



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

**FERNANDO HENRIQUE MAYWORM DE ARAÚJO**

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DO ARMAZENAMENTO DE  
HIDROGÊNIO POR PROCESSO DE COMPRESSÃO**

**Guaratinguetá**

**2016**

**Fernando Henrique Mayworm de Araújo**

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DO  
ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO POR  
PROCESSO DE COMPRESSÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia do Campus de  
Guaratinguetá, Universidade Estadual  
Paulista, para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica na Área  
de Energia.

**Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira**

Guaratinguetá

2016

A663a Araújo, Fernando Henrique Mayworm de  
Análise técnica e econômica do armazenamento de hidrogênio por  
processo de compressão / Fernando Henrique Mayworm de Araujo –  
Guaratinguetá, 2016.  
74 f : il.  
Bibliografia: f. 70-74

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Engenharia de Guaratinguetá, 2016.  
Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

1. Hidrogênio. 2. Análise energética. 3. Energia – fontes alternativas  
I. Título

CDU 546.11(043)



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

*FERNANDO HENRIQUE MAYWORM DE ARAUJO*

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri  
Coordenador

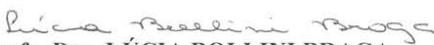
*BANCA EXAMINADORA:*



Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA  
Orientador / UNESP



Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA  
UNESP/FEG

  
Profa. Dra. LÚCIA BOLLINI BRAGA  
EEAER

Setembro de 2016

## DADOS CURRÍCULARES

FERNANDO HENRIQUE MAYWORM DE ARAUJO

NASCIMENTO 05/11/1970 – Piquete/SP

FILIAÇÃO Fernando Campos de Araujo  
Margarete Mayworm de Araujo

1989/1996 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP.

2014/2016 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a meu orientador Prof. Dr. José Luz Silveira, não só pelo apoio na realização deste trabalho, mas sobretudo pela oportunidade que me foi dada de participar de um grupo de pesquisa repleto de pessoas competentes e determinadas no desenvolvimento da ciência.

Aos Professores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá com os quais tive o prazer de conviver durante minha graduação e pós-graduação. A eles reconheço além meu desenvolvimento intelectual, o fortalecimento de meu caráter e de minhas atitudes. Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna por seu auxílio no desenvolvimento deste trabalho e apoio nos momentos de dificuldades.

A todos os funcionários do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho. As pessoas que trabalham na Biblioteca e na Secretaria da Pós-graduação pela gentileza e cordialidade prestados sempre que precisei de auxílio.

Aos meus companheiros de trabalho no LOSE e no IPBEN, com os quais compartilho o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, pela paciência e compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho. A eles mais que agradecer peço desculpas pelas minhas ausências.

A meus pais, responsáveis pelo que sou hoje, pelo apoio em todos os momentos difíceis de minha vida e pelo incentivo no desenvolvimento de meus estudos.

A minha esposa, pelo carinho, paciência e dedicação em todos os momentos.

ARAÚJO, 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.

### **Resumo**

O aumento acelerado da população mundial e o crescente desenvolvimento tecnológico ocorrido nas últimas décadas estão gerando um déficit entre a produção mundial de energia e o consumo. Os efeitos climáticos relacionados ao uso de combustíveis fósseis, tradicionalmente utilizados (em nível mundial) na produção de energia, e a possibilidade de seu esgotamento aceleram as pesquisas e o desenvolvimento de novas formas de produção de energia limpas e renováveis. Uma importante alternativa energética é o hidrogênio. Sua produção por fontes renováveis de energia reduz os impactos ambientais causados pelas emissões de gases provenientes da utilização dos combustíveis de origem fóssil. Neste trabalho são realizados estudos técnicos e econômicos do armazenamento de hidrogênio obtido por eletrólise, por processo de compressão, utilizando a eletricidade proveniente de fontes renováveis (eólica e fotovoltaica). Inicialmente são apresentadas algumas considerações e é feita uma revisão bibliográfica do armazenamento de hidrogênio. Em seguida, é realizada a análise energética da compressão do hidrogênio para a determinação da fração da energia armazenada e gasta no processo, em função do tipo de hidrogênio renovável produzido (Hidrogênio Solar ou Hidrogênio Eólico). Na sequência, é feita a análise exergética da compressão e do armazenamento de hidrogênio, determinando a eficiência exergética do processo de armazenamento para as fontes renováveis consideradas. Posteriormente, efetua-se análise econômica processo para a determinação dos custos, em US\$/kWh de armazenamento para as pressões de 20 e 70 MPa (compressores comercialmente disponíveis) considerando a tarifa de eletricidade produzida pela fonte solar fotovoltaica e eólica.

Em fase final são tecidas as conclusões sobre o ponto vista energético, exergético e econômico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Armazenamento de hidrogênio; Armazenamento por compressão; Análise energética; Análise exergética; Análise econômica, Custo do hidrogênio, Energia renovável.

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.

### **Abstract**

The rapid increase in world population and increasing technological development in recent decades are generating a deficit between world energy production and consumption. The weather effects related to the use of fossil fuels traditionally used (worldwide) in energy production, and the possibility of exhaustion accelerate research and development of new forms of clean and renewable energy production. An important alternative energy source is hydrogen. Its production from renewable energy sources reduces the environmental impact caused by greenhouse gas emissions from the use of fossil fuels. This work carried out technical and economic studies hydrogen storage obtained by electrolysis, compression process using electricity from renewable sources (wind and photovoltaic). Initially are some considerations and a literature review is made of hydrogen storage. Then, the energy analysis of the hydrogen compression is performed to determine the fraction of the stored energy is expended in the process, depending on the type produced renewable hydrogen (Solar Hydrogen or Hydrogen Wind. Following is made exergy analysis Compression and hydrogen storage, determining the exergetic efficiency of the storage process for renewable sources considered. Subsequently, makes up economic analysis process to determine the costs in US\$/kWh storage for pressures of 20 and 70 MPa (commercially available compressors) considering the electricity tariff produced by photovoltaic and solar wind source. In the final phase are woven the conclusions on the energy point of view, exergetic and economic.

**KEYWORDS:** Hydrogen storage; Compression storage; Energetic analysis; Exergetic analysis; Economic analysis Hydrogen cost, Renewable energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema híbrido de geração de energia com armazenamento de hidrogênio. ....	17
Figura 2 - Rotas para produção de hidrogênio renovável.....	21
Figura 3 - Capacidade instalada mundial de produção de energia eólica.....	22
Figura 4 - Coeficiente de potência em função da razão de velocidades.....	24
Figura 5 - Formas de radiação solar. ....	25
Figura 6 - Tempo de descarga e capacidade típica de diferentes tecnologias de armazenamento. ....	27
Figura 7 - Princípio de funcionamento da célula a combustível. ....	28
Figura 8 - Eficiência da célula a combustível e máquinas térmicas.....	31
Figura 9 - Processos de compressão.....	33
Figura 10. Classificação de compressores conforme princípio de operação.....	34
Figura 11 - Gráfico para seleção de compressores.....	35
Figura 12 - Fator de compressibilidade do hidrogênio para pressões entre 0 MPa e 70 MPa. ....	40
Figura 13 - Calor específico a pressão constante do hidrogênio para temperaturas entre 25°C e 450°C.....	43
Figura 14 - Calor específico a volume constante do hidrogênio para temperaturas entre 25°C e 450°C.....	44
Figura 15 - Sistema proposto para análise energética do armazenamento de hidrogênio por compressão. ....	45
Figura 16 - Eletrolizadores comercialmente disponíveis selecionados. ....	46
Figura 17 - Eficiência isentrópica para um compressor recíproco com 95% de eficiência mecânica. ....	48
Figura 18 - Diagrama do sistema de compressão e armazenamento.....	49
Figura 19 - Componentes do sistema de armazenamento considerados na análise exérgica.....	56
Figura 20- Balanço exérgico nos estágios de compressão.....	57
Figura 21 - Balanço exérgico do resfriador intermediário.....	57
Figura 22 - Balanço de exérgia no trocador de calor.....	58
Figura 23 - Custo do armazenamento de hidrogênio utilizando eletricidade de fonte solar em função payback ( $r = 8\%$ ). ....	65
Figura 24 - Custo do armazenamento de hidrogênio utilizando eletricidade de fonte eólica em função payback ( $r = 8\%$ ). ....	65
Figura 25 - Custo do armazenamento a 20 MPa utilizando fonte eólica (4800 h/ano). ....	66

Figura 26 - Custo do armazenamento a 70 MPa utilizando fonte eólica (4800 h/ano). .....	67
Figura 27 - Custo do armazenamento a 70 MPa utilizando fonte eólica, k=5 anos. Influência da taxa de juros. ....	68
Figura 28 - Custo do armazenamento de hidrogênio a 20 MPa considerando um payback de 7 anos e uma taxa de juros de 8% ao ano. ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das células a combustível conforme íon de transferência.....	30
Tabela 2. Aplicação de compressores em processos industriais. ....	37
Tabela 3 - Comparação energética entre diversos combustíveis em base mássica e volumétrica. ....	38
Tabela 4 - Valores da entalpia e da entropia do hidrogênio nas pressões consideradas.....	42
Tabela 5 - Constantes da equação de Chase (1998). ....	43
Tabela 6 - Especificações técnicas de eletrolizadores comercialmente disponíveis. ....	46
Tabela 7 - Especificações técnicas dos compressores selecionados.....	47
Tabela 8 - Potência de eixo obtida para os compressores. ....	48
Tabela 9 - Potência elétrica requerida pelos compressores. ....	49
Tabela 10 - Propriedades termodinâmicas das substâncias nos pontos considerados.....	50
Tabela 11 - Eficiência energética do armazenamento de hidrogênio.....	51
Tabela 12 - Valores típicos de $\varphi$ para alguns combustíveis.....	55
Tabela 13 - Resultados da análise exérgica para os sistemas propostos.....	58
Tabela 14 - Custos dos compressores disponíveis por orçamento dos fabricantes. ....	62
Tabela 15 - Custos dos cilindros de armazenamento disponíveis na literatura. ....	62
Tabela 16 - Consumo de energia elétrica dos compressores. ....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$c_p$	Calor específico a pressão constante	[kJ/kmol.K]
$c_v$	Calor específico a volume constante	[kJ/kmol.K]
$CP$	Coeficiente de potência	[-]
$CO_2$	Dióxido de carbono	[-]
$(CO_2)_e$	Dióxido de carbono equivalente	[kg (CO <sub>2</sub> )e/kg comb]
$H_2$	Hidrogênio	[-]
$H_2O$	Água	[-]
$k$	Razão dos calores específicos	[-]
$O_2$	Oxigênio	[-]
$OH^-$	Íon hidroxila	[-]
$P$	Pressão	[MPa]
$PCI$	Poder calorífico inferior	[kJ/kg]
$Pot$	Potência	[kW]
$R$	Constante universal dos gases	[kPa.m <sup>3</sup> /kmol.K]
$RP$	Razão de pressão	[-]
$T$	Temperatura	[K]
$T_E$	Temperatura na entrada do processo	[K]
$T_m$	Temperatura média	[K]
$T_S$	Temperatura na saída do processo	[k]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$W$	Trabalho	[kW]
$W_A$	Trabalho adiabático	[kW]
$W_{AGR}$	Trabalho adiabático de um gás real	[kW]
$Z$	Fator de compressibilidade	[-]
$Z_{MED}$	Fator de compressibilidade médio	[-]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\Delta G$	Varição da energia livre de Gibbs	[kJ/kmol]
$\Delta H$	Varição de entalpia	[kJ/kmol]

$\varepsilon$	Eficiência ecológica	[-]
$\Pi_g$	Indicador de poluição	[kg (CO <sub>2</sub> )e/MJ]
$\eta_{ISO}$	Eficiência isentrópica	[-]
$\rho_{AR}$	Massa específica do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	Volume específico	[m <sup>3</sup> /kg]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	MATERIAIS E MÉTODOS	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO RENOVÁVEL POR COMPRESSÃO</b>	<b>19</b>
2.1	PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ENERGIA RENOVÁVEL	19
<b>2.1.1</b>	<b>Produção de Hidrogênio pela Eletrólise da Água</b>	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Produção de Eletricidade por Fonte Eólica</b>	<b>22</b>
2.1.2.1	Produção de Eletricidade por Fonte Solar	24
2.2	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	26
2.3	CÉLULAS A COMBUSTÍVEL	27
<b>2.3.1</b>	<b>Eficiência de células a combustível</b>	<b>30</b>
2.4	ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO POR COMPRESSÃO	31
<b>2.4.1</b>	<b>Processos de compressão</b>	<b>32</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Compressores para hidrogênio</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>ANÁLISE ENERGÉTICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO POR COMPRESSÃO</b>	<b>38</b>
3.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DO HIDROGÊNIO	39
<b>3.1.1</b>	<b>Equação de estado</b>	<b>39</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Equação do calor específico</b>	<b>42</b>
3.2	DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO	44
<b>3.2.1</b>	<b>Parâmetros do sistema</b>	<b>45</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Potência de eixo</b>	<b>47</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Potência elétrica</b>	<b>49</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Calor cedido no resfriamento intermediário</b>	<b>49</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Eficiência energética</b>	<b>51</b>

<b>4</b>	<b>ANÁLISE EXERGÉTICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO POR COMPRESSÃO</b>	<b>52</b>
4.1.1	Exergia física específica	54
4.1.2	Exergia química específica	54
4.2	ANÁLISE EXERGÉTICA DO SISTEMA	55
4.2.1	Balço de exergia no estágio de compressão	57
4.2.2	Balço de exergia no resfriador intermediário	57
4.2.3	Balço de exergia no trocador de calor	58
4.3	EFICIÊNCIA EXERGÉTICA DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO	58
<b>5</b>	<b>ANÁLISE ECONÔMICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO</b>	<b>60</b>
5.1	CUSTO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	60
5.2	PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE ECONÔMICA	61
5.3	RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO	64
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>70</b>
6.1	CONCLUSÕES	70
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido aos crescentes níveis das emissões de gases de efeito estufa é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para a geração de energia que sejam ambientalmente mais limpas e sustentáveis. Nesse sentido, fontes de energia renováveis, como energia solar e eólica tem um grande potencial de aumento de suas participações na geração global. Entretanto, devido às características intermitentes da disponibilidade dos recursos naturais, sua utilização não é simples.

Para que a utilização de fontes de energias renováveis ocupe uma parcela maior na geração global de energia, alguns aspectos necessitam de aperfeiçoamentos, entre os quais, a conexão da energia gerada com as redes de distribuição de eletricidade. Devido às características intermitentes das fontes renováveis, é necessário garantir maiores níveis de confiabilidade na disponibilidade da energia gerada.

Uma pequena participação das fontes de energia renováveis em grandes redes de distribuição de eletricidade pode ser equilibrada pela geração de energia convencional. Mas para uma porcentagem mais elevada de participação é necessário desenvolver sistemas de armazenamento de energia capazes de equilibrar a produção e o consumo. (GAO et al., 2014).

Diversas alternativas para o armazenamento energético podem ser utilizadas, como sistemas de armazenamento em baterias ou em ar comprimido, mas para o armazenamento de grandes quantidades de energia e por longos períodos o uso do hidrogênio se destaca entre elas.

A eletricidade excedente produzida por fontes renováveis pode ser convertida em hidrogênio por meio da eletrólise da água. O hidrogênio produzido deste modo pode ser armazenado por compressão em tanques a alta pressão e quando o consumo aumentar, ou a produção diminuir, ele é reconvertido em eletricidade com a utilização de células a combustível.

