protótipo de Reforma a Vapor de Etanol



Fonte: Braga (2014).

Durante o processo de reforma a vapor muitas reações químicas podem ocorrer simultaneamente ao processo, reações que podem ser consideradas indesejadas. Pode haver a reação de parte do hidrogênio com o monóxido de carbono resultando em metano (CH_4), o que diminui a quantidade final de H_2. Outra reação que pode ocorrer é a de formação de carbono por decomposição de monóxido de carbono, conhecida como reação de Bouduard (BRAGA, 2014).

Para que a produção de hidrogênio ocorra da forma mais eficiente possível, catalisadores são utilizados visando minimizar as reações indesejadas, que foram citadas anteriormente.

Se tratando da utilização do hidrogênio para a geração de energia elétrica através de células a combustível em veículos automotores, existe, na maioria dos casos, a necessidade de armazenamento do mesmo. Como já mencionando anteriormente, o método mais utilizado para essa aplicação é o de armazenamento por compressão, onde o hidrogênio a altas pressões é armazenado em tanques instalados nos veículos.

3.3 ARMAZENAMENTO POR COMPRESSÃO

Segundo Araujo (2016), o processo de armazenamento do hidrogênio por compressão é o mais simples, mais utilizado e desenvolvido, além de apresentar uma alta taxa de produção. Para a aplicação veicular que utilizam células a combustível, as pressões de armazenamento podem variar entre 35 a 70 MPa, e para atingir essas pressões a energia gasta no processo de compressão é de 5 a 20% da energia armazenada do combustível (LIPMAN et al., 2013).

Podemos analisar os processos de compressão de três maneiras, como demonstrado na Tabela 9:

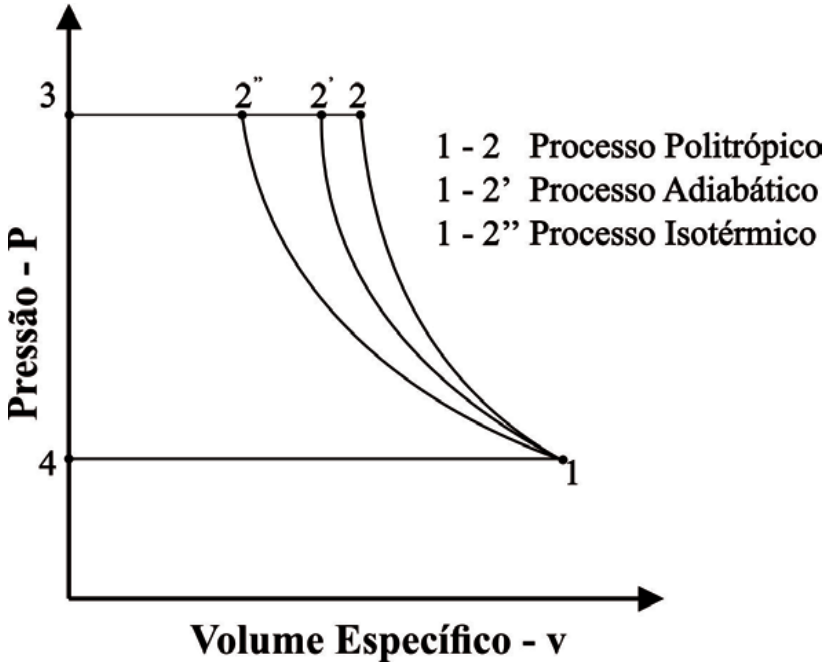
Tabela 9 - Processos de Compressão

Processos de Compressão	
Isotérmico	Temperatura é mantida constante durante o processo de aumento de pressão. Os compressores são projetados para remover a maior quantidade de calor possível, porém a taxa com que isso acontece é menor que a de geração.
Adiabático	O processo é isoentrópico, não havendo transferência de calor na fronteira do sistema.
Politrópico	O processo é considerado internamente reversível.

Fonte: Araujo (2016)

Podemos analisar os processos mencionadas através da Figura 15, onde as áreas representam a quantidade de energia necessária para a compressão.

Figura 15 - Processos de Compressão



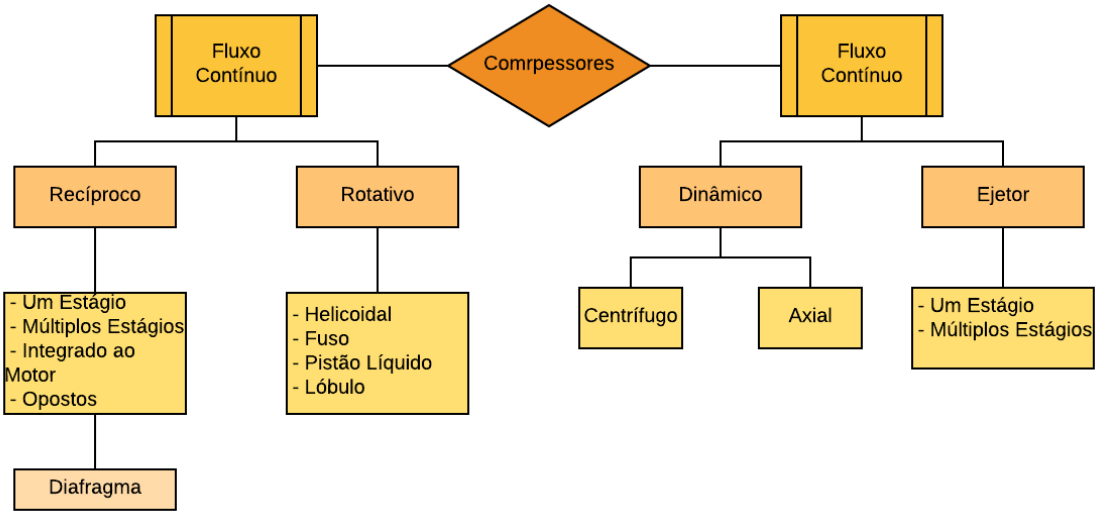
Fonte: Araujo (2016)

Segundo Araujo (2016), compressores são classificados de duas maneiras, com base no seu princípio de operação: fluxo contínuo ou deslocamento positivo. Onde compressores de fluxo contínuo convertem o aumento de energia cinética e um acréscimo de pressão no gás. Os classificados como de deslocamento positivo a cada rotação do eixo de acionamento comprime uma quantidade fixa de gás, realizando o processo a volume constante.

Alguns tipos de compressores são apresentados na

Figura 16 classificados conforme seu princípio de operação.

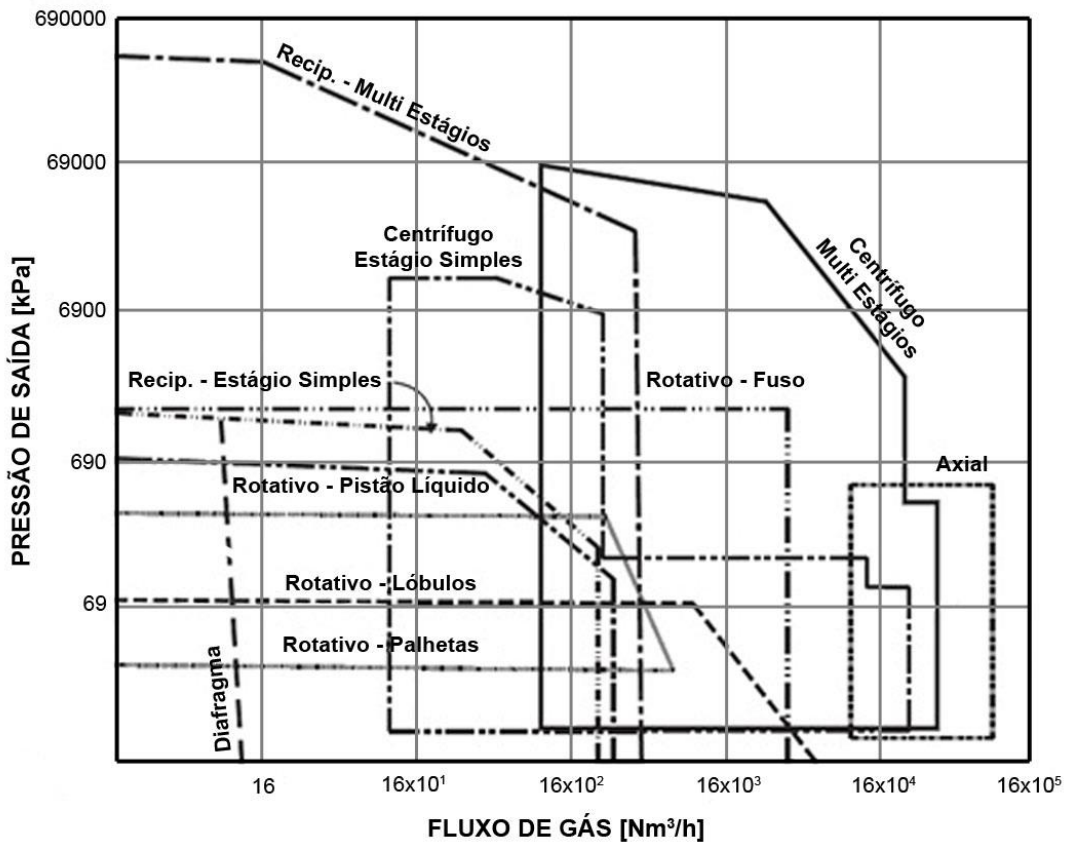
Figura 16 - Compressores Conforme Princípio de Operação



Fonte: GPSA (2012)

A escolha do equipamento que será utilizado vai depender da finalidade do hidrogênio, da pressão e vazões necessárias para cada processo. Para o caso de estudo do presente trabalho, onde há a necessidade de armazenamento do hidrogênio a pressões elevadas (70MPa), através da Figura 17 podemos verificar que o tipo de compressor mais indicado seria o de deslocamento positivo recíproco de múltiplo estágio.

Figura 17 - Gráfico para Seleção de Compressores



Fonte: GPSA (2012)

O processo de compressão do hidrogênio demanda certa quantidade de energia, energia que pode ser obtida através de processos pouco prejudiciais ao meio ambiente. Esse fator faz deste um processo ainda mais interessante, já que o presente trabalho tem como uma das principais motivações os fatores ambientais. Para as análises que serão futuramente apresentadas, foram consideradas duas fontes de energia alternativa utilizadas no processo de compressão do hidrogênio: eólica e solar.

4. ECONOMIA ANUAL ESPERADA COMPARATIVAMENTE COM FROTA UTILIZANDO MOTORES A DIESEL

O objetivo deste capítulo é a realização da análise econômica da implementação de uma pequena frota de ônibus (dois veículos) utilizando motores elétricos com energia proveniente da utilização de Biohidrogênio em células a combustível.

Devido à seus aspectos técnicos e por possuir atualmente o menor custo de investimento dentre as diferentes tecnologias de FC, será considerada a utilização de PEMFC nos ônibus que compõem a frota estudada.

Serão analisados os custos de investimento, operação e manutenção relacionados à implementação da frota utilizando PEMFC e MCI.

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DE ÔNIBUS UTILIZANDO PEMFC

Os cálculos realizados neste capítulo foram baseados na metodologia desenvolvida por Silveira et al. (1999), e terão as equações apresentadas a seguir.