A maior parte da energia global consumida no setor de transportes vem de combustíveis fósseis. O petróleo representa aproximadamente 92% da demanda, o gás natural 5% e a eletricidade 3% (SOBRINO et al., 2010). O aumento da participação de veículos elétricos na frota mundial é apontado como uma das soluções para a emissão de gases poluentes causada por este setor.

Veículos elétricos podem utilizar baterias para o armazenamento de energia. Apesar de eficiente, a tecnologia atual limita a autonomia desses veículos. O uso de células a

combustível e hidrogênio comprimido para produzir eletricidade tem se mostrado uma alternativa melhor e capaz de solucionar o problema da autonomia.

De acordo com Alazemi e Andrews (2015), em 2013 já haviam 224 postos de abastecimento de hidrogênio para uso veicular, distribuídos por 28 países. Cerca de 43% desses postos estavam localizados na América do Norte, 34% na Europa e 23% na Ásia.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver a análise técnica e econômica do processo de armazenamento de hidrogênio por compressão, com ênfase ao armazenamento do hidrogênio obtido pela eletrólise da água em plantas de pequena e média capacidade de produção.

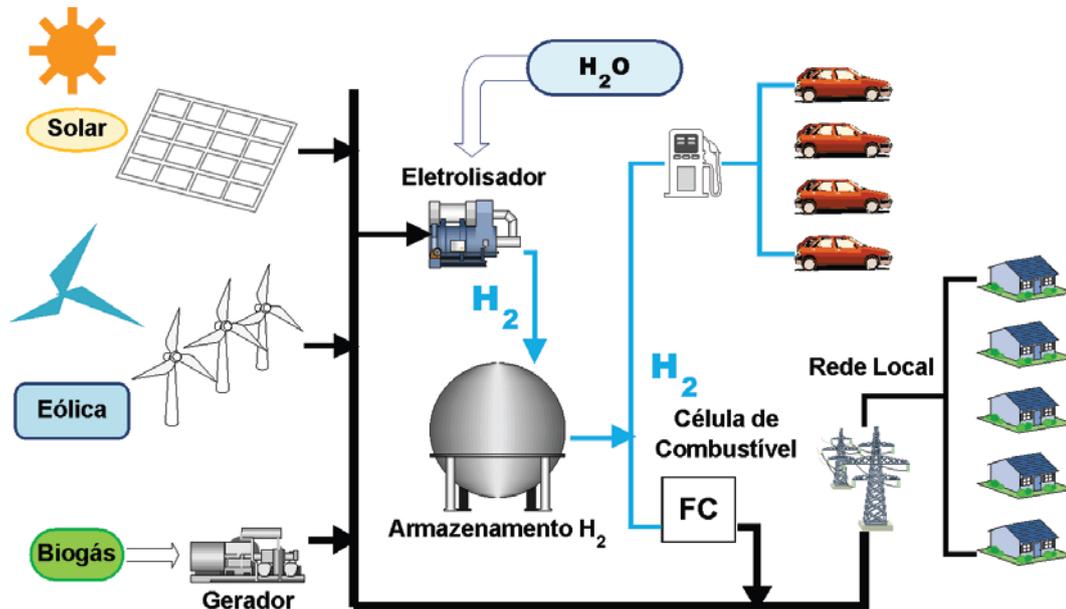
Os objetivos específicos são:

- Investigar os principais processos de compressão do hidrogênio e o efeito da pressão na temperatura e na eficiência do processo de armazenamento;
- Efetuar a análise energética e a exergética do processo selecionado e determinar as eficiências associadas ao processo de armazenamento;
- Realizar a análise econômica do sistema de armazenamento de hidrogênio utilizando método de engenharia econômica, para a determinação do custo do processo de armazenamento, e de sua parcela de contribuição do custo final no hidrogênio como vetor energético.

## **1.2 Materiais e Métodos**

Neste trabalho é proposto um sistema de armazenamento de hidrogênio por compressão utilizando a eletricidade produzida de fontes renováveis de energia (solar, eólica). Inicialmente é realizada a análise energética desse sistema para determinar a fração de energia utilizada no processo de compressão em relação a energia total armazenada . Os componentes do sistema são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Sistema híbrido de geração de energia com armazenamento de hidrogênio.



Fonte: Elaboração própria.

O excedente da eletricidade produzida pelos painéis fotovoltaicos e pelos geradores eólicos na Figura 1, nos períodos de maior disponibilidade dos recursos naturais, é utilizado para a produção e armazenamento de hidrogênio. No período de maior consumo ou de menor geração o hidrogênio é utilizado para gerar eletricidade em uma célula a combustível para estabilizar o fornecimento de energia elétrica do sistema. Além disso, parte do hidrogênio armazenado é utilizado para abastecer veículos elétricos com células a combustível.

A análise energética do sistema de armazenamento de hidrogênio é realizada para as pressões de 20 MPa e 70 MPa. Para a determinação da potência elétrica consumida no processo e sua relação com o aumento da pressão. Os parâmetros para a análise foram obtidos de equipamentos comercialmente disponíveis.

Em seguida, é realizada a análise exérgica do sistema para a determinação da eficiência racional do processo.

Finalizando, aplica-se a análise econômica do processo de armazenamento utilizando a eletricidade proveniente de fonte solar e eólica para a determinação do custo de armazenamento por compressão e sua influência no custo final do hidrogênio obtido pela eletrólise da água.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é dividida em seis capítulos, conforme descreve-se a seguir:

O primeiro capítulo apresenta as considerações iniciais do trabalho, seus objetivos e os materiais e métodos empregados para a sua realização.

O segundo capítulo refere-se ao estado da arte do processo de armazenamento de hidrogênio por compressão e sua utilização em plantas de geração de energia renovável (solar eólica), como forma de aumentar o fornecimento garantido de eletricidade do empreendimento. Em seguida são apresentados os processos de compressão e os compressores associados à compressão de hidrogênio.

No terceiro capítulo um processo de compressão adiabático é utilizado para modelar um equipamento e realizar a análise energética do ciclo com o objetivo de determinar a energia empregada no processo por quilograma de hidrogênio armazenado.

No quarto capítulo é efetuada a análise exérgica do armazenamento de hidrogênio para a determinação da irreversibilidade do processo.

A seguir, no quinto capítulo é determinado o custo do armazenamento do hidrogênio em US\$/kWh. Os resultados obtidos são comparados com o custo do hidrogênio proveniente de fontes renováveis de energia obtidos em pesquisas previamente realizadas.

Finalmente, no sexto capítulo, apresentam-se as principais conclusões obtidas e os pontos relevantes da contribuição científica deste trabalho, assim como sugestões para futuros estudos relacionados ao tema proposto.

## **2 ESTADO DA ARTE DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO RENOVÁVEL POR COMPRESSÃO**

O aumento acelerado da população mundial e o crescente desenvolvimento tecnológico ocorrido nas últimas décadas estão gerando um déficit entre a produção mundial de energia e o consumo. A maior parte da energia produzida no mundo provém de recursos não renováveis, principalmente de combustíveis fósseis. A possibilidade de escassez desses recursos tem alterado o planejamento em relação ao futuro do cenário energético mundial. Além disso, diversos efeitos climáticos relacionados ao aquecimento da superfície da Terra tais como: secas, chuvas extremas, ondas de calor e furacões, que vem ocorrendo nas últimas décadas em todo o mundo agravaram a preocupação da humanidade com o impacto ambiental das emissões associadas ao uso desses combustíveis e estão acelerando as pesquisas e o desenvolvimento de novas formas de produção de energia limpa e renováveis (HOSSEINI; WAHID, 2016). O quarto relatório de avaliação (AR4) do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças do Clima (IPCC), afirma que desde meados do século 20, a grande concentração de gases de efeito de estufa antropogênico (GEE) na atmosfera é o responsável pelo aumento da temperatura global (IPCC, 2007).

A possibilidade de, um esgotamento iminente dos combustíveis fósseis ocasionado pela crescente demanda por energia e os efeitos adversos das mudanças climáticas ocasionados pelas emissões associadas ao uso desses combustíveis tornaram-se um dos principais desafios a serem resolvidos pela humanidade (MURADOV; VEZIROGLU, 2008).

É nesse cenário de preocupações ambientais e econômicas que cresce o interesse por combustíveis alternativos. Um combustível que vem se destacando nesse sentido é o hidrogênio.

### **2.1 Produção de Hidrogênio por Energia Renovável**

Devido à sua natureza altamente reativa o hidrogênio não existe no estado livre na natureza, é sempre encontrado em combinação com outros elementos. O hidrogênio é abundantemente disponível em fontes naturais, como hidrocarbonetos, água e biomassa, que são as principais matérias primas para sua produção (CHAUBEY *et al.*, 2013).

De acordo com Silveira (2016) baseado na natureza do processo de produção e/ou na forma da energia utilizada os processos de produção de hidrogênio podem ser classificados em três grandes categorias: termoquímico, eletroquímico e fotolíticos.

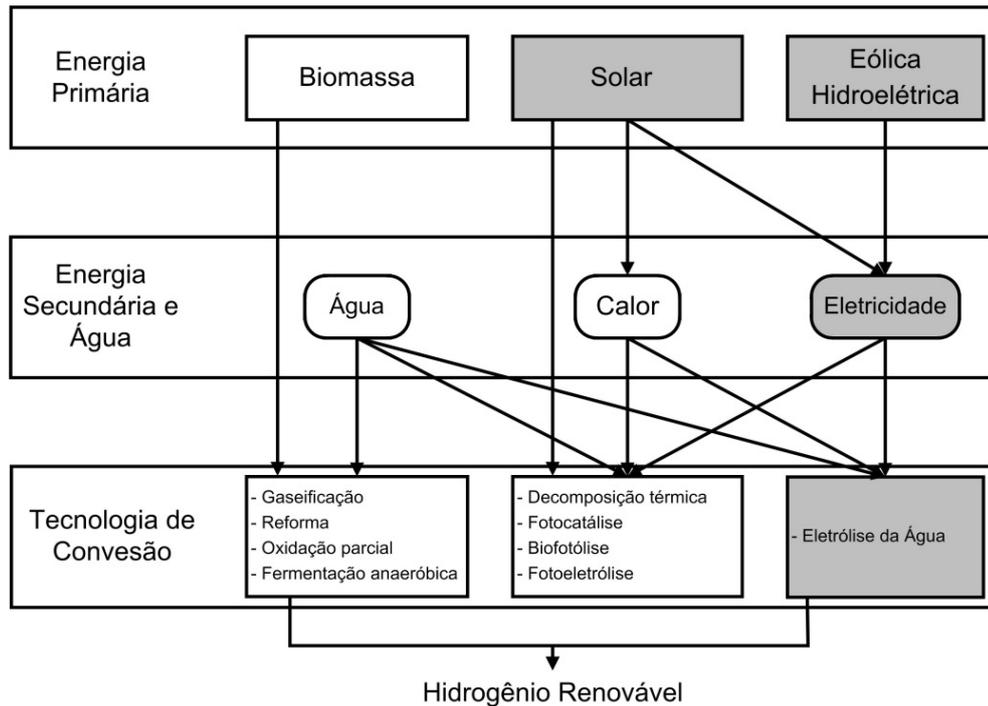
Os processos termoquímicos envolvem a separação do hidrogênio, principalmente em matérias primas de origem fóssil, utilizando reações químicas oxidativa ou não-oxidativas e energia térmica produzida externamente ou internamente. Os principais processos termoquímicos para produção de hidrogênio são: gaseificação de biomassa e pirólise, reforma a vapor, oxidação parcial, reforma autotérmica e reforma oxidativa (SILVEIRA, 2016).

Os processos eletrolíticos envolvem a utilização de energia elétrica ou térmica para promover a reação química de decomposição da molécula de água em hidrogênio e oxigênio. Os principais exemplos de processos eletrolíticos são a eletrólise da água (processo convencional) e a termólise (eletrólise a vapor).

Os processos fotolíticos envolvem tecnologias que utilizam a energia da luz e seus principais exemplos são os sistemas fotobiológicos e fotoeletroquímicos (Braga, 2010). No processo fotoeletroquímico, a energia solar é convertida em energia química na forma de hidrogênio através da fotoeletrólise, a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio utilizando a luz solar, essa é considerada uma das tecnologias mais promissoras para a produção de hidrogênio (CHAUBEY *et al.*, 2013).

O uso de fontes renováveis de energia faz com que sua produção seja um processo sustentável e, dependendo do recurso empregado, de baixos níveis de emissões de poluentes. Na Figura 2 são apresentadas as principais rotas de produção de hidrogênio renovável (GANDIA; GURUTZE; PEDRO, 2013).

Figura 2 - Rotas para produção de hidrogênio renovável.



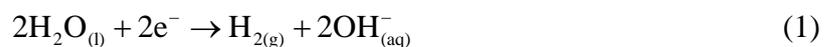
Fonte: (GANDIA; GURUTZE; PEDRO, 2013).

### 2.1.1 Produção de Hidrogênio pela Eletrólise da Água

De acordo com Furlan (2008), a eletrólise é um processo eletroquímico de dissociação da água, onde os produtos finais das reações desencadeadas são o hidrogênio e o oxigênio.

Essa reação é iniciada pela aplicação de uma diferença de potencial (tensão contínua) entre dois eletrodos (catodo e anodo) imersos em um meio condutor iônico líquido (solução aquosa ácida ou básica) ou sólido (membranas poliméricas ou cerâmicas permiônicas). Quando a força eletromotriz fornecida atinge um potencial mínimo ocorre a passagem de corrente elétrica entre os eletrodos, desencadeando a reação eletrolítica e formando hidrogênio no catodo (redução) e oxigênio no anodo (oxidação). Para um meio condutor básico a reação é representada pelas equações (1), (2) e (3).

- Catodo



- Anodo



- Global



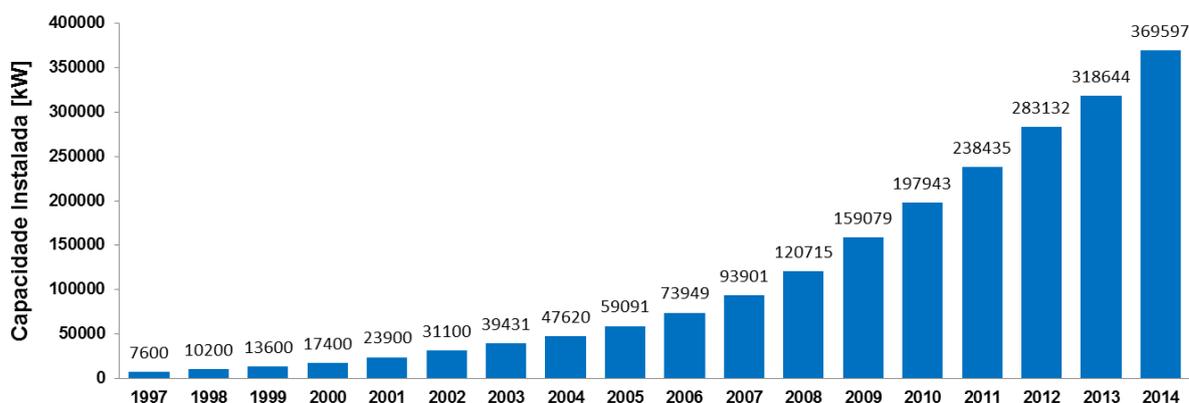
De acordo com Sørensen (2012), à pressão de 102,325 kPa e à temperatura de 25°C, a variação da entalpia ( $\Delta H$ ) e a variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) para a reação são iguais a -288 kJ/mol e 236 kJ/mol, respectivamente. Isso faz com que o processo de eletrólise necessite de uma quantidade mínima de eletricidade de 236 kJ/mol (SØRENSEN, 2012). Isso mostra que a produção de hidrogênio por eletrólise da água demanda uma grande quantidade de eletricidade.

### 2.1.2 Produção de Eletricidade por Fonte Eólica

A utilização da energia eólica para a produção de trabalho mecânico é muito antiga. Os primeiros registros históricos da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos apontam à Pérsia, por volta de 200 A.C. No final do século XIX, um cata-vento foi utilizado pela primeira vez para a produção de energia elétrica (SHEPHERD, 1994).

Nas últimas décadas, a capacidade instalada para produção de energia eólica tem tido um expressivo aumento. Na Figura 3 é apresentada a capacidade instalada de produção desde 1997 a 2014.

Figura 3 - Capacidade instalada mundial de produção de energia eólica.



Fonte: (GWEC, 2014).

Apesar da capacidade mundial instalada ser atualmente de 369.597 MW, o vento é um recurso natural sujeito a imprevisibilidades. Nem toda essa disponibilidade de produção consegue ser efetivamente aproveitada.

Uma turbina eólica capta a energia cinética do vento em um rotor e a transfere, na forma de potência mecânica, ao eixo de acionamento de um gerador elétrico.

O fluxo mássico de ar que atravessa um disco de área transversal  $A$  é determinado pela equação de continuidade da mecânica dos fluidos. A taxa de fluxo mássico é função da massa específica do ar ( $\rho_{AR}$ ) e da velocidade do ar ( $V_{AR}$ ), considerada constante, equação (4).

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{AR} \cdot A \cdot V \quad (4)$$

A energia cinética por unidade de tempo (potência) produzida pelo fluxo de ar a montante da seção transversal é fornecida pela equação (5) (PATEL, 2006).

$$Pot = \frac{1}{2} \cdot \rho_{AR} \cdot A \cdot V^3 \quad (5)$$

Ao passar através das pás do rotor, a velocidade do fluxo de ar é reduzida de  $V$  para  $V_o$  e é produzida potência mecânica no eixo do rotor. A potência transferida ao eixo é dada pela equação (6).

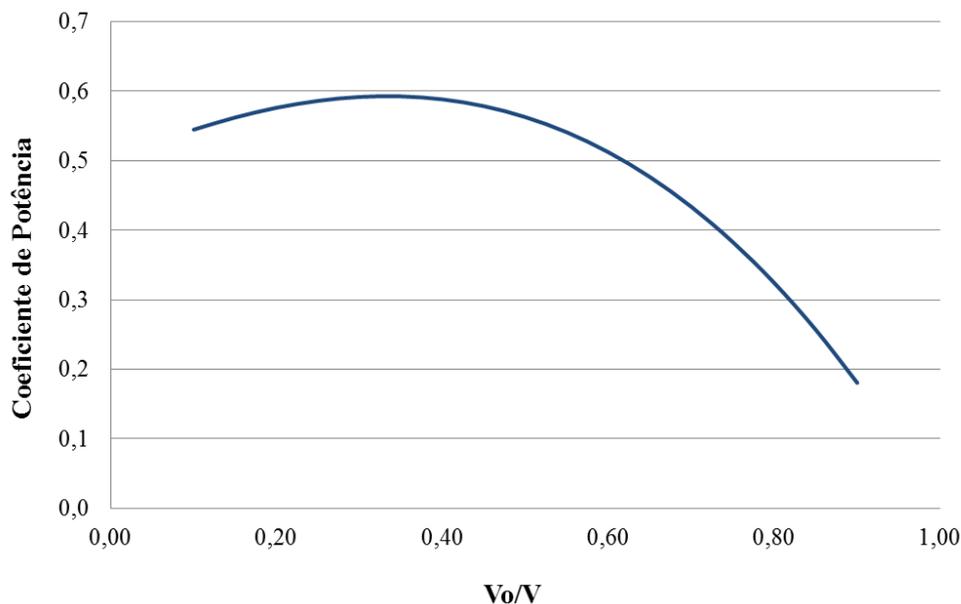
$$Pot = \frac{1}{2} \cdot \rho_{AR} \cdot A \cdot V^3 \cdot \frac{\left(1 + \frac{V_o}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_o}{V}\right)^2\right]}{2} \quad (6)$$

A potência extraída pelas pás é normalmente expressa como uma fração da potência disponível no fluxo de ar. Essa fração é denominada coeficiente de potência ( $CP$ ). Assim, a potência extraída pelas pás pode ser determinada pela equação (7).

$$Pot = \frac{1}{2} \cdot \rho_{AR} \cdot A \cdot V^3 \cdot CP \quad (7)$$

Na Figura 4 é mostrado o gráfico da variação do coeficiente de potência em função da razão de velocidades ( $V_0/V$ ). Observa-se que o valor máximo teórico do coeficiente de potência é 0,59.

Figura 4 - Coeficiente de potência em função da razão de velocidades.



Fonte: (PATEL, 2006), modificada pelo autor.

Entretanto, para equipamentos reais, o valor máximo do coeficiente de potência pode variar entre 0,4 e 0,5 para rotores de duas pás modernos de alta velocidade, e entre 0,2 e 0,4 para turbinas de baixa velocidade com mais pás (PATEL, 2006).

#### 2.1.2.1 Produção de Eletricidade por Fonte Solar

A energia fornecida pelo sol à superfície da Terra, na forma de radiação solar, é de aproximadamente  $1,2 \times 10^{14}$  kW (DUFFIE & BECKMAN, 2006).

Dentre as várias formas de aproveitamento dessa energia solar, encontra-se a solar fotovoltaica. Essa tecnologia permite a conversão direta da luz em eletricidade aproveitando o efeito fotovoltaico presente em alguns materiais semicondutores. O cientista francês Edmond Becquerel descobriu esse fenômeno físico no ano de 1839, porém foi a partir 1958 que se iniciou a utilização de células fotovoltaicas em aplicações práticas específicas na indústria espacial (BARRETO *et al.*, 2008).

Radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. A irradiação é a energia

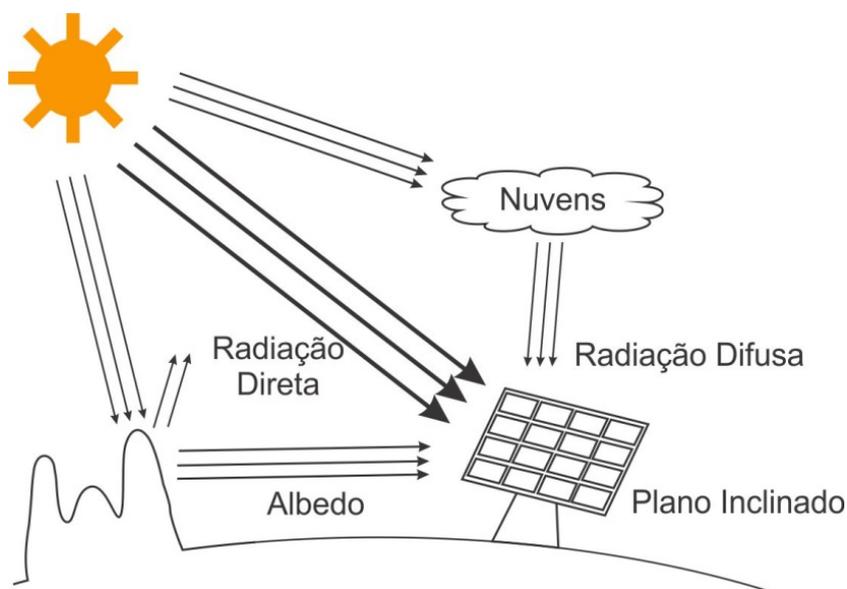
incidente por unidade de superfície integrada sobre o tempo e é medida em  $\text{Wh/m}^2$  (DUFFIE & BECKMAN, 2006).

A irradiação solar que atinge a camada atmosférica da Terra é denominada irradiação extraterrestre. Devido à excentricidade da trajetória da Terra ao redor do Sol, o valor da irradiação extraterrestre varia ao longo do ano.

A radiação solar que atinge um objeto inclinado na superfície terrestre pode ser dividida em três componentes básicas. A radiação direta, que é a componente que atravessa a atmosfera e percorre em linha reta desde o disco solar até atingir um objeto no solo. A “radiação difusa”, componente que após se espalhar na atmosfera ou ser absorvida pelas nuvens, chega a um objeto no solo. Por fim, a radiação que atinge a superfície da terra e é refletida pelo solo ou por outros objetos na superfície terrestre atingindo um objeto inclinado na superfície é denominada albedo (SILVA, 2010).

A radiação total que incide sobre um objeto inclinado em relação ao solo é o resultado da soma das três componentes. Na Figura 5 pode ser vista uma representação das três formas de radiação.

Figura 5 - Formas de radiação solar.



Fonte: Elaboração própria.

Uma célula fotovoltaica tem suas características elétricas dependentes basicamente da irradiação e da temperatura nos módulos, sua influência é muito mais significativa do que a da temperatura na quantidade de eletricidade produzida. A irradiação pode variar significativamente em curtos intervalos de tempo (da ordem de segundos), especialmente em

dias com nuvens, mas a variação da temperatura é amortecida pela capacidade térmica dos módulos (PINHO; GALDINO, 2014).

## 2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia

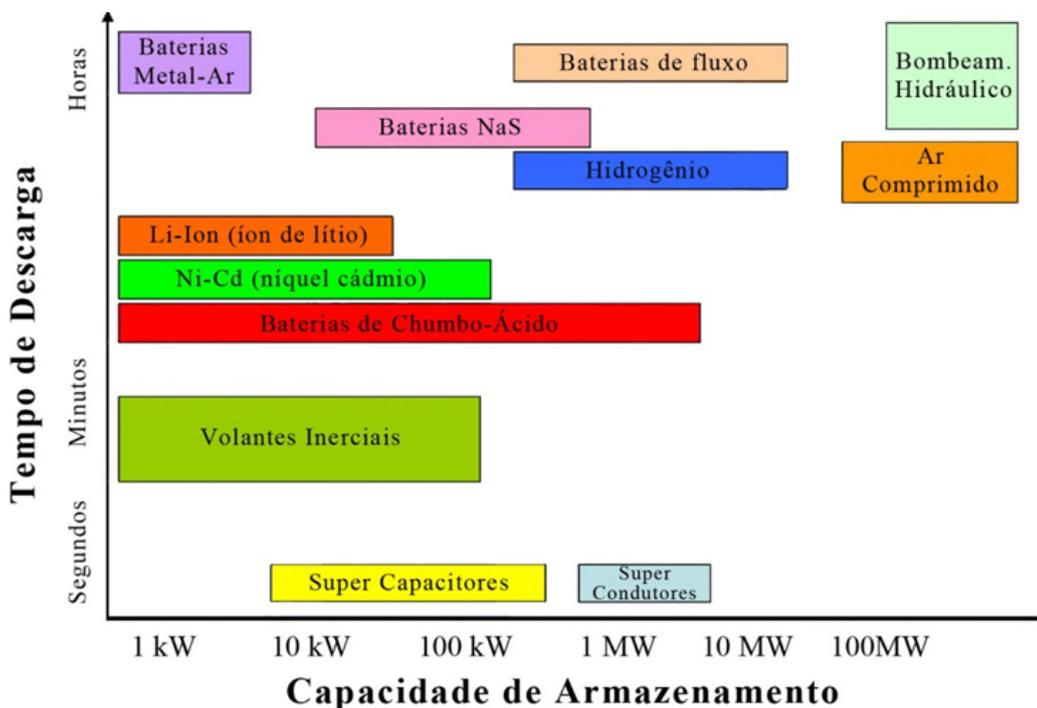
A falta de regularidade das fontes de energia renovável (solar e eólica) e sua defasagem entre a disponibilidade e a demanda de eletricidade são obstáculos para um aumento da participação dessa forma de geração produção global de eletricidade. Uma forma de aumentar a confiabilidade e a previsibilidade no fornecimento da eletricidade gerada por fontes renováveis é o armazenamento de energia. Sistemas de armazenamento podem fornecer eletricidade suplementar ou de segurança em períodos de baixa disponibilidade de recursos ou de aumento do consumo.

Existem diversas tecnologias capazes de armazenar eletricidade. Cada uma delas possui características específicas com relação a custo, capacidade, energia disponível, tempo de descarga, durabilidade e autonomia que as tornam atraentes para diferentes aplicações (LIPMAN; RAMOS; KAMMEN, 2005). Entre estas tecnologias destacam-se:

- Armazenamento por bombeamento de água para reservatórios (PHES);
- Armazenamento de energia por ar comprimido (CAES);
- Volantes inerciais (FES);
- Supercapacitores (SCES);
- Armazenamento de energia magnética supercondutora (SMES);
- Armazenamento de energia em baterias (BES);
- Armazenamento de energia baseada em hidrogênio (HESS).

O armazenamento de energia elétrica pode ser destinado para altas potências, com um conteúdo de energia relativamente pequeno, ou podem ser concebidos para gestão de energia com capacidade de armazenar grandes quantidades de energia para longos períodos de descarga, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Tempo de descarga e capacidade típica de diferentes tecnologias de armazenamento.



Fonte: (LIPMAN; RAMOS; KAMMEN, 2005)

Na Figura 6 são apresentadas as principais tecnologias de armazenamento de energia e sua aplicação em função do tempo de descarga típico e da capacidade de armazenamento. Na comparação apresentada pode ser notado ainda que sistemas de armazenamento de energia baseados em hidrogênio podem ser utilizados desde centenas de quilowatts até dezenas de megawatts para longos períodos de descarga.

### 2.3 Células a Combustível

Células a combustível são dispositivos que possibilitam a conversão direta da energia química de um combustível em energia elétrica através de uma reação eletroquímica. É uma forma eficiente e limpa de produção de energia.

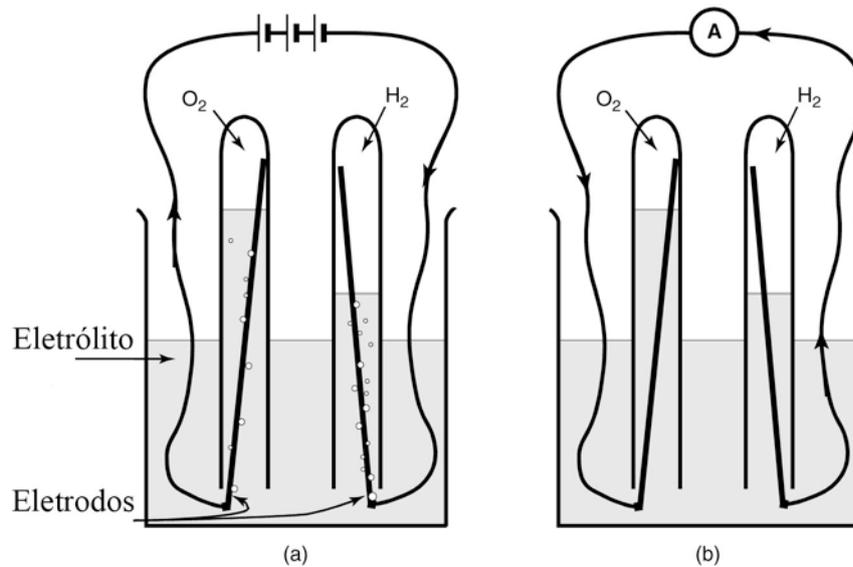
Comparado a sistemas de geração de eletricidade convencionais as células a combustível têm muitas vantagens, tais como elevada eficiência de conversão de energia, que independe do tamanho do sistema, e a geração limpa de energia sem emissões de gases poluentes.