Para o cálculo da vazão mássica de combustível consumida pelo veículo utilizou-se a equação (4.1), dada em [kg/s].

$$\dot{m} = \frac{W}{\eta . PCI} . 100 \tag{4.1}$$

O custo de investimento foi calculado em um período de amortização, considerando uma taxa de juros, e para isso as equações adimensionais (4.2) e (4.3) foram utilizadas. Os resultados dessas equações podem ser verificados no APÊNDICE A – Resultados dos custos de investimento e receita anual.

$$q = 1 + \frac{r}{100} \tag{4.2}$$

$$f = \frac{q^k . (q-1)}{q^k - 1} \tag{4.3}$$

O custo da implementação de ônibus utilizando PEMFC com biohidrogênio com combustível pode ser apresentado pela soma do custo de investimento, combustível e manutenção.

$$C_{\hat{o}nibus} = \frac{I.f}{H} + \frac{C_{comb}.PCI.\dot{m}}{W} + 0{,}1.\frac{I.f}{H} \quad (4.4)$$

Onde:

I	Investimento	[US$/kW]
C_{comb}	Custo do Combustível	[US$/kWh]
W	Potência do Sistema	[kW]
H	Horas de operação por ano	

O custo da produção do hidrogênio por reforma a vapor do etanol, segundo Silva (2014), pode ser considerado igual a 3,50 US$/kWh. O gráfico comparativo entre os custos de produção do hidrogênio por diversos processos pode ser verificado através da Figura 11, apresentada anteriormente.

Segundo Bezmalinovi, Barbir e Tolj (2013), o investimento em sistemas de PEMFC pode variar de 1000 US$/kW a 5000 US$/kW.

Para a realização dos cálculos apresentados foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Foram utilizados três valores distintos de investimento em células a combustível, 1000 US$/kW (PEMFC1), 3000 US$/kW (PEMFC2) e 5000 US$/kW (PEMFC3), sendo as extremidades da faixa de valores proposta por Bezmalinovi, Barbir e Tolj (2013) e o valor médio da mesma;
- Investimento em MCI de 1000US$/kW (NETO, 2005);
- Preço do diesel de 3,001 R$/l (0,09 US$/kWh);
- Segundo Neto (2005) as potências e eficiências dos sistemas de MCI e FC são: W_{MCI}= 175 kW e η_{MCI}=27%; W_{FC} = 250 kW e η_{FC}=48%;

- PCI (hidrogênio) = 119.742,48 kJ/kg (SILVEIRA et al., 2009);
- PCI (diesel) = 42.552,4 kJ/kg (VILELA, 2007)
- De acordo com o trabalho de Braga. (2010), para os cálculos foi utilizado um período operação de 16 horas por dia, 300 dias por ano, o que representa o equivalente a 4800 horas de operação por ano (H) e taxa de juros anual de 8%;
- Para esse estudo foi utilizado o período de 1 a 9 anos de amortização de capital.

A partir da equação (4.1) é possível calcular a vazão mássica de combustível consumida por um veículo. Substituindo encontra se 0,00435 kg/s e 0,01523 kg/s de hidrogênio e diesel, respectivamente.

Todos os valores encontrados a partir da equação (4.4) são apresentados no APÊNDICE A – Resultados dos custos de investimento e receita anual.

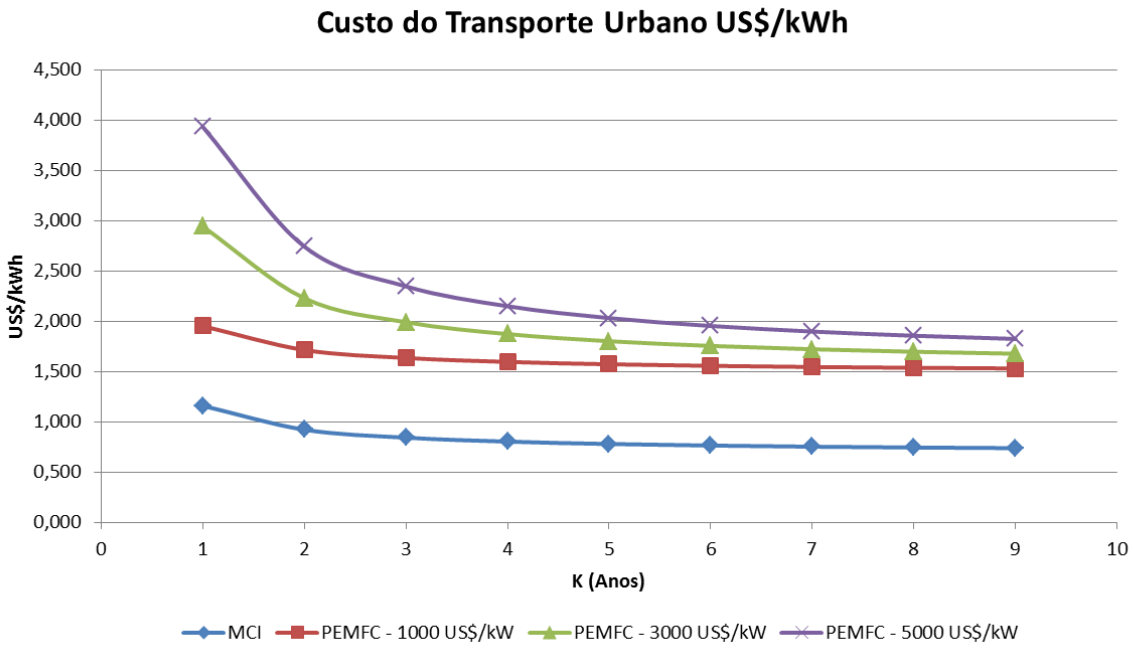
. Na Tabela 10 e Figura 18 podemos visualizar os resultados finais, demonstrando o custo [US$/kWh] para a implementação de uma pequena frota a FC em comparação com uma frota de mesmo tamanho com veículos utilizando MCI, sem contabilizar os custos relacionados ao armazenamento do Biohidrogênio.

Tabela 10 - Custo do Transporte Urbano (sem armazenamento)

Custo de Investimento [US$/kWh]				
Ano	**MCI**	**PEMFC 1**	**PEMFC 2**	**PEMFC 3**
1	1,161	1,953	2,943	3,933
2	0,923	1,715	2,229	2,743
3	0,844	1,636	1,992	2,348
4	0,805	1,597	1,873	2,150
5	0,781	1,573	1,803	2,032
6	0,765	1,557	1,756	1,954
7	0,754	1,546	1,722	1,898
8	0,746	1,538	1,698	1,857
9	0,740	1,532	1,678	1,825

Fonte: Elaboração Própria

Figura 18 - Custo do Transporte Urbano (sem armazenamento)



Fonte: Elaboração Própria

Mesmo quando não consideramos os custos relacionados ao armazenamento do Biohidrogênio, verifica-se que, para todos os investimentos iniciais em células a combustível considerados, a implementação da frota não se tornaria economicamente viável no período de 9 ano analisado.

4.2 CUSTOS COM O ARMAZENAMENTO DO BIOHIDROGÊNIO

O processo de armazenamento de hidrogênio por compressão envolve custos, e os mesmos devem ser considerados em uma análise que visa comparar os custos da implementação de ônibus que utilizam FC com os tradicionais, que utilizam um MCI a diesel.

Através do site de um fabricante, foram obtidas informações técnicas de um compressor de hidrogênio e o preço de uma estação de abastecimento completa. Esses dados são

apresentados na Tabela 11, e serão utilizados para o cálculo do custo do armazenamento do biohidrogênio.

Tabela 11 - Dados da Estação de Abastecimento

Fabricante: Pure Energy Centre	**Características**	
Preço	168.000,00	[US$]
Pressão	70	[MPa]
Vazão	400	[Nm³/h]
Potência	200	[kW]

Fonte: Pure Energy Centre (2018).

Para o cálculo do custo de armazenamento do biohidrogênio a equação (4.7), proposta por Araujo (2016) foi utilizada. Onde o custo de armazenamento é composto pelos custos de investimento, operação e manutenção. Os valores relacionados ao investimento são calculados através da equação (4.5) e o custo de operação utilizando a equação (4.6).

$$C_{inv} = \frac{I.f}{H.P_{H_2}} \tag{4.5}$$

$$C_{op} = \frac{W_{ele}.T_{ele}}{P_{H_2}} \tag{4.6}$$

Logo o custo de armazenamento do Biohidrogênio pode ser representado pela equação (4.7), abaixo:

$$C_{armaz} = \frac{I.f}{H.P_{H_2}} + \frac{W_{ele}.T_{ele}}{P_{H_2}} + C_{man} \tag{4.7}$$

Onde:

W_{ele}	Potência elétrica consumida pelo compressor	[kW]
T_{ele}	Tarifa da eletricidade ‘	[US$/kWh]

P_{H_2} Potência disponível no hidrogênio [kW]

Considerando que os dois ônibus que compõem a frota sugerida, operam 16 horas por dia, conforme mencionado, calculamos previamente a vazão mássica de Biohidrogênio consumida por cada um dos ônibus da frota. A vazão necessária por dia para os dois ônibus é de aproximadamente 5600 Nm³ de Biohidrogênio. Sabendo que o compressor escolhido para a análise tem a capacidade de comprimir 400 Nm³/h de hidrogênio a 70 MPa, para que supra a necessidade diária de Biohidrogênio comprimido, o compressor precisará funcionar diariamente durante 14 horas, totalizando 4200 horas ao final de um ano (14h/dia, 300 dias por ano). Portanto para o cálculo do custo do investimento do sistema de armazenagem iremos utilizar H=4200 h.

Para que seja possível o cálculo do custo de investimento, ainda é necessário calcular a potência disponível no hidrogênio. A mesma pode ser calculada a partir da equação (4.8).

$$P_{H_2} = \dot{m}_{H_2}.PCI \tag{4.8}$$

Tendo calculado os custos relacionados ao investimento no sistema de armazenamento do Biohidrogênio, podemos prosseguir com os cálculos dos custos de operação e manutenção, que serão demonstrados a seguir.

O custo de operação do sistema de armazenamento de hidrogênio teve como base para cálculo a energia elétrica produzida através de fontes alternativas, eólica e solar. Os valores da tarifa de eletricidade utilizados nos cálculos foram obtidos segundo os valores apresentados por Araujo (2016), oriundos de leilões de energia. Porém tiveram seus valores corrigidos segundo a inflação norte americana acumulada no período. Chegando aos valores de 0,055US$/kWh e 0,067US$/kWh para energia eólica e solar, respectivamente.

A partir da equação (4.6) e conhecendo os valores tarifários da energia elétrica, a potência elétrica consumida pelo compressor e a potência disponível no Biohidrogênio, é possível encontrar os custos de operação do sistema de armazenamento utilizando energia elétrica proveniente de fonte eólica e solar.

Para que o cálculo dos custos relacionados ao sistema de armazenagem do Biohidrogênio esteja completo, é preciso calcular os custos relacionados à manutenção do

sistema. Conforme apresentado por Araujo (2016) o custo de manutenção do sistema de armazenamento (C_{man}) em um ano pode ser estimado em 0,11US$/kg de H_2. Corrigindo esse valor segundo a inflação norte americana acumulada neste período e com base no PCI do hidrogênio, chegamos ao custo de manutenção de 0,0034US$/kWh.

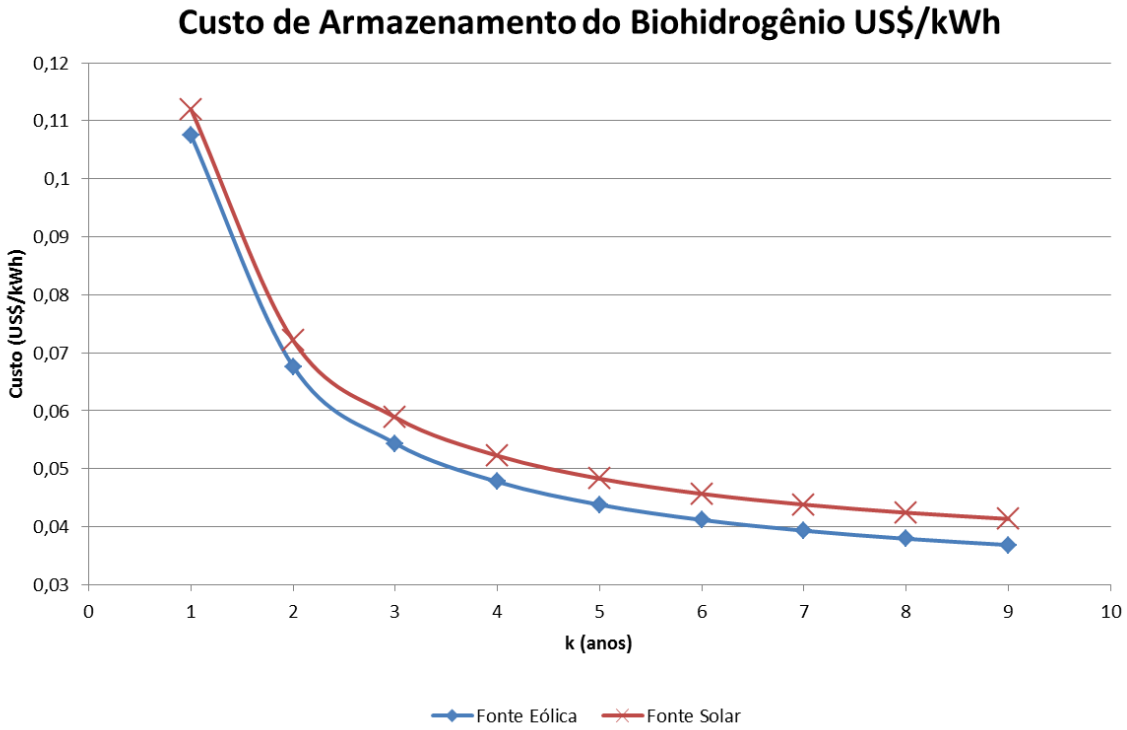
É apresentado na Tabela 12 e a Figura 19 o custo total relacionado ao armazenamento do combustível utilizando o compressor apresentado, operando 4200 horas por ano. Para esse estudo, assim como anteriormente, foi utilizado o período de 1 a 9 anos de amortização de capital.

Tabela 12 - Custos de Armazenamento

Custo Total de Armazenamento [US$/kWh]		
Ano	**Eólico**	**Solar**
1	0,108	0,112
2	0,068	0,072
3	0,054	0,059
4	0,048	0,052
5	0,044	0,048
6	0,041	0,046
7	0,039	0,044
8	0,038	0,042
9	0,037	0,041

Fonte: Elaboração Própria

Figura 19 - Custo de Armazenamento do Biohidrogênio



Fonte: Elaboração Própria

Os resultados referentes às equações (4.5) e (4.6) podem ser verificados em forma de tabelas no APÊNDICE A – Resultados dos custos de investimento e receita anual.

Tendo sido realizados os cálculos para os custos de implementação do sistema de armazenamento, podemos prosseguir com a análise da implementação da frota proposta como um todo.

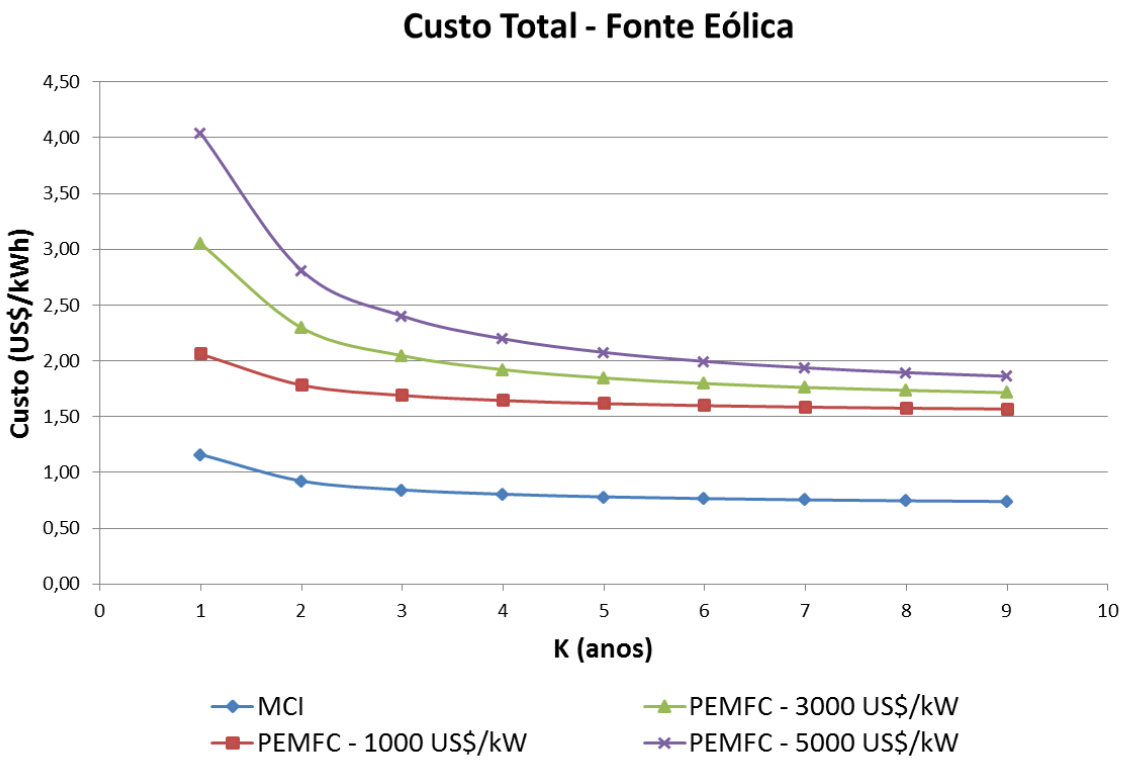
4.3 CUSTOS TOTAL DA IMPLEMENTAÇÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para a análise dos custos de implementação, incluindo o armazenamento do combustível, da pequena frota composta por dois ônibus proposta, que através da energia elétrica proveniente de PEMFC que utiliza biohidrogênio obtido pela reforma a vapor do etanol e tem seu armazenamento realizado pelo processo de compressão utilizando energia elétrica de fontes eólica e solar. A receita anual

desta implementação será comparada com a implementação de dois ônibus com MCI a diesel (sistema mais utilizado na atualidade).

A Figura 20 mostra o custo total da implementação da frota proposta amortizado no período previamente estipulado, utilizando energia elétrica para a compressão do biohidrogênio proveniente de geradores eólicos.

Figura 20 - Custo Total - Fonte Eólica

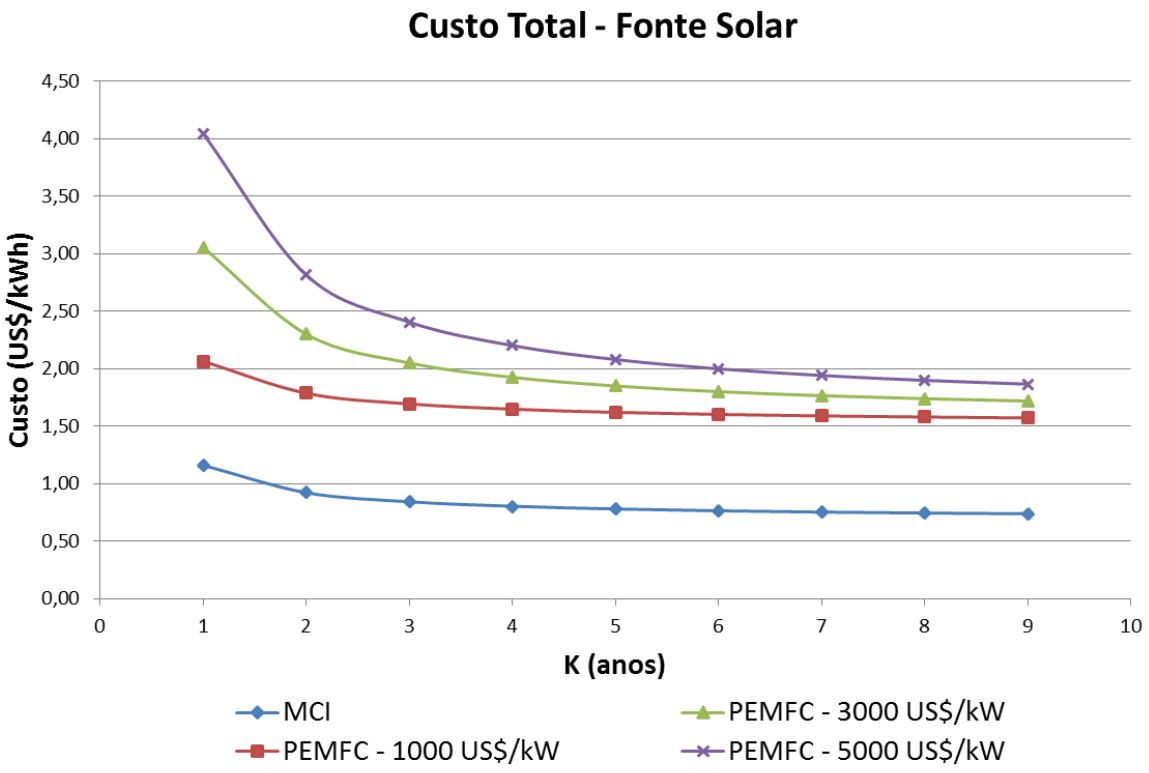


Fonte: Elaboração Própria

Verifica-se que, para nenhum dos casos analisados, a frota se torna economicamente viável no período compreendido.

Na Figura 21 demonstra-se os custos de implementação da frota, porém utilizando-se de eletricidade proveniente de fonte solar para o processo de compressão do combustível.

Figura 21 - Custo Total – Fonte Solar



Fonte: Elaboração Própria

Verifica-se que a variação de fonte de energia elétrica utilizada para armazenamento do biohidrogênio não influencia de uma maneira tão significativa o custo final da utilização da frota proposta. E por este motivo não existem grandes diferenças entre os valores apresentados nas Figura 20 e Figura **21**. Demonstrando que a implementação da frota proposta, utilizando energia elétrica proveniente de fonte solar para abastecimento do biohidrogênio, também não se torna economicamente viável no período de tempo analisado.

Todos os resultados encontrados para os custos totais da implementação, que foram demonstrados graficamente anteriormente, podem ser verificados na forma de tabelas no APÊNDICE A – Resultados dos custos de investimento e receita anual.

Tendo calculado os custos totais da implementação da frota utilizando energia limpa proposta e a frota padrão, que utiliza diesel como combustível, é possível realizar a análise comparativa entre esses gastos. Verificando qual seria o saldo econômico de sua implementação durante os anos.

A economia anual que a implementação da frota proposta geraria será calculada a seguir. Porém para que isso se torne possível, previamente é necessário que seja calculado a quantidade de energia consumida anualmente pela frota. A fórmula desenvolvida para este cálculo do consumo energético da frota é demonstrada a seguir:

$$Cons_{energ} = \dot{m}\left[\frac{kg}{s}\right] . \ PCI \ \left[\frac{kJ}{kg}\right] . H \ [\frac{h}{ano}] \tag{4.9}$$

Foi calculado previamente a vazão mássica de biohidrogênio para cada ônibus (0,00435 kg/s). Sabendo que a frota é composta de dois ônibus que operam 16 horas por dia, durante 300 dias do ano (4800 horas por ano), calculamos que o consumo energético anual previsto para a frota proposta de 5.000.445,96 kWh/ano.