O princípio básico de operação é o reverso da eletrólise. O hidrogênio e o oxigênio reagem entre si produzindo uma corrente elétrica, equação (8).



A Figura 7 (a) mostra a reação de eletrólise onde a água é separada em hidrogênio e oxigênio pela passagem de corrente elétrica e a Figura 7 (b) mostra a reação reversa em que, uma pequena corrente flui no sentido oposto quando o hidrogênio recombina com o oxigênio.

Figura 7 - Princípio de funcionamento da célula a combustível.



Fonte: (LARMINIE; DICKS, 2003)

A forma como a reação entre hidrogênio e oxigênio produz uma corrente elétrica, é diferente em cada um dos eletrodos e variam conforme o tipo de células de combustível.

Nas células a combustível de eletrólito ácido o hidrogênio gasoso é ionizado no ânodo, liberando elétrons e formando íons H<sup>+</sup> (prótons), equação (9).



A reação apresentada na equação (9) libera energia. No cátodo, o oxigênio reage com os elétrons vindos do eletrodo, e com os íons H<sup>+</sup> do eletrólito, formando água, equação (10).



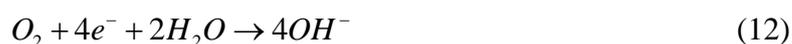
Para que as reações prossigam continuamente é necessário que os elétrons produzidos no ânodo passem através do circuito elétrico para o cátodo. Além disso, é necessário que os íons H<sup>+</sup> passem através do eletrólito. O eletrólito ácido contém íons H<sup>+</sup> livres, servindo muito

bem como condutor. Certos polímeros também podem ser feitos para conter íons livres de  $H^+$ , esses materiais são chamados de membranas de permuta de prótons (PEM).

Em uma célula a combustível de eletrólito alcalino a reação global é a mesma, entretanto as reações em cada eletrodo são diferentes. O eletrólito contém íons  $OH^-$  livres que reagem com o hidrogênio no ânodo liberando energia e elétrons, e produzindo água, equação (11).



No cátodo, o oxigênio reage com os elétrons vindos do eletrodo e a água no eletrólito, formando novos íons  $OH^-$ , equação (12).



Para que estas reações prossigam, os íons  $OH^-$  devem ser capaz de passar pelo eletrólito, e deve haver um circuito elétrico para o fluxo de elétrons entre ânodo e o cátodo.

As células a combustível são normalmente caracterizadas pelo material do eletrólito que utilizam. As características de cada célula e suas principais aplicações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das células a combustível conforme íon de transferência.

Tipo de Célula	Íon de Transferência	Temperatura de Operação	Aplicação
Alcalina (AFC)	OH <sup>-</sup>	50–200°C	Usada em veículos espaciais eg. Apolo, Shuttle.
Membrana de Troca de Prótons (PEMFC)	H <sup>+</sup>	30–100°C	Veículos, aplicações móveis e sistemas de cogeração de baixa potência.
Metanol (DMFC)	H <sup>+</sup>	20–90°C	Adequada para sistemas eletrônicos portáteis de baixa potência operando por longo período.
Ácido Fosfórico (PAFC)	H <sup>+</sup>	~220°C	Em uso em um grande número de sistemas de cogeração de aproximadamente 200 kW.
Carbonato Fundido (MCFC)	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	~650°C	Adequada para sistemas de cogeração de média para alta potência, capacidade da ordem de MW.
Óxido Sólido (SOFC)	O <sup>-2</sup>	500–1000°C	Adequada para todos os tamanhos de sistemas de cogeração, de 2kW à vários MW.

Fonte: (LARMINIE; DICKS, 2003)

### 2.3.1 Eficiência de células a combustível

A quantidade de calor que pode ser convertida em trabalho útil em uma máquina térmica é limitada pela eficiência de Carnot para um processo reversível ideal, equação (13).

$$\eta_{CARNOT} = \frac{T_E - T_S}{T_E} \quad (13)$$

Onde:

$\eta_{CARNOT}$  - eficiência de Carnot [-]:

$T_E$  - temperatura absoluta na entrada da máquina [K]:

$T_S$  - temperatura absoluta na saída da máquina [K].

Células a combustível são dispositivos eletroquímicos e não são limitadas pela eficiência de Carnot. A máxima eficiência de conversão de uma célula a combustível é limitada pelo conteúdo de energia química do combustível e pode ser determinado pela equação (14).

$$\eta_{REV} = \frac{\Delta G_f}{\Delta H_f} \quad (14)$$

Onde:

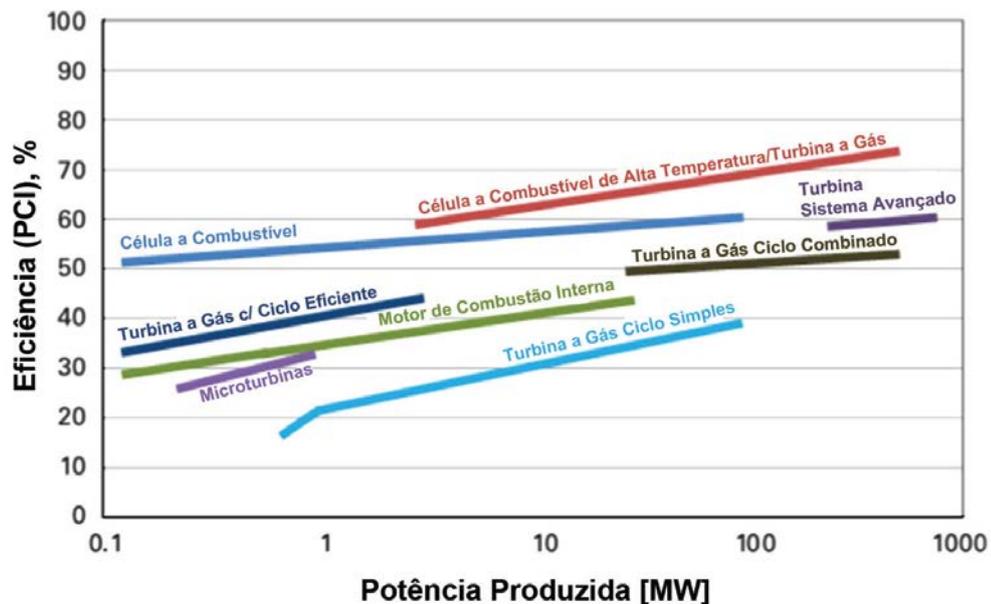
$\eta_{REV}$  - eficiência de conversão da célula a combustível [-];

$\Delta G_f$  - variação da energia livre de Gibbs [kJ/kg];

$\Delta H_f$  - variação da entalpia de formação [kJ/kg].

A Figura 8 mostra a eficiência das células de combustível e outros dispositivos de conversão de energia em relação à saída de energia do sistema.

Figura 8 - Eficiência da célula a combustível e máquinas térmicas.



Fonte: (DOE, 2011).

## 2.4 Armazenamento de Hidrogênio por Compressão

O hidrogênio possui uma elevada relação de energia por unidade de massa. O seu poder calorífico inferior (PCI) é igual a 119.950 kJ/kg. Entretanto, devido às suas características físicas e principalmente sua reduzida massa específica a pressão e temperatura ambiente, o seu armazenamento não é uma tarefa simples.

De acordo com Krishna et al. (2012) as formas mais usuais de armazenamento do hidrogênio são: processo de compressão, processos criogênicos e na forma sólida como produto químico ou combinação física com outros materiais (hidretos metálicos e materiais de

carbono). Cada um desses processos possuem vantagens e desvantagens para o armazenamento do hidrogênio.

Hidrogênio gasoso, armazenado a alta pressão é a forma mais simples de ser realizado, com relação ao processo, e apresenta uma alta taxa de produção. É a tecnologia mais utilizada e desenvolvida. O armazenamento do hidrogênio por compressão é realizado a elevadas pressões. Para utilização em aplicações estacionárias na área de produção de energia essas pressões são superiores a 20 MPa (KRISHNA *et al.*, 2012) e para o uso em veículos movidos a células a combustível são de 35 ou 70 MPa, a energia necessária para a compressão de hidrogênio nessa faixa de pressão é de aproximadamente 5% a 20% da energia do combustível armazenado (LIPMAN *et al.*, 2013).

O armazenamento de hidrogênio na forma líquida é realizado por processos criogênicos. Nesse processo, a energia necessária para liquefazer o hidrogênio representa de 25% a 45% da energia armazenada. A densidade de armazenamento é alta, mas é necessário um isolamento térmico que mantenha a temperatura próximo a  $-253^{\circ}\text{C}$  para evitar a evaporação do hidrogênio (CALISKAN *et al.*, 2012).

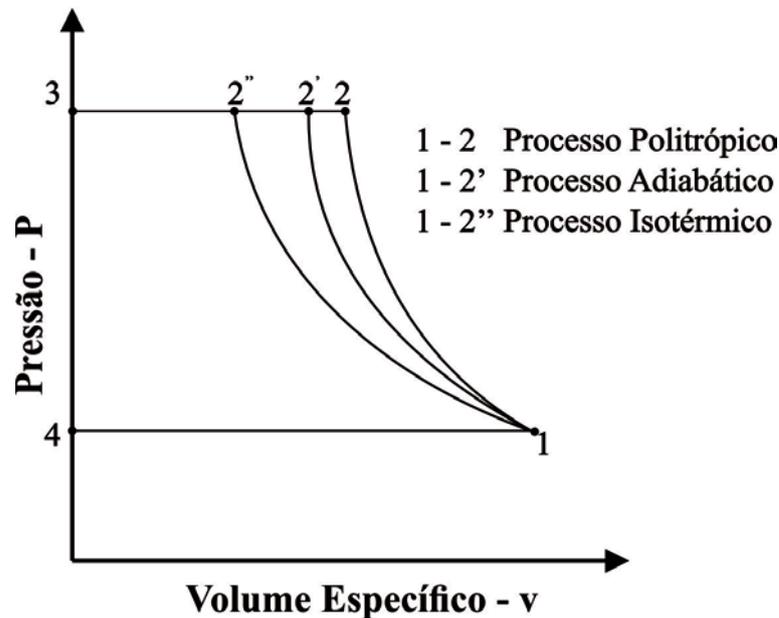
#### 2.4.1 Processos de compressão

O trabalho requerido para a compressão de um gás pode ser expresso em função da pressão e do volume, equação (15).

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV \quad (15)$$

Os processos de compressão podem ser analisados de três maneiras: isotérmico, adiabático e politrópico. No primeiro caso a temperatura é mantida constante conforme a pressão aumenta, isso requer que o calor seja continuamente retirado do sistema. No processo adiabático reversível não há transferência de calor na fronteira do sistema, o processo é isentrópico. O politrópico considera o processo como internamente reversível. Na Figura 9 é representada a relação entre pressão e volume específico do gás para os três casos.

Figura 9 - Processos de compressão.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 9 observa-se que a área compreendida pelos pontos 1-2''-3-4-1 representa o trabalho necessário durante a compressão isotérmica, entre 1-2'-3-4-1 o de compressão adiabática e do processo de compressão politrópica é representado pela área formada por 1-2-3-4-1. Evidenciando que o trabalho de compressão isotérmico é inferior ao adiabático reversível e ao politrópico.

Os compressores são projetados para remover a maior quantidade de calor possível, entretanto a velocidade dessa retirada é menor que a de geração, ocasionando o aumento da temperatura durante o processo de compressão (PETRECCA, 1993).

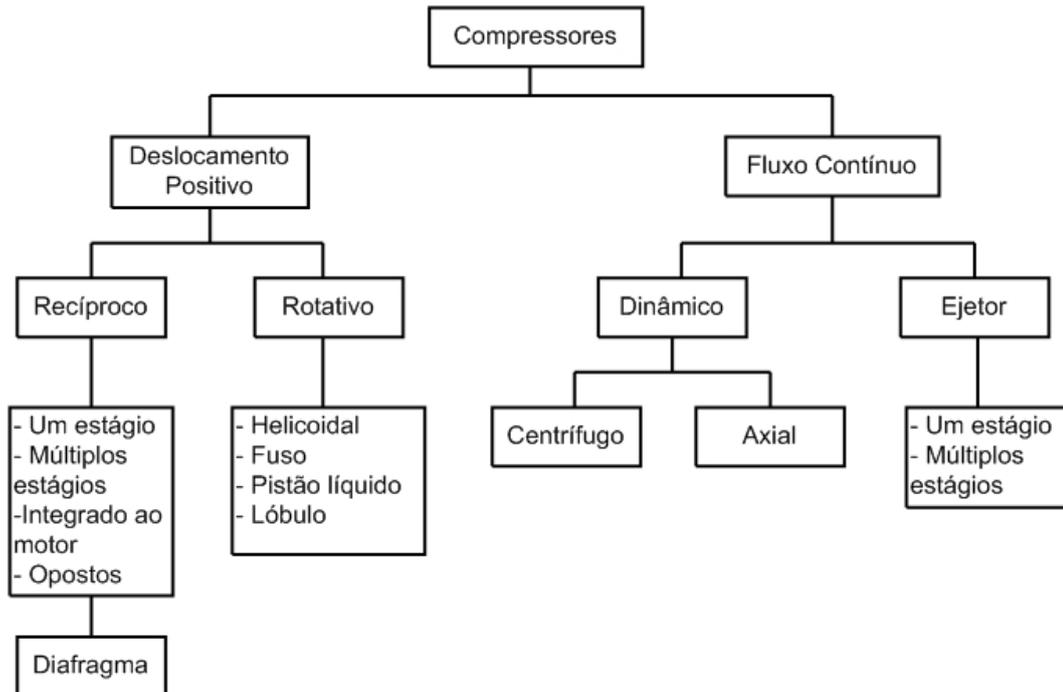
## 2.4.2 Compressores para hidrogênio

Os compressores podem ser classificados de acordo com seu princípio de operação em: de deslocamento positivo ou de fluxo contínuo.

Os equipamentos de deslocamento positivo realizam o processo de compressão a volume constante, ou seja, a cada rotação do eixo de acionamento uma quantidade fixa de gás é comprimido. Isso possibilita que operem com pressões muito altas, podendo ultrapassar os limites máximos dos tanques de armazenamento. Em instalações que utilizem esse tipo de compressor sempre deverá ser prevista a utilização de válvulas de alívio de pressão e controles de desligamento do motor para garantir a segurança do sistema (MOBLEY, 2000).

As máquinas de fluxo contínuo convertem o aumento da energia cinética do gás em aumento de pressão. A compressão é realizada a volume variável, e é significativamente influenciada pelas propriedades do fluido. Na Figura 10 são apresentados os principais tipos de compressores.