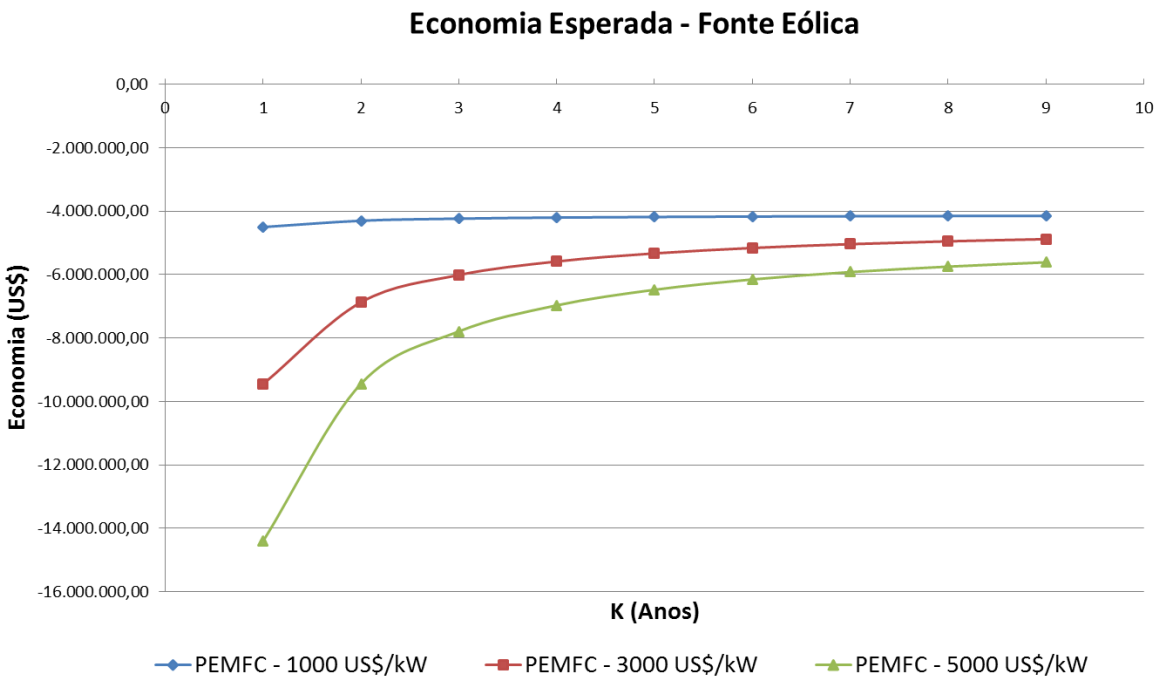
Através da equação (4.10) podemos realizar o cálculo da economia anual esperada com a implementação frota proposta utilizando PEMFC comparativamente com a utilizadora de MCI abastecidos com diesel. O resultados obtidos através da equação (4.10) representarão, quando negativos (eixo y menor que zero), que os gastos operacionais relacionados à implementação da frota utilizando sistema de PEMFC foram maiores do que gastos com frota utilizadora de MCI. Ao se tornar positiva (eixo y maior que zero), a receita passa a significar que os custos com a frota a PEMFC se tornam menores que os custos da frota com MCI, se tornando uma opção viável economicamente.

$$R = \left(C_{\hat{o}nibus_{MCI}} - C_{\hat{o}nibus_{FC}}\right).Cons_{energ} \tag{4.10}$$

Todos os valores para a economia anual esperada podem ser encontrados APÊNDICE A – Resultados dos custos de investimento e receita anual, em forma de tabela.

A economia esperada utilizando fontes eólicas para a geração da energia elétrica utilizada no armazenamento do biohidrogênio é apresentada nas Figura 22.

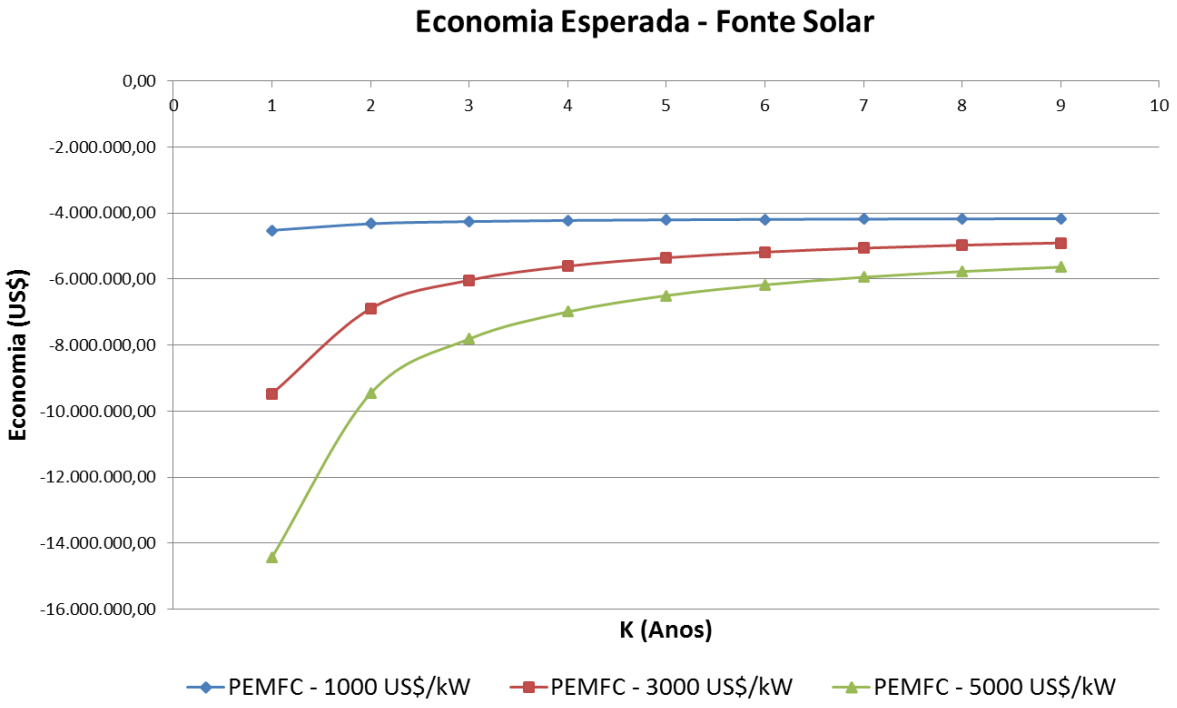
Figura 22 - Economia Anual - Fonte Eólica



Fonte: Elaboração Própria

A economia anual esperada utilizando fontes solares para a geração da energia elétrica utilizada no armazenamento do biohidrogênio é apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Economia Anual - Fonte Solar



Fonte: Elaboração Própria

Analisando os gráficos apresentados nas Figura 22 e Figura **23** verificamos que a implementação da pequena frota composta por dois ônibus que utilizam células a combustível PEM para geração de energia elétrica, alimentadas por biohidrogênio proveniente da reforma a vapor do etanol juntamente com a utilização de energia elétrica de fontes eólica e solar para armazenamento por compressão do combustível, não se torna economicamente viável no período de 9 anos de operação analisado, em comparação com uma frota similar utilizando motores a diesel. Ressalto que esta análise é referente somente a aspectos econômicos, os ganhos em qualidade do transporte, diminuição da emissão de poluentes e todas suas consequências não estão sendo quantificados nem analisados.

4.4 COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO

Em uma análise da composição dos custos para a implementação da frota proposta, verificamos que o armazenamento do biohidrogênio representa de 3 a 13% do custo total de implementação. Outro aspecto notável sobre a composição dos custos de implementação das frotas comparadas, com MCI e PEMFC, é a diferença entre o impacto financeiro relacionado à implementação do sistema e ao custo com o combustível.

Na Tabela 13 podemos verificar a composição, em porcentagem, os custos no decorrer do período de nove anos de amortização do investimento em uma frota utilizando motores a diesel. Desde o primeiro ano os gastos com combustível são os mais relevantes, realizando a comparação com o investimento no sistema de MCI e manutenção. Em seu primeiro ano de operação, os custos com combustível superam os 57% do total, e ao final do período analisado esse custo representa 90% dos gastos com a frota utilizadora de MCI.

Tabela 13 - Composição de Custos - MCI

Frota operando com MCI			
Ano	**Investimento MCI**	**Combustível**	**Manutenção**
1	38,8%	57,4%	3,9%
2	25,3%	72,2%	2,5%
3	19,2%	78,9%	1,9%
4	15,6%	82,8%	1,6%
5	13,4%	85,3%	1,3%
6	11,8%	87,0%	1,2%
7	10,6%	88,3%	1,1%
8	9,7%	89,3%	1,0%
9	9,0%	90,1%	0,9%

Fonte: Elaboração Própria

Ao realizar o mesmo tipo de análise para a implementação da frota utilizadora de sistemas de PEMFC, o resultado encontrado é similar, porém com uma discrepância ainda maior entre o custo relacionado ao combustível e os demais, conforme demonstrado na Tabela 14. Para um melhor efeito comparativo a tabela de composição de custos da implementação

aqui apresentada é referente à implementação da frota utilizando sistema de PEMFC de 1000US$/kW, o menor dos três analisados. No caso mencionado os custos com o combustível representam no primeiro ano de implementação 70% do total dos gastos. Com o decorrer do período de amortização do investimento, os custos com combustível aumentam, atingindo mais de 92% no nono ano. Devido à relação direta do custo de investimento com o de manutenção, a mesma também tem um papel menos representativo.

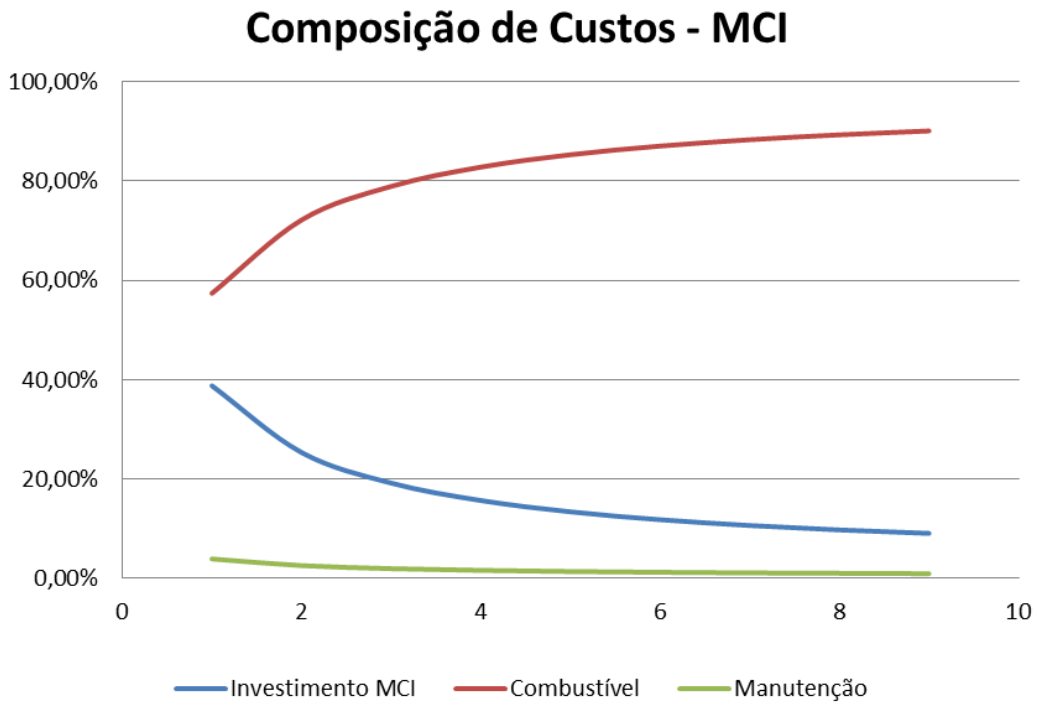
Tabela 14 - Composição de Custos - PEMFC 1000 US$/kW Eólica