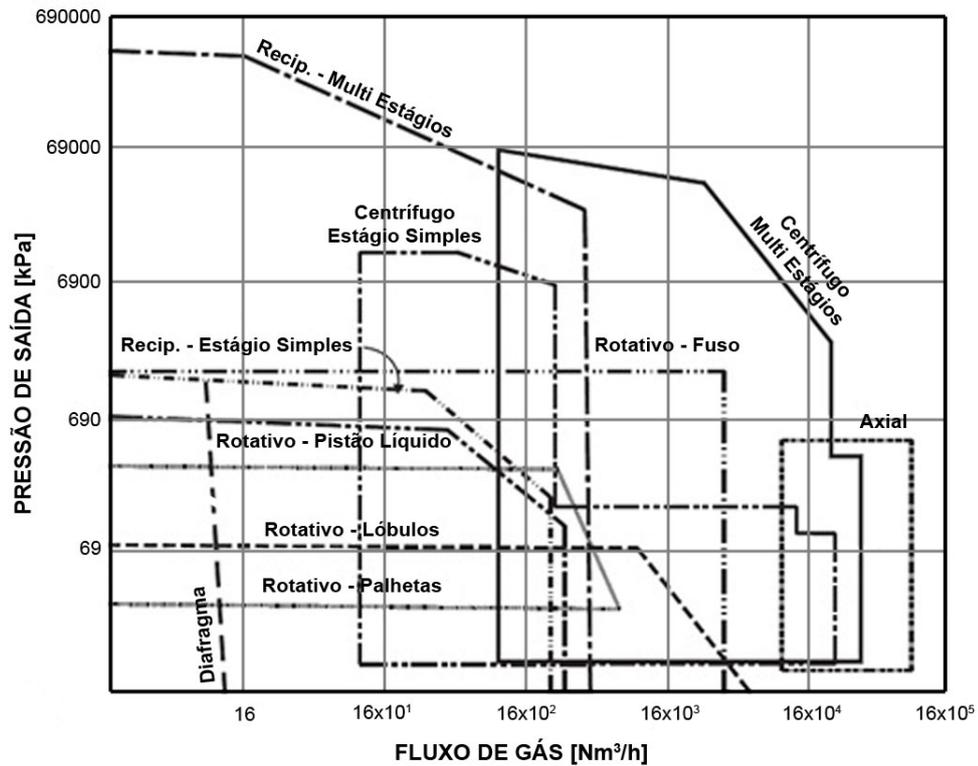
Figura 10. Classificação de compressores conforme princípio de operação.



Fonte: (GPSA, 2012).

A seleção do tipo de equipamento deve levar em consideração a pressão de saída, o fluxo e as características do gás. Compressores de deslocamento positivo, em geral, conseguem trabalhar com pressões de descarga mais elevadas e os de fluxo contínuo com maiores vazões. Na Figura 11 é apresentado um gráfico para a seleção de compressores.

Figura 11 - Gráfico para seleção de compressores.



Fonte: (GPSA, 2012).

Aplicações de armazenamento de hidrogênio necessitam operar com pressões muito elevadas, superiores a 20 MPa. O diagrama para seleção de compressores apresentado na Figura 11 indica que para pressões elevadas e baixas vazões, os compressores de deslocamento positivo recíprocos são os mais indicados para esse uso. Na

Tabela 2 são apresentas as aplicações típicas de diversos tipos de compressores para processos industriais.

Tabela 2. Aplicação de compressores em processos industriais.

<b>Tipo de Compressor</b>	<b>Aplicação</b>
Lóbulos	Transporte de particulado sólido.
Palhetas	Sopradores de baixo fluxo de ar. Partida de turbinas a gás.
Fuso	Processos com baixo fluxo de ar comprimido, recirculação de gases de exaustão, sopradores de enxofre.
Anel Líquido	Produção de vácuo em refinarias de petróleo, aplicações com gases saturados.
Recíproco	Processos com circulação de gases a baixo fluxo, suprimento de H <sub>2</sub> , reinjeção de gases.
Centrífugo 1 estágio	Sopradores e recirculadores de gases.
Centrífugo 1 estágio (engrenagem integrada)	Baixo fluxo de recirculação de gases (Substitui o recíproco para gases de alto peso molecular).
Centrífugo >1 estágio (carregamento lateral)	Gases refrigerantes: propano, propileno, etileno, freon ou misturas.
Centrífugo >1 estágio	Recirculação, reinjeção, gás de síntese.
Centrífugo >1 estágio (engrenagem integrada)	Processos e equipamentos que necessitem de ar comprimido.
Axial	Sopradores, Turbinas a Gás.

Fonte: Forsthoffer (2006), modificada pelo autor.

### 3 ANÁLISE ENERGÉTICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO POR COMPRESSÃO

O hidrogênio é o combustível de maior poder calorífico existente. Considerando em base mássica, possui uma densidade energética, aproximadamente, três vezes superior a da gasolina. Entretanto, quando comparado em base volumétrica, a temperatura e pressão ambiente, sua densidade de energia é muito inferior a de outros combustíveis. Na Tabela 3 são apresentados os valores das densidades energéticas em base mássica e volumétrica para diversos combustíveis.

Tabela 3 - Comparação energética entre diversos combustíveis em base mássica e volumétrica.

Combustível	Densidade Energética [kJ/kg]	Densidade Energética [kJ/m <sup>3</sup> ] 0,1 kPa; 15°C	Temperatura de Autoignição [°C]
Hidrogênio	119.950	10.220	585
Metano	50.000	32.600	540 - 630
Propano	45.600	26.800	450
Gasolina	44.500	31.150	260 - 460
Diesel	42.500	31.435	180 - 320
Metanol	19.600	15.480	415

Fonte: (ABBASI, T., ABBASI, S.A., 2011)

Pode ser observado na Tabela 3 que a pressão e temperatura ambientes o hidrogênio possui uma densidade energética muito inferior a outros combustíveis, tornando impraticável sua utilização como fonte de energia.

Para que o hidrogênio possa ser utilizado em sistemas de geração de energia (células a combustível, motores de combustão interna, turbinas a gás) é necessário elevar sua densidade volumétrica de energia. Atualmente, o método mais utilizado para isso é o armazenamento por compressão a altas pressões. De acordo com Tzimas et al. (2003) para aplicações de armazenamento de hidrogênio em sistemas híbridos de geração de eletricidade por meio de fontes renováveis esses valores são superiores a 15 MPa. No caso do uso em veículos movidos a células a combustível a pressão de armazenamento poderá ser de 35 ou 70 MPa (LIPMAN et al., 2013).

A análise energética do armazenamento de hidrogênio por compressão objetiva a determinação da quantidade de energia utilizada para produzir um aumento da densidade volumétrica do hidrogênio em relação à energia total armazenada. A equação (16) determina a fração de energia requerida no processo de armazenamento.

$$F_{ARMZ} = \left( 1 - \frac{E_{ARMZ}}{E_{REQ}} \right) \cdot 100 \quad (16)$$

Onde:

$F_{ARMZ}$  - fração da energia total consumida no armazenamento (%):

$E_{ARMZ}$  - energia total armazenada (kW):

$E_{REQ}$  - energia requerida no processo (kW):

### 3.1 Propriedades físicas do hidrogênio

#### 3.1.1 Equação de estado

A alta pressão e temperatura o comportamento do hidrogênio desvia-se de um gás ideal. Dessa forma é necessário considerar o fator de compressibilidade ( $Z$ ) em sua equação de estado. Para a determinação das propriedades físicas do hidrogênio será utilizado a equação de estado e o fator de compressibilidade propostas por Khaitan et al. (2015), equações (17) e (18) respectivamente.

$$P \cdot v = Z \cdot R \cdot T \quad (17)$$

$$Z = \frac{v_r}{v_r - 0,08664} - \frac{0,42748}{(v_r + 0,08664) \cdot T_r^{3/2}} \quad (18)$$

Onde:

$P$  - pressão [kPa]

$v$  - volume específico [m<sup>3</sup>/kg]

$T$  - temperatura [K]

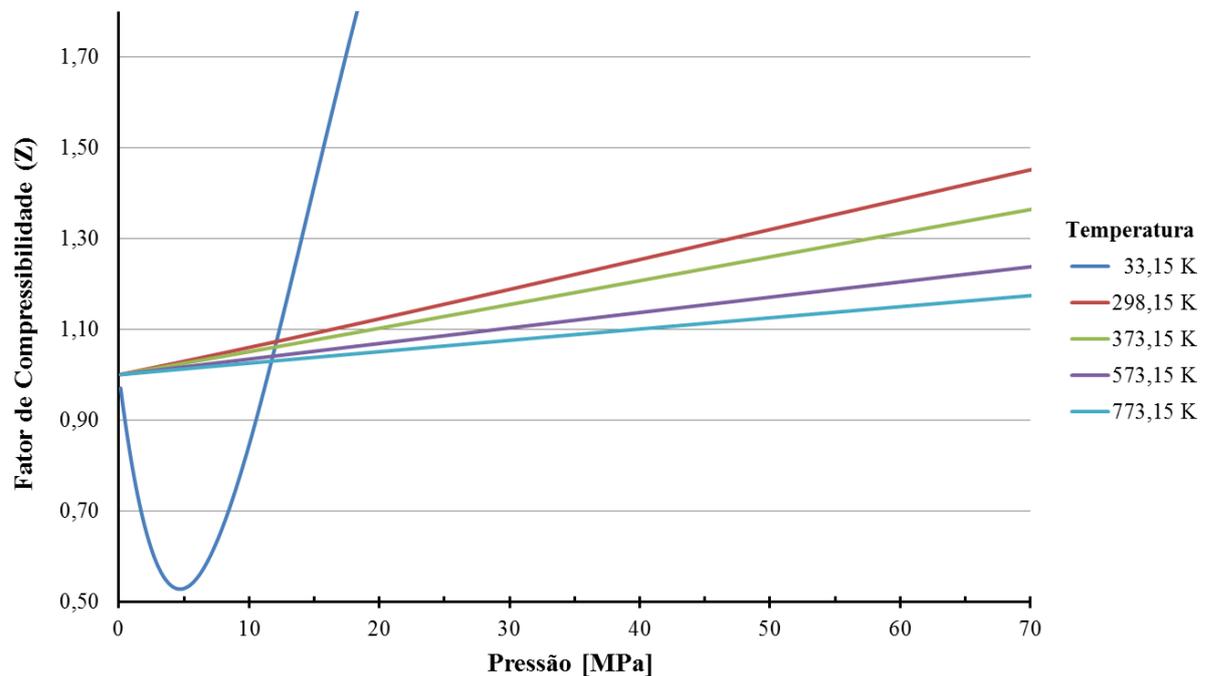
$R$  - constante universal dos gases para o hidrogênio [kJ/kg]

$v_r$  - volume específico reduzido

$T_r$  - temperatura reduzida

Os valores do fator de compressibilidade para o hidrogênio são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Fator de compressibilidade do hidrogênio para pressões entre 0 MPa e 70 MPa.



Fonte: Elaboração própria.

Para a determinação das propriedades termodinâmicas do hidrogênio, entalpia, entropia e volume específico, foi utilizado um programa disponibilizado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) denominado REFPROP (LEMMON; HUBER; McLINDEN, 2013). Os valores da entalpia e da entropia do hidrogênio para as pressões de 1 MPa, 20 MPa, 35MPa e 70 MPa em função de temperatura são apresentados na

Tabela 4.

Tabela 4 - Valores da entalpia e da entropia do hidrogênio nas pressões consideradas.

P [MPa]	1		20		35		70	
	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg/K]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg/K]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg/K]	h [kJ/kg]
0	3578,6	42,674	3666,4	30,139	3757,6	27,751	4006,1	24,801
25	3935,7	43,925	4033,8	31,426	4129,2	29,052	4381,8	26,117
50	4294,9	45,081	4401,8	32,611	4500,9	30,249	4757,5	27,327
75	4655,5	46,156	4769,9	33,709	4872,3	31,356	5132,7	28,446
100	5017,0	47,159	5137,8	34,729	5243,2	32,385	5507,2	29,485
125	5379,1	48,098	5505,4	35,683	5613,5	33,346	5880,9	30,454
150	5741,5	48,981	5872,7	36,577	5983,1	34,246	6253,7	31,362
175	6104,1	49,814	6239,6	37,420	6352,1	35,093	6625,6	32,216
200	6466,9	50,601	6606,1	38,216	6720,6	35,893	6996,7	33,022
225	6829,8	51,349	6972,3	38,970	7088,5	36,651	7367,1	33,785
250	7192,9	52,060	7338,3	39,687	7456,1	37,371	7736,9	34,509
275	7556,1	52,738	7704,1	40,370	7823,3	38,057	8106,2	35,199
300	7919,6	53,387	8069,8	41,022	8190,3	38,712	8475,2	35,857
325	8283,2	54,008	8435,6	41,647	8557,2	39,338	8843,8	36,486
350	8647,2	54,604	8801,4	42,246	8924,1	39,939	9212,3	37,090
375	9011,5	55,177	9167,3	42,822	9291,0	40,516	9580,7	37,669
400	9376,2	55,729	9533,5	43,376	9658,0	41,072	9949,0	38,227
425	9741,4	56,262	9899,9	43,911	10025,2	41,608	10317,5	38,765
450	10107,0	56,776	10266,7	44,427	10392,8	42,125	10686,1	39,283

Fonte: (LEMMON; HUBER; McLINDEN, 2013)

### 3.1.2 Equação do calor específico

Calor específico é uma propriedade intensiva definida como a quantidade de calor necessária para alterar uma unidade de massa de uma substância por um grau de temperatura.

O calor específico de uma substância pode variar de acordo com as propriedades extensivas mantidas constantes durante a mudança de estado. Assim, para uma substância em uma determinada temperatura, o calor específico a pressão constante será diferente do calor específico a volume constante.

O calor específico a pressão constante ( $c_p$ ) para o hidrogênio pode ser determinado pelo polinômio proposto por Chase (1998), equação (19).

$$c_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 + \frac{e}{T^2} \quad (19)$$

Onde:

$c_p$  - calor específico a pressão constante [kJ/kmol/K]:

$T$  - temperatura do hidrogênio [K/1000].

Os termos  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $e$  são constantes para uma determinada faixa de temperatura. Seus valores são apresentados na Tabela 5.

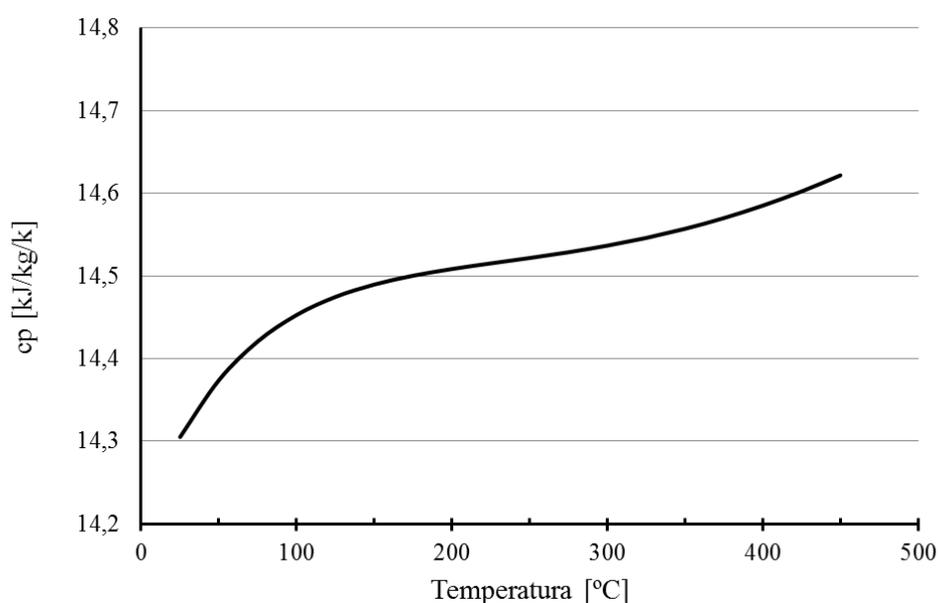
Tabela 5 - Constantes da equação de Chase (1998).