Sistema PEMFC 1000US$/kW - Fonte Eólica p/ armazenamento						
	Sistema de FC			Armazenagem		
Ano	**Investimento FC**	**Combustível**	**Manutenção**	**Investimento Armaz.**	**Operação**	**Manutenção Armaz.**
1	21,8%	70,8%	2,2%	4,0%	1,0%	0,2%
2	13,1%	81,8%	1,3%	2,4%	1,2%	0,2%
3	9,6%	86,3%	1,0%	1,8%	1,3%	0,2%
4	7,6%	88,7%	0,8%	1,4%	1,3%	0,2%
5	6,5%	90,2%	0,6%	1,2%	1,3%	0,2%
6	5,6%	91,2%	0,6%	1,0%	1,3%	0,2%
7	5,0%	92,0%	0,5%	0,9%	1,3%	0,2%
8	4,6%	92,5%	0,5%	0,8%	1,3%	0,2%
9	4,3%	93,0%	0,4%	0,8%	1,4%	0,2%

Fonte: Elaboração Própria

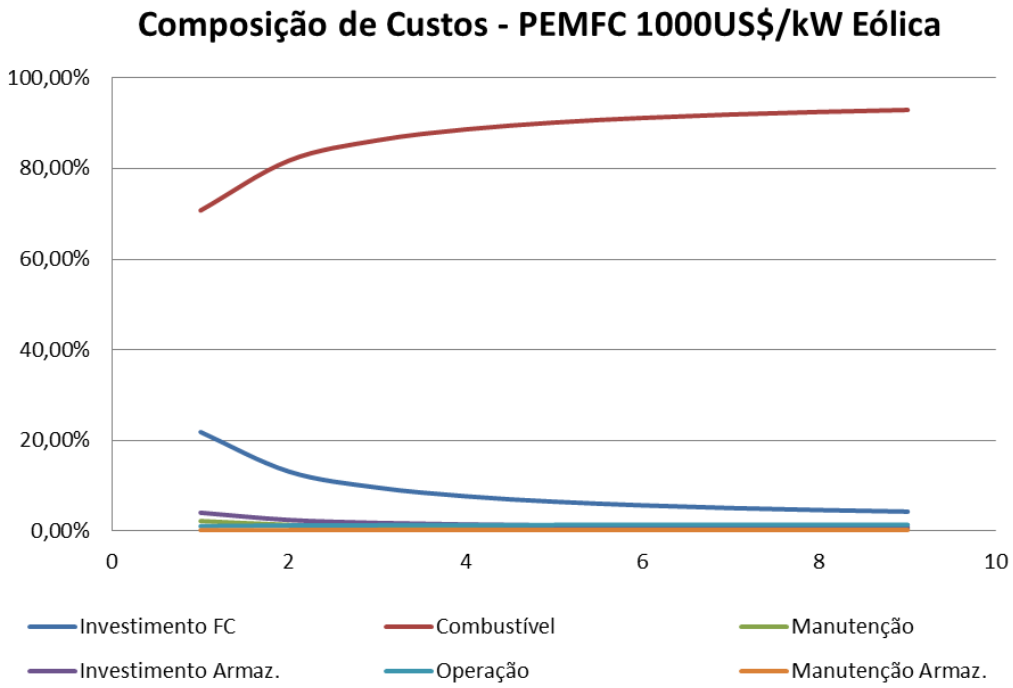
A seguir podemos verificar as mesmas informações das Tabela 13 e Tabela **14**, porém apresentadas graficamente nas Figura 24 e Figura **25**, para um melhor entendimento do comportamento da composição dos custos de implementação das frotas. Apesar dos diversos problemas relacionados do uso de sistemas utilizadores de MCI, o fato do mesmo ser amplamente utilizado na atualidade, faz com que os custos de investimento em sua implementação sejam muito reduzidos. Diferente dos sistemas utilizadores de PEMFC.

Figura 24 - Composição de Custos - MCI



Fonte: Elaboração Própria

Figura 25 - Composição de Custos - PEMFC 1000 US$/kW Eólica



Fonte: Elaboração Própria

Apesar de somente as composições de custos relacionadas aos sistemas utilizadores de MCI e PEMFC de 1000 US$/kW utilizando energia de fonte eólica para o sistema de armazenamento terem sido apresentadas neste capítulo, as tabelas e gráficos de composição de custos de todos os sistemas estudados são apresentadas no APÊNDICE B – Resultados da composição de gastos..

5. CONCLUSÕES

Conclui-se através das análises efetuadas no presente trabalho, que a implementação de uma pequena frota composta por dois ônibus voltados para o transporte coletivo urbano de passageiros, com PEMFC utilizando biohidrogênio proveniente da reforma a vapor do etanol e armazenado por compressão utilizando energia elétrica proveniente de fontes eólica ou solar, não é uma opção viável economicamente em curto prazo.

Apesar dos investimentos analisados em sistemas de PEMFC terem diminuído significativamente no decorrer dos últimos anos, e tenderem a continuar diminuindo, ficando cada vez mais similares e competitivos com os gastos em investimento em sistemas de MCI, quando analisamos a implementação como um todo das frotas analisadas, incluindo os custos com combustível (principal parcela na implementação de uma frota utilizadora de sistema de PEMFC), manutenção e armazenamento do combustível, as frotas abastecidas com biohidrogênio não se demonstram economicamente competitivas. Os gastos com o biohidrogênio são 119% maiores do que os com o diesel.

Pudemos analisar a composição dos custos do investimento para a frota proposta, variando o investimento em sistemas de PEMFC e as fontes de energia elétrica para o armazenamento do biohidrogênio. Verificou-se que para tecnologia mais consolidada e amplamente utilizada (MCI), o investimento no sistema motor dos veículos representa menos de 40% do total dos gastos no primeiro ano, e chega a apenas 9% no nono ano, sendo que o custo do diesel varia de 57 a 90%. Já se tratando da implementação de sistemas de PEMFC, o seu custo pode representar até 21,8% no primeiro ano e atinge 4,3% no nono ano, se tratando do menor investimento estudado. Também para esse caso o custo com o biohidrogênio varia de 70,8 a 93% do total.

A substituição dos veículos movidos a diesel que compõem a frota do transporte coletivo de um grande centro urbano diminuiria muito a emissão de gases poluentes nas regiões metropolitanas, porém o investimento necessário para que isso seja feito muitas vezes é considerado uma barreira para a sua implementação. Investimentos em novas tecnologias sempre serão obstáculos a serem superados, e a partir do momento em que houver mercado suficiente, os gastos com desenvolvimento tecnológico se justificariam e a produção atingiria níveis aceitáveis para a viabilidade financeira.

Recomenda-se uma maior análise dos produtos disponíveis no mercado de compressores de hidrogênio com pressão de saída de 70MPA, devido à grande dificuldade de

obtenção de orçamentos de grandes empresas, os valores utilizados para o estudo dos gastos com o armazenamento do biohidrogênio são provenientes de um único fabricante.

Aconselha-se ainda em um trabalho futuro, a análise dos impactos ambientais da implementação da frota proposta.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **O preço do combustível.** Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp>. Acesso em: 15 nov. 2017.

ARAUJO, F. H. M. **Análise técnica e econômica do armazenamento de hidrogênio por processo de compressão.** 2016. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Câmbio e capitais internacionais**. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/batch/taxas.asp?id=txdolar>. Acesso em: 15 nov. 2017.

BEZMALINOVIC, C.; BARBIR F.; TOLJ, I., Techno-economic analysis of PEM fuel cells role in photovoltaic-based systems for the remote base stations, **International journal of hydrogen energy**, Barcelona, v. 38, n. 1, p. 417 – 425, 2013.

BLOOMBERG MARKETS. **British pound quote**. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/quote/GBPUSD:CUR>. Acesso em: 19 fev. 2018.

BRAGA, L. B.; SOUZA A. C. C.; SILVEIRA J. L.; ANTUNES, J. S. Análise técnica e econômica para o uso de célula a combustível em ônibus. In: Iberoamerican Workshop in Hydrogen and Fuel Cell, 2008, Ubatuba. **Anais**... Taubaté: Revista de Ciências Exatas, UNITAU. v 1, n.1,. p.1-10, 2009.

BRAGA, L. B.; SOUZA A. C. C.; SILVEIRA J. L.; ANTUNES J. S.; ZANZI, R. O uso de célula a combustível em transporte urbano: benefícios do uso de hidrogênio a partir de reforma a vapor de etanol. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 6., 2009, Ubatuba. **Anais...** CLAGTEE, 2009.

BRAGA, L. B. **Análise econômica do uso de célula a combustível para acionamento de ônibus urbano.** 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica. - Departamento de Energia) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

BRAGA, L. B. **Aspectos técnicos, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio**. 2014. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

BRAGA, L. B.; SILVEIRA, J. L.; DA SILVA, M. E.; MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; TUNA, C.E. Comparative Analysis Between a PEM Fuel Cell and an Internal Combustion Engine Driving an Electricity Generator: Technical, Economical and Ecological Aspects. **Applied Thermal Engineering**, Guaratinguetá, v.63, n.1, p. 354-361, 2014.

BUENO, A. G. **A tração elétrica como alternativa para o transporte urbano**. 2004. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Engenharia automotiva) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

EMPRESA METROPOLITANA DE TRANSPORTE. **Ônibus a hidrogênio**. Disponível em: <http://www.emtu.sp.gov.br/emtu/empreendimentos/projetos-de-desenvolvimento-tecnologico/onibus-a-hidrogenio.fss>. Acesso em: 01 out. 2017.

GANDIA, L. M.; GURUTZE A.; PEDRO, M. D. **Renewable hydrogen Technologies:** production, purification, storage, applications and safety. Amsterdam: Elsevier Science, 2013. 460 p.

GOVERNO DO BRASIL**. Economia e emprego**. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/05/etanol-atingiu-producao-recorde-de-30-bilhoes-de-litros-em-2015>. Acesso em: 05 out. 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama de São Paulo.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>. Acesso em: 19 fev. 2017.

INFLATION.EU - WORLDWIDE INFLATION DATA. **Inflação histórica.** Disponível em: <http://pt.inflation.eu/taxas-de-inflacao/estados-unidos/inflacao-historica/ipc-inflacao-estados-unidos.aspx>. Acesso em: 15 nov. 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: Synthesis report.** Disponível em: < http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml>. Acesso em: 07 out. 2017.

LIPMAN, T.; WITT, M.; ELKE, M**.** Lessons learned from the installation and operation of Northern California's first 70-MPa hydrogen fueling station. **International journal of hydrogen energy**, Barcelona, v. 38, n. 36, p. 15868–15877, 2013.

LOPES, D. G. **Análise técnica e econômica da inserção da tecnologia de produção de hidrogênio a partir da reforma de etanol para a geração de energia elétrica com células a combustível**. 2008. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA DO BRASIL**. Balanço energético nacional - relatório final**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 02 out. 2017.