Faixa de Temperatura [K]	298 a 1000	1000 a 2500	2500 a 6000
a	33,066178	18,563083	43,413560
b	-11,363417	12,257357	-4,293079
c	11,432816	-2,859786	1,272428
d	-2,772874	0,268238	-0,096876
e	-0,158558	1,977990	-20,533862

Fonte: (CHASE, 1998)

Na Figura 13 são apresentados os valores do calor específico a pressão constante do hidrogênio para uma faixa de temperaturas entre 25°C e 450°C.

Figura 13 - Calor específico a pressão constante do hidrogênio para temperaturas entre 25°C e 450°C.



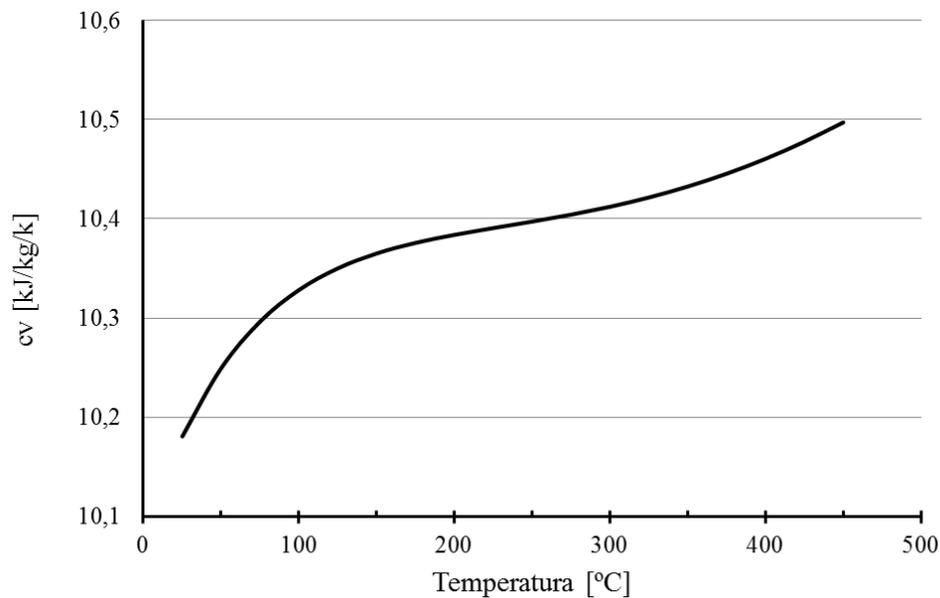
Fonte: Elaboração própria.

O cálculo do calor específico a volume constante ( $c_v$ ) é realizado utilizando-se a equação (20) (Ozsaban et al., 2011).

$$c_p - c_v = R \quad (20)$$

Os valores para o calor específico a volume constante do hidrogênio para temperaturas entre 25°C e 450°C são apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Calor específico a volume constante do hidrogênio para temperaturas entre 25°C e 450°C.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.2 Determinação da eficiência energética do armazenamento de hidrogênio

De acordo com Ozsaban et al. (2011) a eficiência energética de um sistema de compressão e armazenamento de hidrogênio a alta pressão, em relação a primeira lei da termodinâmica, pode ser calculada pela razão entre a energia armazenada e a energia gasta no processo, equação (21).

$$\eta_{ARMZ} = \frac{E_{ARMZ}}{E_{REQ}} \quad (21)$$

Onde:

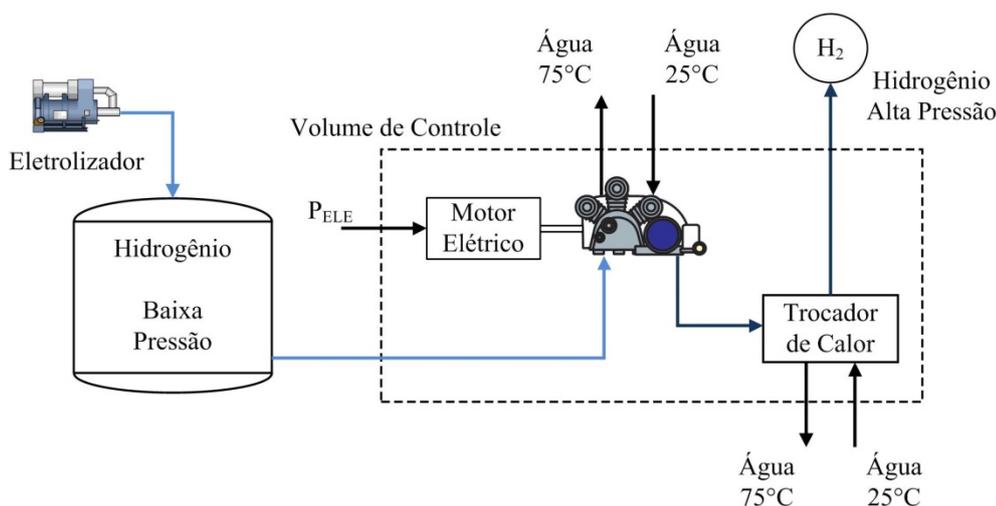
$\eta_{ARMZ}$  - eficiência do armazenamento (-):

$E_{ARMZ}$  - energia armazenada (kW):

$E_{REQ}$  - energia requerida no processo (kW):

Para calcular eficiência energética do armazenamento de hidrogênio é proposto um sistema composto por um compressor de deslocamento positivo de dois estágios com resfriamento intermediário e um trocador de calor para o resfriamento do hidrogênio comprimido, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Sistema proposto para análise energética do armazenamento de hidrogênio por compressão.



Fonte: Elaboração própria.

Pela fronteira do volume de controle do sistema mostrado na Figura 15 há a entrada de: potência elétrica para o motor de acionamento do compressor, fluxo de massa de hidrogênio a baixa pressão e água fria para o resfriamento interno do compressor e trocador de calor. A saída do volume de controle é composta pelo fluxo mássico de hidrogênio a alta pressão e pelo fluxo de água quente utilizada no resfriamento e no trocador de calor.

### 3.2.1 Parâmetros do sistema

As condições do hidrogênio a baixa pressão foram consideradas como as fornecidas por eletrolizadores comercialmente disponíveis no mercado. Três equipamentos de diferentes fabricantes, com capacidades de produção semelhantes foram selecionados, Figura 16.

Figura 16 - Eletrolizadores comercialmente disponíveis selecionados.



(a) AREVA H2Gen - E5



(b) ITM Power - Hpac40



(c) Proton On Site - H6

Fonte: (a) AREVA (2016); (b) ITM Power (2016); (c) Proton On Site (2016)

As especificações técnicas dos aparelhos selecionados são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificações técnicas de eletrolizadores comercialmente disponíveis.

Fabricante	Modelo	Fluxo de H <sub>2</sub> [Nm <sup>3</sup> /h]	Pressão de Saída [MPa]	Consumo de Energia [kWh/Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> ]
AREVA H <sub>2</sub> Gen	E5	5,0	3,5	5,7
Proton On Site	H6	6,0	3,0	6,8
ITM Power	Hpac40	2,4	1,5	5,0

Fonte: (a) AREVA (2016); (b) ITM Power (2016); (c) Proton On Site (2016).

As condições de armazenamento foram consideradas com base em compressores comercialmente disponíveis no mercado e a temperatura ambiente. Dois equipamentos de diferentes fabricantes foram selecionados com pressões de descarga de 20 MPa e 70 MPa respectivamente. Na Tabela 7 são apresentadas os parâmetros dos compressores.

Tabela 7 - Especificações técnicas dos compressores selecionados.

Fabricante	Modelo	Fluxo de H2 [Nm <sup>3</sup> /h]	Pressão de Entrada [MPa]	Pressão de Saída [MPa]	Estágios
<sup>1</sup> Hydro-Pac Inc.	C03-15- 70/140LX	31,0	1,0	20	2
<sup>2</sup> PDC Machines Inc.	PDC-3-2500- 10000	9,3	1,0	70	2

Fonte: <sup>1</sup>(HYDRO-PAC, 2016), <sup>2</sup>(PDC MACHINES, 2016)

### 3.2.2 Potência de eixo

A potência de eixo requerida pelo sistema pode ser calculada pelas equações (22) e (23) (BROWN, 2005).

$$P_{EIXO} = \dot{m}_{H_2} \cdot \sum_{i=1}^n Z \cdot \frac{1}{\eta_{ISO}} \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_{E_i} \cdot \left[ (RP_i)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (22)$$

$$RP_i = \left( \frac{P_S}{P_E} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (23)$$

Onde:

$P_{EIXO}$  - potência necessária para a compressão do gás [kW]:

$\dot{m}_{H_2}$  - fluxo mássico de hidrogênio [kg/s];

$Z$  - fator de compressibilidade do gás [-];

$k$  - razão dos calores específicos [-];

$R$  - constante universal do hidrogênio [kJ/kg/K];

$T_{E_i}$  - temperatura do gás na entrada do estágio  $i$  [K];

$RP_i$  - razão de compressão no estágio  $i$  [-];

$n$  - número de estágios de compressão [-];

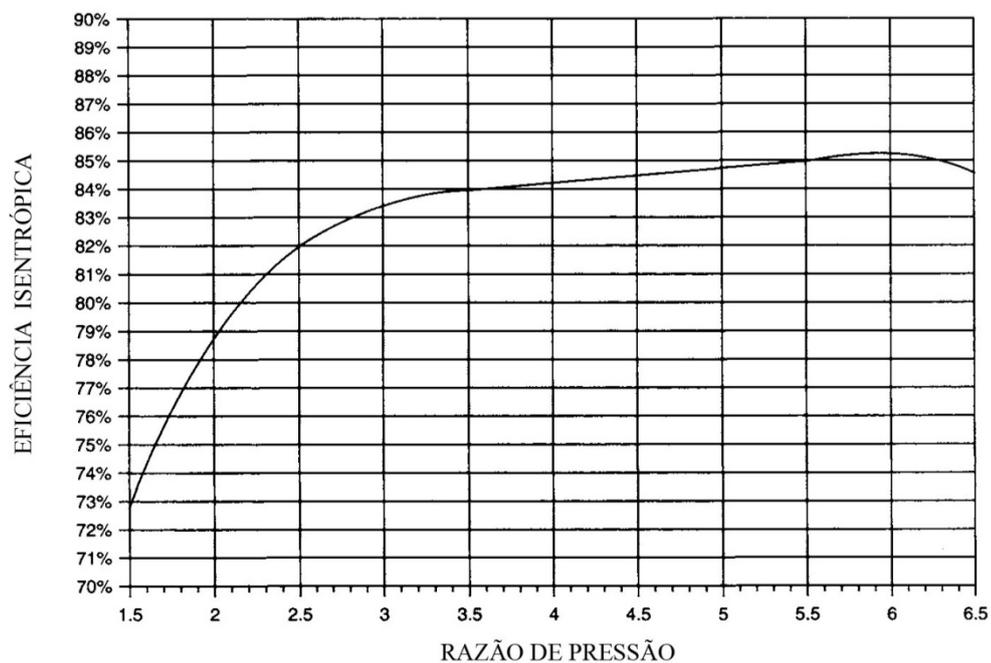
$P_E$  - pressão na entrada com compressor [MPa];

$P_S$  - pressão na descarga do compressor [MPa];

$\eta_{ISO}$  - eficiência isentrópica do compressor [-].

A eficiência isentrópica do compressor é um parâmetro característico de cada equipamento e da condição de operação. A Figura 17 apresenta os valores da eficiência isentrópica em função da razão de pressão para um compressor recíproco com uma eficiência mecânica de 95%.

Figura 17 - Eficiência isentrópica para um compressor recíproco com 95% de eficiência mecânica.



Fonte: (BROWN, 2005).

Os valores para razões de pressão acima do indicado na Figura 17 foram obtidos por extrapolação gráfica da curva apresentada.

Os resultados para os compressores considerados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Potência de eixo obtida para os compressores.

Modelo	Pressão de Descarga [MPa]	Fluxo [kg/s]	RP	$\eta_{ISO}$	P <sub>EIXO</sub> [kW]
C03-15-70/140LX	20	0,00077	4,47	0,845	4,5
PDC-3-2500-10000	70	0,00023	8,37	0,730	2,9

Fonte: Elaboração própria.

### 3.2.3 Potência elétrica

O cálculo da potência elétrica requerida considera a eficiência do motor elétrico. De acordo com Christopher; Dimitrios (2012) a eficiência de motores elétricos pode ser considerada como 95%. A Tabela 9 apresenta os valores calculados da potência elétrica de cada um dos compressores.

Tabela 9 - Potência elétrica requerida pelos compressores.

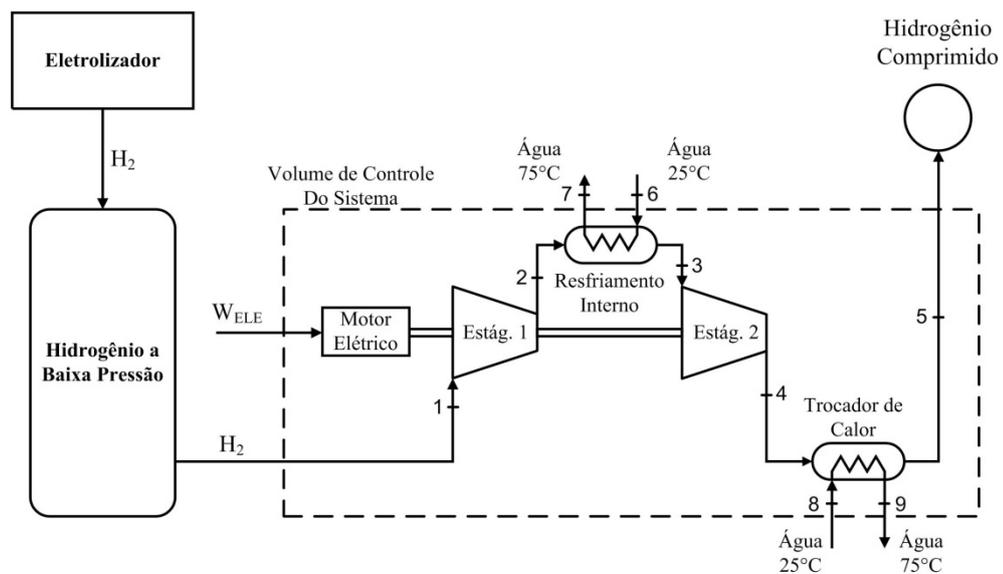
Modelo	Pressão de Descarga [MPa]	$P_{ELE}$ [kW]
C03-15-70/140LX	20	5,0
PDC-3-2500-10000	70	3,2

Fonte: Elaboração própria.

### 3.2.4 Calor cedido no resfriamento intermediário

A Figura 18 apresenta o diagrama do sistema proposto e identifica os pontos de interesse para os cálculos termodinâmicos.

Figura 18 - Diagrama do sistema de compressão e armazenamento.



Fonte: Elaboração própria.

A temperatura do gás na saída do compressor é calculada pela equação (24) (ANTUNES, 1999).

$$T_S = T_E \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{ISO}} \cdot \left[ \left( \frac{P_S}{P_E} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\} \quad (24)$$

A pressão (P), temperatura (T), entalpia (h) e entropia (s) em cada um dos pontos é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades termodinâmicas das substâncias nos pontos considerados.

Ponto	C03-15-70/140LX				PDC-3-2500-10000			
	P [MPa]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg/K]	P [MPa]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg/K]
1	1,0	25,0	3935,7	43,925	1,0	25,0	3935,7	43,925
2	4,5	183,6	6253,0	43,903	8,4	272,7	7580,3	43,911
3	4,5	36,0	4110,1	38,237	8,4	36,0	4129,8	35,624
4	20,0	200,4	6612,3	38,229	70,0	292,9	8370,3	35,672
5	20,0	36,0	4195,7	31,960	70,0	36,0	4547,1	26,662
6	0,1	25,0	104,9	0,367	0,1	25,0	104,9	0,367
7	0,1	75,0	314,1	1,016	0,1	75,0	314,1	1,016
8	0,1	25,0	104,9	0,367	0,1	25,0	104,9	0,367
9	0,1	75,0	314,1	1,016	0,1	75,0	314,1	1,016

Fonte: Elaboração própria.

Para calcular o calor cedido pelo hidrogênio no resfriamento intermediário do compressor pode ser utilizada a diferença de entalpia do hidrogênio entre a entrada e a saída do trocador de calor intermediário, equação (25).

$$Q_{INT} = \dot{m}_{H_2} \cdot (h_{INTS} - h_{INTE}) \quad (25)$$

$Q_{INT}$  - calor específico cedido pelo hidrogênio [kJ/kg]

$h_{INTS}$  - entalpia do hidrogênio na saída do resfriador intermediário [kJ/kg]:

$h_{INTE}$  - entalpia do gás na entrada do resfriador intermediário [kJ/kg]:

### 3.2.5 Eficiência energética

A análise energética dos dois sistemas de armazenamento propostos (20 e 70 MPa) permite obter a eficiência energética do processo. Na Tabela 11 são apresentados os valores obtidos.

Tabela 11 - Eficiência energética do armazenamento de hidrogênio.

Compressor	C03-15-70/140LX	PDC-3-2500-10000
Pressão de Armazenamento [MPa]	20,0	70,0
Potência Elétrica Consumida [kW]	6,70	2,37
Calor Retirado no TC Intermediário [kW]	3090	5237
Calor Retirado no TC [kW]	2658	4349
Eficiência Energética do Armazenamento [%]	95,8	92,3

Os valores da eficiência energética apresentados na Tabela 11 podem indicar a fração da energia do hidrogênio armazenada dispendida no processo de compressão. Para o sistema operando com pressão de armazenamento de 20 MPa, 4,2% da energia total do hidrogênio armazenado será requerida pelo compressor. Para o armazenamento a 70 MPa a energia requerida pelo sistema equivale a 7,7% do total armazenado.

## **4 ANÁLISE EXERGÉTICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO POR COMPRESSÃO**

A análise exergética é uma técnica baseada na segunda lei da termodinâmica, que possibilita avaliar e comparar processos e sistemas de forma racional e significativa. Seu resultado é a eficiência racional do sistema que proporciona uma medida real de quanto o seu desempenho se aproxima do ideal e identifica as causas e locais das perdas mais claramente que a análise energética. Por esse motivo a análise exergética pode auxiliar na otimização de projetos.

A análise termodinâmica convencional baseia-se no princípio da conservação da energia, primeira lei da termodinâmica. Um sistema de conversão de energia é essencialmente avaliado por um balanço entre a energia que entra e a que sai. A saída pode ser classificada como produtos e resíduos. A eficiência energética é definida como a razão entre a energia produzida e a consumida, e é utilizada para comparar vários tipos de sistemas. Diferentes processos tais como: usinas termoelétricas, aquecedores, refrigeradores e armazenadores de calor, são comparados com base na eficiência energética. Entretanto, essa avaliação nem sempre fornece uma medida de quanto o desempenho do sistema se aproxima do ideal. Além disso, as perdas que ocorrem dentro do processo não podem ser identificadas com precisão.

A análise baseada no princípio da segunda lei da termodinâmica permite que as deficiências da análise energética possam ser superadas. Ela é útil na identificação das causas, localização e quantidade das irreversibilidades do processo.

A exergia associada a uma quantidade de energia é uma avaliação quantitativa da sua utilidade ou qualidade. A análise exergética reconhece que, embora a energia não possa ser criada ou destruída, sua qualidade pode ser reduzida e, eventualmente, alcançar um estado em que estará em completo equilíbrio com o ambiente, não sendo mais útil para a realização de trabalho.

### **4.1 - Exergia**

A exergia representa o trabalho máximo que pode ser obtido quando uma quantidade de matéria é levada ao estado de equilíbrio termodinâmico (mecânico, térmico e químico) com o ambiente, envolvendo interações apenas com os componentes do meio ambiente através de processos reversíveis (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988).

A exergia total de um sistema, pode ser dividida em componentes distintas. Na ausência de efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e tensão superficial, a exergia é definida pela equação (26) (KOTAS, 1995).

$$Ex = Ex_F + Ex_C + Ex_P + Ex_Q \quad (26)$$

Onde:

$Ex$  - exergia total [kW]:

$Ex_F$  - exergia física [kW]:

$Ex_C$  - exergia cinética [kW]:

$Ex_P$  - exergia potencial [kW]:

$Ex_Q$  - exergia química [kW]:

As exergia total na equação (26) pode ser expressa em base mássica, exergia específica total. A equação (27) pode ser utilizada para calcular a exergia específica de um sistema .

$$ex = ex_F + ex_C + ex_P + ex_Q \quad (27)$$

Onde:

$ex$  - exergia específica total [kJ/kg]:

$ex_F$  - exergia específica física [kJ/kg]:

$ex_C$  - exergia específica cinética [kJ/kg]:

$ex_P$  - exergia específica potencial [kJ/kg]:

$ex_Q$  - exergia específica química [kJ/kg]:

Para um sistema em repouso com relação ao ambiente de referência as componentes relativas a exergia cinética e potencial do sistema podem ser consideradas iguais a zero.

#### 4.1.1 Exergia física específica

De acordo com Kotas (1985) a exergia física é definida como a quantidade máxima de trabalho possível de ser obtido quando uma substância é trazida de seu estado inicial até o estado de referência mediante processos físicos envolvendo somente a troca de calor com o ambiente.

A exergia física específica de um sistema pode ser calculada pela equação (28).

$$ex_F = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (28)$$

Onde:

$h$  - entalpia específica inicial do sistema [kJ/kg];

$h_0$  - entalpia específica do sistema no estado de referência [kJ/kg];

$T_0$  - temperatura absoluta do sistema no estado de referência [K];

$s$  - entropia específica inicial do sistema [kJ/kg/K];

$s_0$  - entropia do sistema no estado de referência [kJ/kg/K].

#### 4.1.2 Exergia química específica

A exergia química é definida por Kotas (1985) como a quantidade máxima de trabalho possível de ser obtido quando uma substância é trazida de seu estado inicial até o estado de referência mediante processos que envolvam somente transferência de calor e reações entre a substância e os componentes do ambiente de referência.

Em princípio, a exergia química de uma substância não presente no ambiente pode ser obtida considerando-se uma reação ideal dessa substância com outras substâncias, geralmente denominadas substâncias de referência, das quais as exergias químicas são conhecidas. A exergia química específica de uma substância pode ser calculada pela equação (29).

$$ex_Q = R \cdot T_0 \cdot \ln \left( \frac{p_0}{p_{00}} \right) \quad (29)$$

Onde:

$ex_Q$  - exergia química específica da substância [kJ/kg];

$R$  - constante universal dos gases [kJ/kg/K];

$p_0$  - pressão parcial da substância no estado de referência [-];

$p_{00}$  - pressão parcial da substância de referência [-].

De acordo com PÉREZ *et al.* (2015) a exergia química de um combustível pode ser calculada pela multiplicação de seu poder calorífico inferior por um coeficiente, equação (30).

$$\varphi = \frac{ex_Q}{PCI} \quad (30)$$

Onde:

$\varphi$  - coeficiente para o combustível utilizado [-];

$ex_Q$  - exergia química do combustível [kJ/kg];

$PCI$  – poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg].

Na Tabela 12 são mostrados os valores de  $\varphi$  para combustíveis e substâncias comuns.

Tabela 12 - Valores típicos de  $\varphi$  para alguns combustíveis.

Combustível	$\varphi$
Madeira	1,15 a 1,30
Óleo Combustível	1,04 a 1,08
Gás Natural	1,04
Hidrogênio	0,985
Monóxido de Carbono	0.973

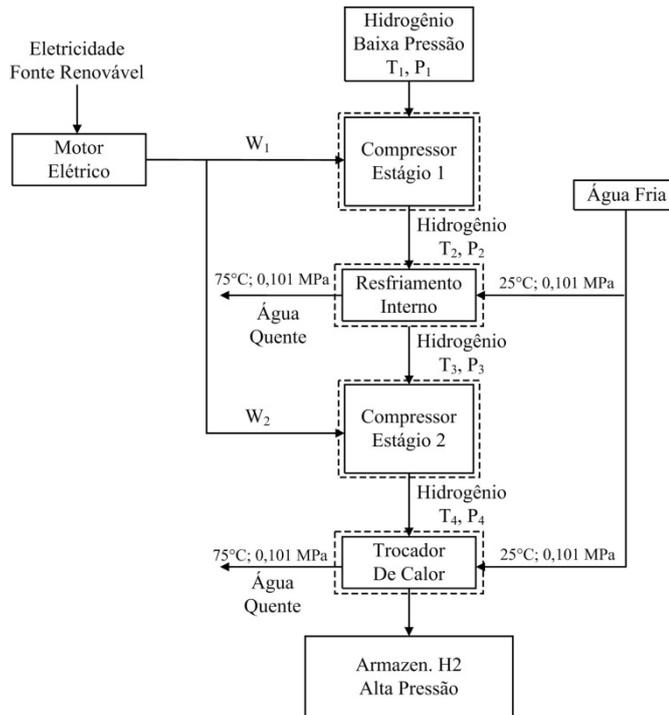
Fonte: (KOTAS, 1985).

## 4.2 Análise exergética do sistema

Para a realização da análise exergética do processo de armazenamento de hidrogênio por compressão é utilizado o mesmo sistema proposto na análise exergética, Figura 15. As especificações técnicas dos compressores apresentadas na Tabela 7 são utilizadas como parâmetros para o processo.

Para determinar o comportamento real do sistema de compressão e armazenamento do hidrogênio, indicando suas perdas localizadas, é realizada a análise exérgica em cada um dos componentes do sistema, Figura 19.

Figura 19 - Componentes do sistema de armazenamento considerados na análise exérgica.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 19 são apresentados os componentes do compressor individualmente, a análise exérgica é realizada para cada um deles.

O balanço de exergia possibilita identificar a irreversibilidade de cada componente. A equação (31) pode ser utilizada de forma geral para calcular seu valor.

$$I = \sum Ex_E - \sum Ex_S \quad (31)$$

Onde:

$I$  - irreversibilidade [kW];

$Ex_E$  - exergia que entra no componente [kW]

$Ex_S$  - exergia que sai no componente [kW]

#### 4.2.1 Balanço de exergia no estágio de compressão

As exergias que entram e que saem de cada estágio de compressão estão indicadas na Figura 20. A irreversibilidade do processo de compressão de cada estágio pode ser calculada pela equação (31).

Figura 20- Balanço exergético nos estágios de compressão.



Fonte: Elaboração própria.

Onde:

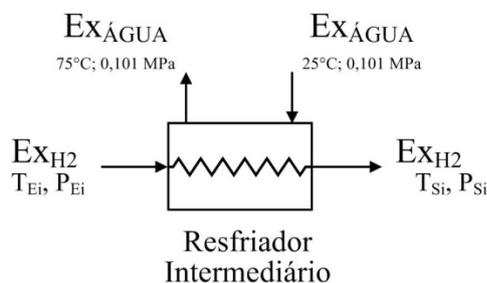
$W_{comp\ i}$  - trabalho de compressão do  $i$ -ésimo estágio;

$EX_{H2}$  - exergia do hidrogênio a temperatura e pressão considerados.

#### 4.2.2 Balanço de exergia no resfriador intermediário

No resfriador intermediário do compressor é realizada a transferência de calor do hidrogênio comprimido no primeiro estágio para a água de refrigeração. Na Figura 21 é apresentado o balanço de exergia do componente.

Figura 21 - Balanço exergético do resfriador intermediário.

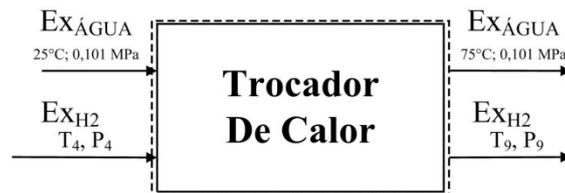


Fonte: Elaboração própria.

### 4.2.3 Balanço de exergia no trocador de calor

O balanço de exergia no trocador de calor é mostrado na Figura 22. Da mesma forma que no resfriador intermediário exergia é a transferida do fluxo de hidrogênio comprimido para a água do resfriamento.

Figura 22 - Balanço de exergia no trocador de calor.



Fonte: Elaboração própria.

### 4.3 Eficiência exergética do sistema de armazenamento

Os resultados da análise exergética para o sistema de armazenamento proposto no item 3.2, a pressões de armazenamento de 20 e 70 Mpa, respectivamente, são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados da análise exergética para os sistemas propostos

Compressor	C03-15-70/140LX	PDC-3-2500-10000
Pressão de Armazenamento [MPa]	20,0	70,0
Fluxo Mássico de Hidrogênio [kg/s]	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Irreversibilidade no Estágio de Compressão 1 [kW]	0,34	0,20
Irreversibilidade no Estágio de Compressão 2 [kW]	0,33	0,18
Irreversibilidade no TC Intermediário [kW]	0,12	0,07
Irreversibilidade no Trocador de Calor Final [kW]	0,04	0,06
Eficiência Exergética do Armazenamento de H <sub>2</sub> [%]	<b>79,4</b>	<b>65,3</b>

A análise dos resultados apresentados na Tabela 13 permite avaliar as irreversibilidades de cada componente do sistema, indicando que as maiores perdas exergéticas estão localizadas nos estágios de compressão.

Os resultados obtidos para a eficiência exergética do armazenamento do hidrogênio por processo de compressão pode ser comparados com os valores obtidos por Ozsaban et al. (2011), 79% e 70% respectivamente para pressões de 20 e 70 MPa.

## 5 ANÁLISE ECONÔMICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO

A análise econômica tem por objetivo a determinação dos custos associados à compressão e ao armazenamento do hidrogênio a alta pressão utilizando a eletricidade proveniente de fontes renováveis de energia.

### 5.1 Custo da produção de hidrogênio

Adaptando as equações de engenharia econômica apresentadas por Silveira (1998) pode-se obter o custo de armazenamento de energia elétrica pela equação (32).

$$C_{ARMAZ\ H_2} = \frac{Inv \cdot f}{H \cdot P_{H_2}} + C_{OP} + C_{MAN} \quad (32)$$

Onde:

$C_{ARMAZ\ H_2}$  - custo de armazenamento do hidrogênio [US\$/kWh]:

$Inv$  - investimento no sistema de armazenamento de hidrogênio [US\$]:

$f$  - fator de anuidade [1/ano]:

$H$  - período equivalente de operação [h/ano]:

$E_{H_2}$  - Potencia Armazenada no hidrogênio [kW]:

$C_{OP}$  - custo de operação [US\$/kWh]:

$C_{MAN}$  - custo de manutenção [US\$/kWh].

O investimento no sistema de armazenamento é composto pelos custos de aquisição do compressor, do trocador de calor para o resfriamento do hidrogênio e do cilindro ou tanque de armazenamento de alta pressão.