NAKAMURA, A. S. **O uso de células a combustível para acionamento elétrico de ônibus urbano**. 2006. 115 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

PESQUISA FAPESP. **Coletivo a hidrogênio**. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2009/06/01/coletivo-a-hidrogenio/>. Acesso em: 07 nov. 2017.

PREFEITURA DE SÃO PAULO**. Mobilidade e transporte**. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/sptrans/acesso_a_informacao/index.php?p=227887>. Acesso em: 22 out. 2017.

PURE ENERGY CENTRE**. Hidrogen storage**. Disponível em: < https://pureenergycentre.com/hydrogen-storage/>. Acesso em: 17 fev. 2018.

SANTARELLI, M. G. L.; CALI M.; BERTONASCO, A**.** Different Fuelling Technologies for Urban Transport bus Service in an Italian Big Town: Economic, Environmental and Social considerations. **Energy convers manage**, Torino, v. 44, n.14, p353-70, 2002.

SANTOS, F. M.; SANTOS, F. A. **Combustível "hidrogénio"**. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.19/435>. Acesso em: 03 out. 2017.

SILVA, M. E. **Análise experimental da reforma a vapor de etanol: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos.** 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

SILVEIRA, J. L.; GOMES, L. A. Fuel Cell Cogeneration System: A Case of Technoeconomic Analysis. **Renewable & sustainable energy reviews**, Guaratinguetá, v.3, n. 2-3, p. 233-242, 1999.

SILVEIRA, J. L.; BRAGA, L. B.; SOUZA, A. C. C., ANTUNES, J. S.; ZANZI, R. The benefits of ethanol use for hydrogen production in urban transportation. **Renewable & sustainable energy reviews**, Guaratinguetá, v. 13, n. 9, p. 2525 – 2534, 2009.

SPATH, P. L.; MANN, M. K. **Life cycle assessment of a natural gas combined-cycle power generation system.** Colorado: NREL, 2000. 56p.

SPTrans. **Indicadores**. Disponível em: <http://www.sptrans.com.br/indicadores/>. Acesso em: 22 out. 2017.

THE ENGINEERING TOLLBOX. **Fuel higher calorific values.** Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html>. Acesso em: 26 fev. 2018.

TORRES, F. S. **Análise técnica e econômica de células de combustível aplicadas a veículos automotores**. 2002. 82 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2002.

VILELA, I. A. C. **Desenvolvimento de um modelo termodinâmico que considera os impactos ambientais**, 2007. 145f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

WENDT, H.; GÖTZ, M.; LINARDI, M. Tecnologia de células a combustível. **Química nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 538 - 546, 2000.

WORLD ENERGY RESOURCES. **Publications**. Disponível em: < https://www.worldenergy.org/publications/ >. Acesso em: 02 out. 2017.

APÊNDICE A – Resultados dos custos de investimento e receita anual

Tabela de demonstração dos resultados encontrados para fatores de amortização de investimento. Segundo Equações 4.2 e 4.3.

Tabela 15 - Resultados dos Cálculos de Amortização

Cálculo de "q" e "f" (p/ amortização do investimento)		
r = 8		q= 1,0800
k =	1	f1 = 1,0800
	2	f2 = 0,5608
	3	f3= 0,3880
	4	f4= 0,3019
	5	f5= 0,2505
	6	f6= 0,2163
	7	f7= 0,1921
	8	f8= 0,1740
	9	f9= 0,1601

Fonte: Elaboração Própria

Apresentação dos resultados dos custos de investimento.

Tabela 16 - Custos Referentes ao Investimento

Custo de Investimento [US$/kWh]				
Ano	**MCI**	**PEMFC 1**	**PEMFC 2**	**PEMFC 3**
1	0,45000	0,45000	1,35000	2,25000
2	0,23365	0,23365	0,70096	1,16827
3	0,16168	0,16168	0,48504	0,80840
4	0,12580	0,12580	0,37740	0,62900
5	0,10436	0,10436	0,31307	0,52178
6	0,09013	0,09013	0,27039	0,45066
7	0,08003	0,08003	0,24009	0,40015
8	0,07251	0,07251	0,21752	0,36253
9	0,06670	0,06670	0,20010	0,33350

Fonte: Elaboração Própria

Apresentação dos resultados dos custos referentes ao consumo de combustível.

Tabela 17 - Custos Referentes ao Combustível Consumido

Custo de Combustível [US$/kWh]				
Ano	**MCI**	**PEMFC 1**	**PEMFC 2**	**PEMFC 3**
1	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833
2	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833
3	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833
4	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833
5	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833
6	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833
7	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833
8	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833
9	0,66614	1,45833	1,45833	1,45833

Fonte: Elaboração Própria

Apresentação dos resultados dos custos de manutenção.

Tabela 18 - Custos Referentes à Manutenção da Frota

Custo de Manutenção [US$/kWh]				
Ano	**MCI**	**PEMFC 1**	**PEMFC 2**	**PEMFC 3**
1	0,04500	0,04500	0,13500	0,22500
2	0,02337	0,02337	0,07010	0,11683
3	0,01617	0,01617	0,04850	0,08084
4	0,01258	0,01258	0,03774	0,06290
5	0,01044	0,01044	0,03131	0,05218
6	0,00901	0,00901	0,02704	0,04507
7	0,00800	0,00800	0,02401	0,04002
8	0,00725	0,00725	0,02175	0,03625

Fonte: Elaboração Própria

Custo total para a implementação da pequena frota, sem considerar o armazenamento do Biohidrogênio.

Tabela 19 - Custo de Implementação (Sem Armazenamento)

Custo da Frota [US$/kWh]				
Ano	**MCI**	**PEMFC 1**	**PEMFC 2**	**PEMFC 3**
1	1,161	1,953	2,943	3,933
2	0,923	1,715	2,229	2,743
3	0,844	1,636	1,992	2,348
4	0,805	1,597	1,873	2,150
5	0,781	1,573	1,803	2,032
6	0,765	1,557	1,756	1,954
7	0,754	1,546	1,722	1,898
8	0,746	1,538	1,698	1,857
9	0,740	1,532	1,678	1,825

Fonte: Elaboração Própria

Custos de investimento, operação de manutenção relacionados à implementação do sistema de armazenamento do biohidrogênio, utilizando energia elétrica proveniente de fontes eólica e solar para acionamento do compressor.

Tabela 20 - Custos Relacionados ao Armazenamento

Custo de Armazenagem				
Ano	**Cinv**	**Cop Eolico**	**Cop Solar**	**Cman**
1	0,08294	0,02119	0,02568	0,00338
2	0,04307	0,02119	0,02568	0,00338
3	0,02980	0,02119	0,02568	0,00338
4	0,02319	0,02119	0,02568	0,00338
5	0,01924	0,02119	0,02568	0,00338
6	0,01661	0,02119	0,02568	0,00338
7	0,01475	0,02119	0,02568	0,00338
8	0,01336	0,02119	0,02568	0,00338
9	0,01229	0,02119	0,02568	0,00338

Fonte: Elaboração Própria

Custos totais para ambas as fontes de energia elétrica utilizada para o acionamento do sistema de armazenamento do biohidrogênio por compressão.

Tabela 21 - Custo Total do Armazenamento

Custo Total de Armazenamento [US$/kWh]		
Ano	**Eólico**	**Solar**
1	0,108	0,112
2	0,068	0,072
3	0,054	0,059
4	0,048	0,052
5	0,044	0,048
6	0,041	0,046
7	0,039	0,044
8	0,038	0,042
9	0,037	0,041

Fonte: Elaboração Própria

Custos totais para a implementação da frota proposta

Tabela 22 - Custo Total - Fonte Eólica

Custo Total com Armazenamento - Fonte Eólica [US$/Kw]				
Ano	**MCI**	**PEMFC 1**	**PEMFC 2**	**PEMFC 3**
1	1,16114	2,06084	3,05084	4,04084
2	0,92316	1,78298	2,29702	2,81106
3	0,84399	1,69055	2,04624	2,40194
4	0,80452	1,64447	1,92123	2,19799
5	0,78094	1,61693	1,84651	2,07610
6	0,76529	1,59866	1,79694	1,99523
7	0,75418	1,58568	1,76175	1,93781
8	0,74590	1,57602	1,73553	1,89505
9	0,73951	1,56856	1,71530	1,86204

Fonte: Elaboração Própria

Apresentação dos resultados dos custos totais incluindo os relacionados ao armazenamento do biohidrogênio.

Tabela 23 - Custo Total - Fonte Solar

Custo Total com Armazenamento - Fonte Solar [US$/Kw]				
Ano	**MCI**	**PEMFC 1**	**PEMFC 2**	**PEMFC 3**
1	1,16114	2,06534	3,05534	4,04534
2	0,92316	1,78748	2,30152	2,81556
3	0,84399	1,69504	2,05074	2,40644
4	0,80452	1,64896	1,92572	2,20248
5	0,78094	1,62142	1,85101	2,08059
6	0,76529	1,60315	1,80144	1,99973
7	0,75418	1,59018	1,76624	1,94231
8	0,74590	1,58051	1,74003	1,89954
9	0,73951	1,57306	1,71980	1,86654

Fonte: Elaboração Própria

Economia anual esperada com a implementação da frota proposta comparativamente com frota similar utilizadora de MCI, utilizando-se de energia elétrica proveniente de fonte eólica ou solar para armazenagem do biohidrogênio.

Tabela 24 - Economia Anual Esperada - Fonte Eólica

Economia Anual - Eólica [US$]			
Ano	**PEMFC1**	**PEMFC2**	**PEMFC3**
1	-4.498.893,04	-9.449.334,55	-14.399.776,05
2	-4.299.490,65	-6.869.912,20	-9.440.333,75
3	-4.233.154,21	-6.011.799,78	-7.790.445,35
4	-4.200.083,98	-5.584.011,10	-6.967.938,21
5	-4.180.319,91	-5.328.347,71	-6.476.375,52
6	-4.167.208,57	-5.158.742,52	-6.150.276,47
7	-4.157.898,44	-5.038.308,79	-5.918.719,15
8	-4.150.963,68	-4.948.602,47	-5.746.241,26
9	-4.145.612,15	-4.879.376,25	-5.613.140,36

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 25 - Economia Anual Esperada - Fonte Solar

Economia Anual - Solar [US$]			
Ano	**PEMFC1**	**PEMFC2**	**PEMFC3**
1	-4.521.371,09	-9.471.812,60	-14.422.254,10
2	-4.321.968,70	-6.892.390,25	-9.462.811,80
3	-4.255.632,26	-6.034.277,83	-7.812.923,40
4	-4.222.562,03	-5.606.489,15	-6.990.416,26
5	-4.202.797,96	-5.350.825,76	-6.498.853,57
6	-4.189.686,62	-5.181.220,57	-6.172.754,52
7	-4.180.376,49	-5.060.786,84	-5.941.197,20
8	-4.173.441,73	-4.971.080,52	-5.768.719,31
9	-4.168.090,20	-4.901.854,30	-5.635.618,41

Fonte: Elaboração Própria

APÊNDICE B – Resultados da composição de gastos.

Tabelas da composição dos custos para a implementação da frota proposta relacionado à cada sistema estudado.

Tabela 26 - Composição de Custo - MCI

Frota operando com MCI			
Ano	**Investimento MCI**	**Combustível**	**Manutenção**
1	38,8%	57,4%	3,9%
2	25,3%	72,2%	2,5%
3	19,2%	78,9%	1,9%
4	15,6%	82,8%	1,6%
5	13,4%	85,3%	1,3%
6	11,8%	87,0%	1,2%
7	10,6%	88,3%	1,1%
8	9,7%	89,3%	1,0%
9	9,0%	90,1%	0,9%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 27 - Composição de Custo - 1000US$/kW Fonte Eólica

Sistema PEMFC 1000US$/kW - Fonte Eólica p/ armazenamento						
	Sistema de FC			Armazenagem		
Ano	**Investimento FC**	**Combustível**	**Manutenção**	**Investimento Armaz.**	**Operação**	**Manutenção Armaz.**
1	21,8%	70,8%	2,2%	4,0%	1,0%	0,2%
2	13,1%	81,8%	1,3%	2,4%	1,2%	0,2%
3	9,6%	86,3%	1,0%	1,8%	1,3%	0,2%
4	7,6%	88,7%	0,8%	1,4%	1,3%	0,2%
5	6,5%	90,2%	0,6%	1,2%	1,3%	0,2%
6	5,6%	91,2%	0,6%	1,0%	1,3%	0,2%
7	5,0%	92,0%	0,5%	0,9%	1,3%	0,2%
8	4,6%	92,5%	0,5%	0,8%	1,3%	0,2%
9	4,3%	93,0%	0,4%	0,8%	1,4%	0,2%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 28 - Composição de Custo - 1000US$/kW Fonte Solar

Sistema PEMFC 1000US$/kW - Fonte Solar p/ armazenamento

	Sistema de FC			Armazenagem		
Ano	**Investimento FC**	**Combustível**	**Manutenção**	**Investimento Armaz.**	**Operação**	**Manutenção Armaz.**
1	21,8%	70,6%	2,2%	4,0%	1,2%	0,2%
2	13,1%	81,6%	1,3%	2,4%	1,4%	0,2%
3	9,5%	86,0%	1,0%	1,8%	1,5%	0,2%
4	7,6%	88,4%	0,8%	1,4%	1,6%	0,2%
5	6,4%	89,9%	0,6%	1,2%	1,6%	0,2%
6	5,6%	91,0%	0,6%	1,0%	1,6%	0,2%
7	5,0%	91,7%	0,5%	0,9%	1,6%	0,2%
8	4,6%	92,3%	0,5%	0,8%	1,6%	0,2%
9	4,2%	92,7%	0,4%	0,8%	1,6%	0,2%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 29 - Composição de Custo - 3000US$/kW Fonte Eólica

Sistema PEMFC 3000US$/kW - Fonte Eólica p/ armazenamento

	Sistema de FC			Armazenagem		
Ano	**Investimento FC**	**Combustível**	**Manutenção**	**Investimento Armaz.**	**Operação**	**Manutenção Armaz.**
1	44,3%	47,8%	4,4%	2,7%	0,7%	0,1%
2	30,5%	63,5%	3,1%	1,9%	0,9%	0,1%
3	23,7%	71,3%	2,4%	1,5%	1,0%	0,2%
4	19,6%	75,9%	2,0%	1,2%	1,1%	0,2%
5	17,0%	79,0%	1,7%	1,0%	1,1%	0,2%
6	15,0%	81,2%	1,5%	0,9%	1,2%	0,2%
7	13,6%	82,8%	1,4%	0,8%	1,2%	0,2%
8	12,5%	84,0%	1,3%	0,8%	1,2%	0,2%
9	11,7%	85,0%	1,2%	0,7%	1,2%	0,2%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 30 - Composição de Custo - 3000US$/kW Fonte Solar

Sistema PEMFC 3000US$/kW - Fonte Solar p/ armazenamento

	Sistema de FC			Armazenagem		
Ano	**Investimento FC**	**Combustível**	**Manutenção**	**Investimento Armaz.**	**Operação**	**Manutenção Armaz.**
1	44,2%	47,7%	4,4%	2,7%	0,8%	0,1%
2	30,5%	63,4%	3,0%	1,9%	1,1%	0,1%
3	23,7%	71,1%	2,4%	1,5%	1,3%	0,2%
4	19,6%	75,7%	2,0%	1,2%	1,3%	0,2%
5	16,9%	78,8%	1,7%	1,0%	1,4%	0,2%
6	15,0%	81,0%	1,5%	0,9%	1,4%	0,2%
7	13,6%	82,6%	1,4%	0,8%	1,5%	0,2%
8	12,5%	83,8%	1,3%	0,8%	1,5%	0,2%
9	11,6%	84,8%	1,2%	0,7%	1,5%	0,2%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 31 - Composição de Custo - 5000US$/kW Fonte Eólica

Sistema PEMFC 5000US$/kW - Fonte Eólica p/ armazenamento

	Sistema de FC			Armazenagem		
Ano	**Investimento FC**	**Combustível**	**Manutenção**	**Investimento Armaz.**	**Operação**	**Manutenção Armaz.**
1	55,7%	36,1%	5,6%	2,1%	0,5%	0,1%
2	41,6%	51,9%	4,2%	1,5%	0,8%	0,1%
3	33,7%	60,7%	3,4%	1,2%	0,9%	0,1%
4	28,6%	66,3%	2,9%	1,1%	1,0%	0,2%
5	25,1%	70,2%	2,5%	0,9%	1,0%	0,2%
6	22,6%	73,1%	2,3%	0,8%	1,1%	0,2%
7	20,6%	75,3%	2,1%	0,8%	1,1%	0,2%
8	19,1%	77,0%	1,9%	0,7%	1,1%	0,2%
9	17,9%	78,3%	1,8%	0,7%	1,1%	0,2%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 32 - Composição de Custo - 5000US$/kW Fonte Solar

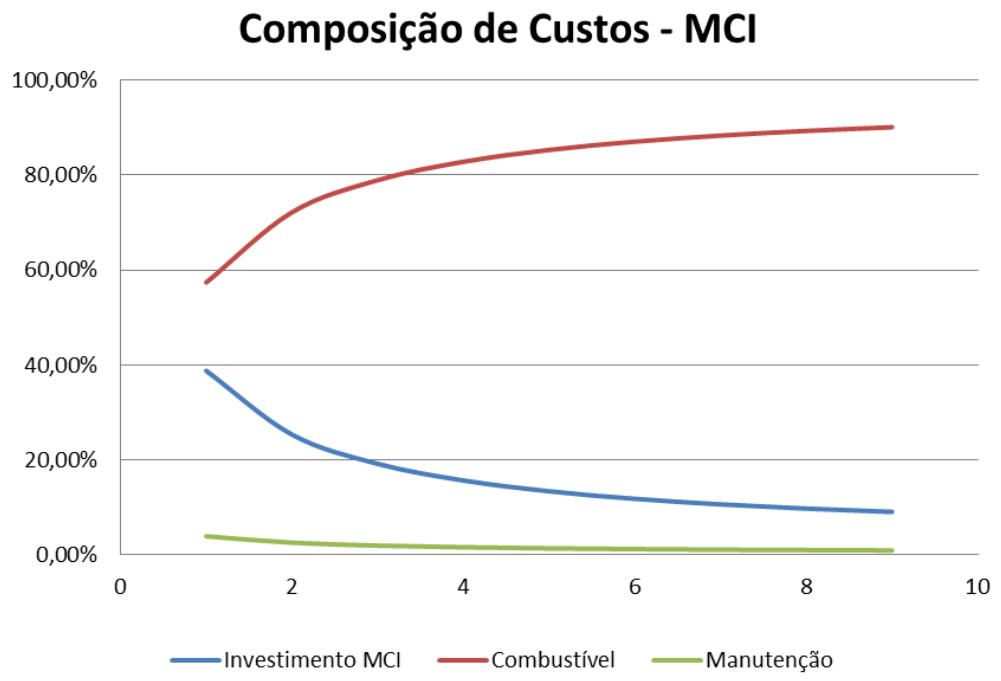
Sistema PEMFC 5000US$/kW - Fonte Solar p/ armazenamento

	Sistema de FC			Armazenagem		
Ano	**Investimento FC**	**Combustível**	**Manutenção**	**Investimento Armaz.**	**Operação**	**Manutenção Armaz.**
1	55,6%	36,0%	5,6%	2,1%	0,6%	0,1%
2	41,5%	51,8%	4,1%	1,5%	0,9%	0,1%
3	33,6%	60,6%	3,4%	1,2%	1,1%	0,1%
4	28,6%	66,2%	2,9%	1,1%	1,2%	0,2%
5	25,1%	70,1%	2,5%	0,9%	1,2%	0,2%
6	22,5%	72,9%	2,3%	0,8%	1,3%	0,2%
7	20,6%	75,1%	2,1%	0,8%	1,3%	0,2%
8	19,1%	76,8%	1,9%	0,7%	1,4%	0,2%
9	17,9%	78,1%	1,8%	0,7%	1,4%	0,2%

Fonte: Elaboração Própria

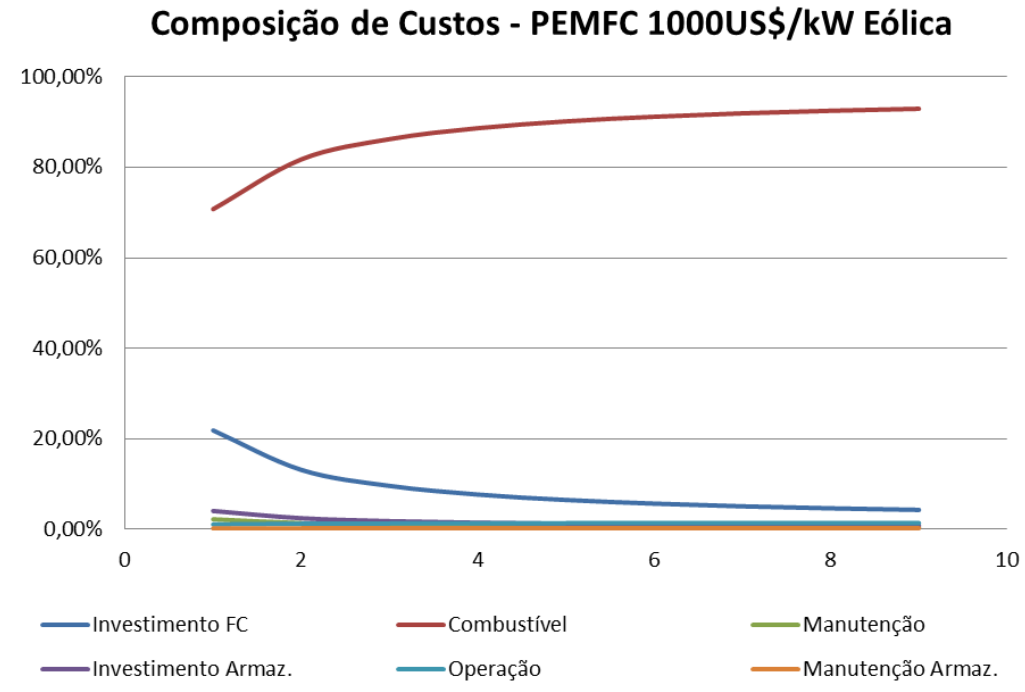
Gráficos da composição dos custos para a implementação da frota proposta relacionado à cada sistema estudado. Representação gráfica das tabelas anteriores.

Figura 26 - Composição de Custo - MCI



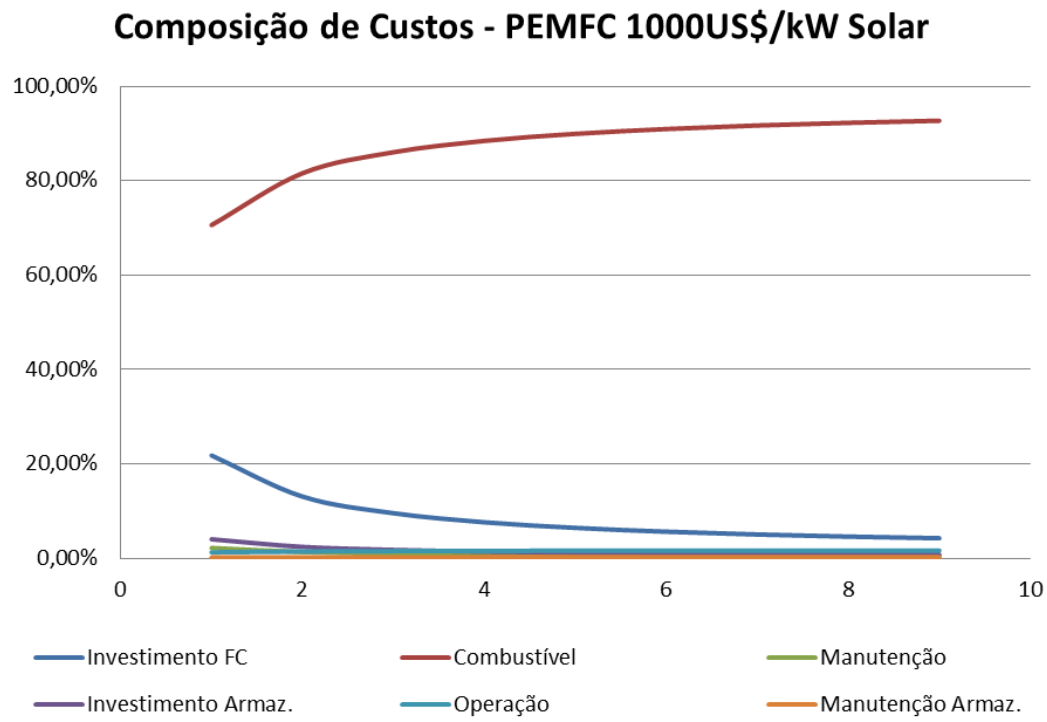
Fonte: Elaboração Própria

Figura 27 - Composição de Custo - 1000US$/kW Fonte Eólica



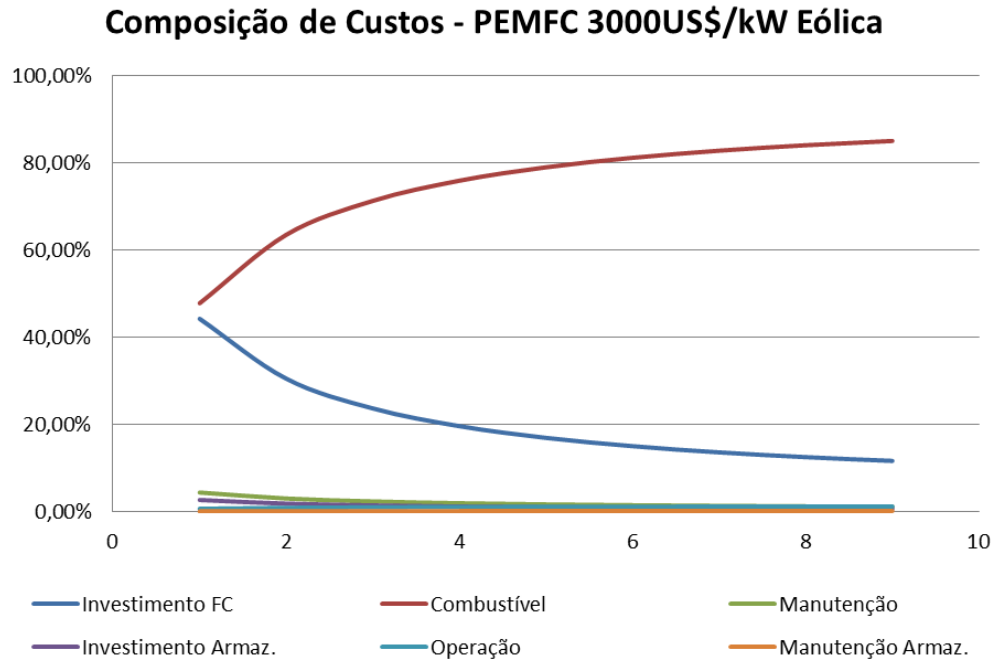
Fonte: Elaboração Própria

Figura 28 - Composição de Custo - 1000US$/kW Fonte Solar



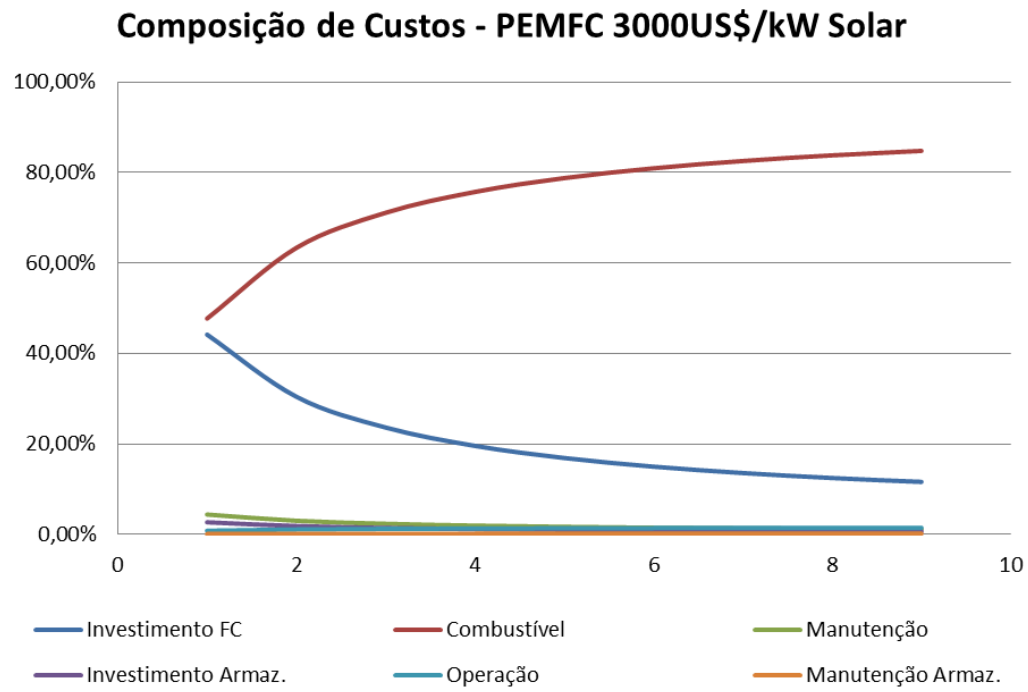
Fonte: Elaboração Própria

Figura 29 - Composição de Custo - 3000US$/kW Fonte Eólica



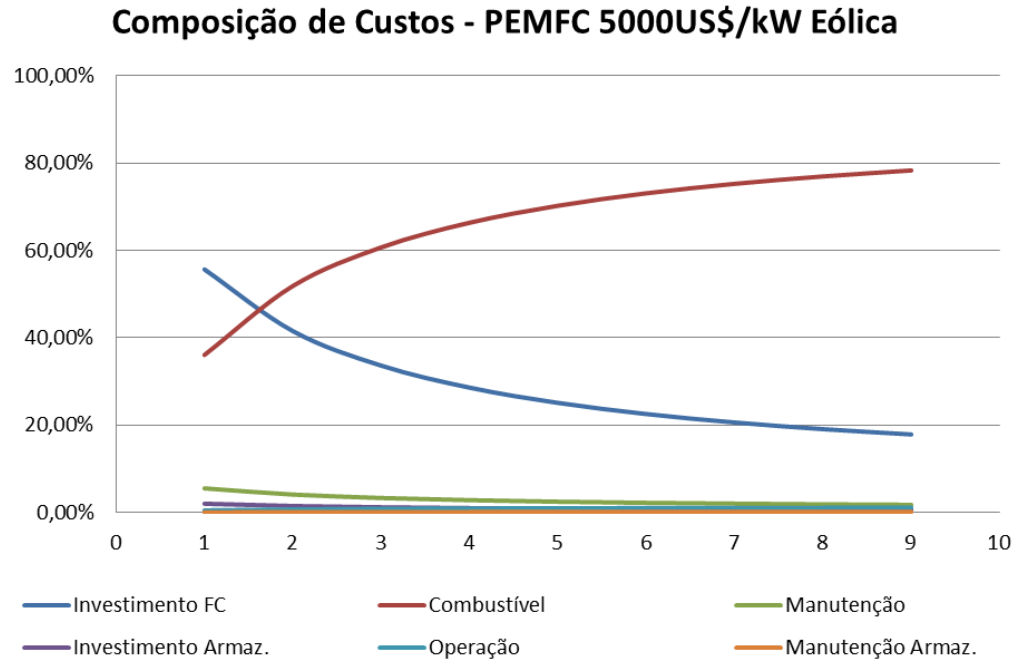
Fonte: Elaboração Própria

Figura 30 - Composição de Custo - 3000US$/kW Fonte Solar



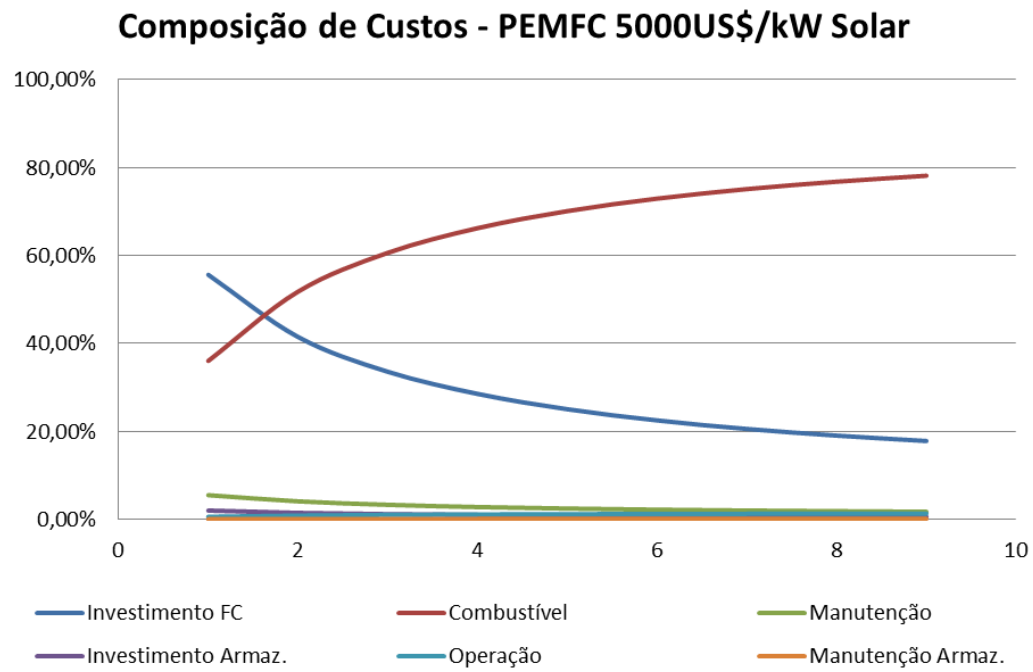
Fonte: Elaboração Própria

Figura 31 - Composição de Custo - 5000US$/kW Fonte Eólica



Fonte: Elaboração Própria

Figura 32 - Composição de Custo - 5000US$/kW Fonte Solar



Fonte: Elaboração Própria