O fator de anuidade é determinado pelas equações (33) e (34).

$$f = \frac{q^k \cdot (q-1)}{q^k - 1} \quad (33)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (34)$$

Onde:

$r$  - taxa anual de juros [%]:

$k$  – período de amortização (*payback*) [anos]:

A potência disponível no hidrogênio armazenado baseia-se no poder calorífico inferior do combustível (PCI) e é calculada pela equação (35).

$$P_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2} \quad (35)$$

Onde:

$\dot{m}_{H_2}$  - fluxo mássico de hidrogênio [kg/s]:

$PCI_{H_2}$  - poder calorífico inferior do hidrogênio [kJ/kg]:

O custo de operação pode ser calculado pela equação (36).

$$C_{OP} = \frac{W_{ELE} \cdot T_{ELE}}{P_{H_2}} \quad (36)$$

Onde:

$W_{ELE}$  – potência elétrica consumida [kW]:

$T_{ELE}$  - Tarifa da eletricidade [US\$/kWh]:

## 5.2 Parâmetros utilizados na análise econômica

Equipamentos para sistemas de compressão e armazenamento de grandes volumes de hidrogênio são bastante utilizados em indústrias, onde a pressão usual de armazenamento não ultrapassa 20 MPa. Entretanto para a utilização em sistemas de geração de energia renovável e também para o setor de transportes, devido à reduzida disponibilidade de espaço para o armazenamento, as pressões de trabalho podem atingir 70 MPa, ainda não existindo um número significativo de equipamentos comercialmente disponíveis.

Os custos de aquisição do compressor e do trocador de calor de resfriamento de hidrogênio dependem do nível de pressão de armazenamento, sendo disponível no mercado sistemas entre 20 MPa e 70 MPa. Na Tabela 14 são apresentadas informações coligidas pelos fabricantes mediante solicitação de orçamentos.

Tabela 14 - Custos dos compressores disponíveis por orçamento dos fabricantes.

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Pressão [MPa]</b>	<b>Preço [US\$]</b>
Hydro-Pac Inc.	C03-15-70/140LX	20	77.130,00
PDC Machines Inc.	PDC-3-2500-10000	70	76.100,00

Fonte: Elaboração própria.

Os valores apresentados na Tabela 14 consideram a instrumentação necessária para operação dos equipamentos e resfriamento do gás.

O custo de investimento no tanque de armazenamento foi estimado com base na literatura disponível. Os valores dependem da pressão de armazenamento do gás e são apresentados para 35 MPa e 70 MPa. Os dados obtidos em US\$/kWh foram corrigidos com base na taxa de inflação norte americana acumulada até 2016, Tabela 15.

Tabela 15 - Custos dos cilindros de armazenamento disponíveis na literatura.

<b>Referência</b>	<b>Preço s/ Correção [US\$/kWh]</b>		<b>Inflação Acumulada no Período [%]</b>	<b>Preço Corrigido [US\$/kWh]</b>	
	<b>Pressão 35 MPa</b>	<b>Pressão 70 MPa</b>		<b>Pressão 35 MPa</b>	<b>Pressão 70 MPa</b>
Hua et al. (2011)	15,40	18,70	6,6	16,42	19,94
Paster et al. (2011)	16,60	18,80	6,6	17,70	20,04

Fonte: Elaboração própria.

Os dados apresentados na Tabela 15 permitem observar uma coerência nos valores das referências, sendo adotado para efeito de cálculos o valor médio entre eles. O investimento foi calculado para um cilindro de 1 m<sup>3</sup> e considerado que o cilindro de 35 MPa armazenará hidrogênio a uma pressão inferior, 20 MPa. Dessa forma foram adotados os custos de investimento para os cilindros de US\$ 12,430.00 e US\$ 24,504.00, para 35 MPa e 70 MPa respectivamente.

O cálculo da energia elétrica consumida na compressão do hidrogênio foi realizado pela modelagem de um compressor adiabático considerando as vazões e as pressões de sucção e descarga dos equipamentos orçados. Foi adotado um valor para a eficiência adiabática dos compressores de 70%. Os parâmetros dos compressores e o consumo de energia elétrica são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Consumo de energia elétrica dos compressores.

<b>Fabricante/Modelo</b>	<b>Sucção [MPa]</b>	<b>Descarga [MPa]</b>	<b>Vazão [Nm<sup>3</sup>/h]</b>	<b>Consumo de Eletricidade [kWh/Nm<sup>3</sup>]</b>
Hydro-Pac/C03-15-70/140LX	1,0	20	31,0	0,25
PDC Machines/ PDC-3-2500-10000	1,0	70	9,3	0,39

O custo de operação do sistema foi calculado com base na eletricidade produzida por fontes alternativas de energia, solar e eólica, considerando-se a geração centralizada. Essa consideração é feita baseada na integração do armazenamento de hidrogênio com sistemas de geração de energia renovável.

O valor da energia elétrica gerada por plantas eólicas foi calculado com base na média dos preços de venda ofertados pelas usinas eólicas no último leilão de energia de fontes alternativas (FA 2015) realizado pela Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 27 de abril de 2015, R\$ 177,47 por MWh, com prazo de entrega da energia a partir de 1º de janeiro de 2016 (CCEE, 2015). Esse valor foi convertido para o dólar do dia pela cotação do Banco Central do Brasil, R\$ 2,92 por US\$ obtendo-se o valor de 0,06078 US\$/kWh.

No caso da geração solar fotovoltaica o valor utilizado como referência para o custo da energia elétrica foi o valor médio ofertado no 6º leilão de energia de reserva realizado em 31 de outubro de 2014 com prazo para entrega a partir de outubro de 2017. O valor médio ofertado foi de R\$ 215,12 por MWh. Esse valor foi convertido para em US\$/MWh pela cotação fornecida pelo Banco Central do Brasil na mesma data (R\$ 2,44 por US\$) resultando no preço da energia solar, 0,08816 US\$/kWh.

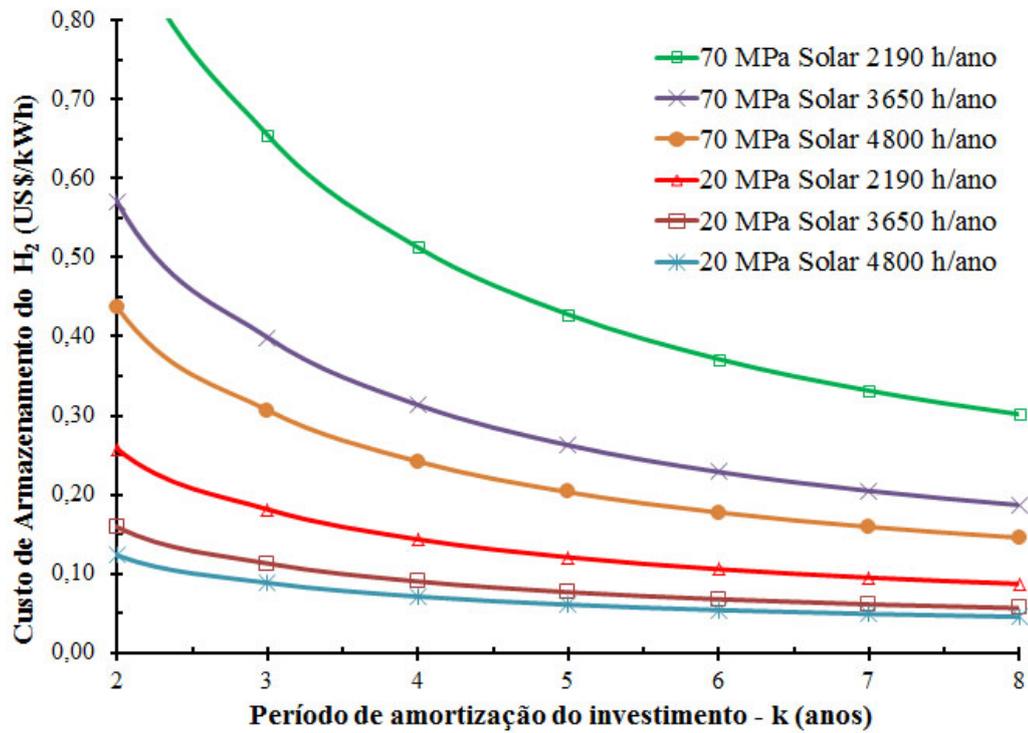
De acordo com Parks *et al.* (2014), o custo de manutenção de um sistema de armazenamento de hidrogênio por compressão pode ser estimado em função da taxa de falhas em um determinado tempo. Para um período de 1 ano o custo de manutenção estimado é de 0,11 US\$/kg de H<sub>2</sub>. Esse valor é convertido em US\$/kWh com base no PCI do hidrogênio.

### 5.3 Resultados da análise econômica do armazenamento de hidrogênio

A equação para a determinação do custo de armazenamento do hidrogênio depende de parâmetros que podem sofrer alterações dependendo da análise realizada como, por exemplo, o número de horas de operação do sistema por ano, a taxa de juros considerada o tempo esperado para o retorno do capital, entre outros. Dessa forma a análise do custo do armazenamento de hidrogênio é realizada variando um parâmetro de interesse dentro de uma gama de valores possíveis, mantendo-se os outros constantes. Isso permite avaliar a influência específica dessa variável no custo final obtido.

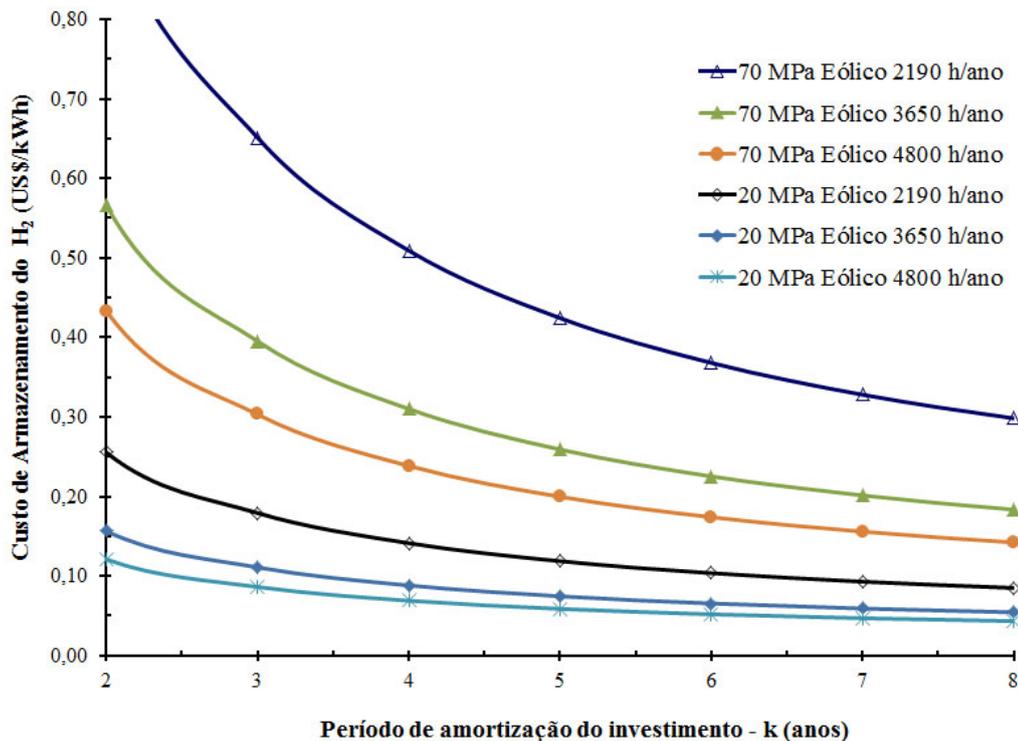
O tempo de operação do sistema irá depender da finalidade do hidrogênio armazenado. No caso de uso de fonte solar fotovoltaica para a produção e o armazenamento do hidrogênio deve ser considerado um período de operação de 6 horas por dia (2160 h/ano), correspondendo ao período máximo recomendado para o aproveitamento da radiação solar na geração (SILVEIRA; TUNA e LAMAS, 2013). Para o uso do hidrogênio em ônibus movidos por células a combustível pode ser considerado um período equivalente de 4.800 h/ano correspondente a 16 h/dia por 300 dias/ ano (BRAGA, 2010). Nas Figura 23 e Figura 24 são apresentados os custos do armazenamento de hidrogênio a 20 MPa e 70 MPa em função do período de amortização para períodos equivalentes de utilização de 2190 h/ano, 3650 h/ano e 4800 h/ano respectivamente.

Figura 23 - Custo do armazenamento de hidrogênio utilizando eletricidade de fonte solar em função payback ( $r = 8\%$ ).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 - Custo do armazenamento de hidrogênio utilizando eletricidade de fonte eólica em função payback ( $r = 8\%$ ).

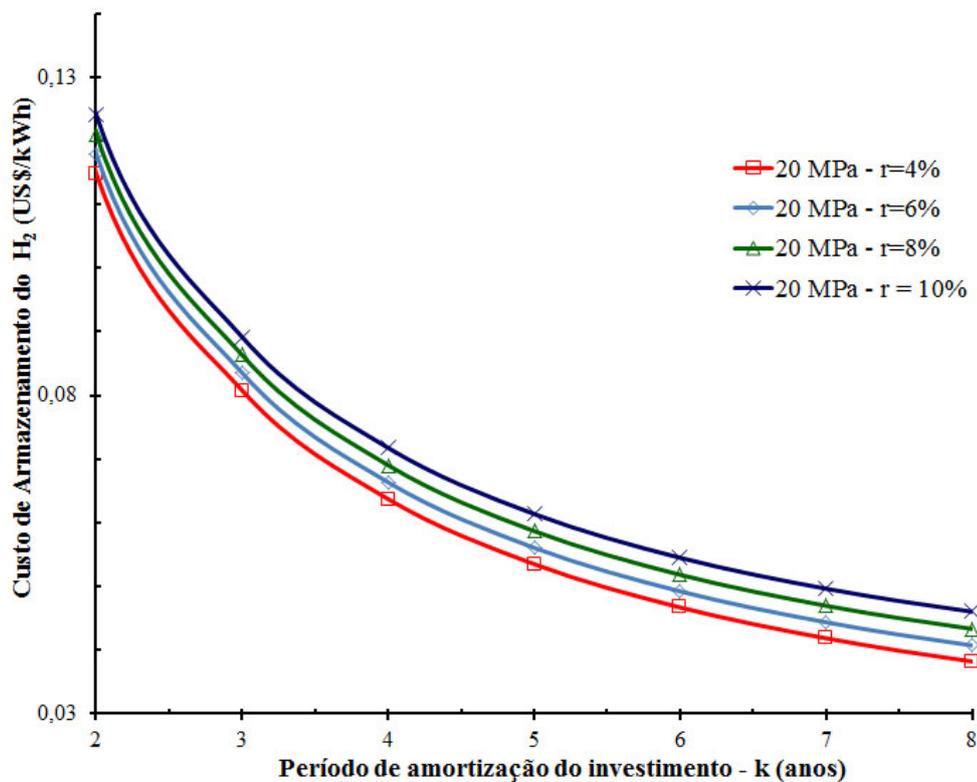


Fonte: Elaboração própria.

Nas Figura 23 e Figura 24 é mostrada a variação do custo do hidrogênio armazenado nas pressões de 20 MPa e 70 MPa em função do período de amortização do investimento. Primeiramente destaca-se a grande diferença entre os custos de armazenamento quando a pressão é alterada. Utilizando-se a energia elétrica de fonte solar fotovoltaica operando 4800 h/ano com uma expectativa de retorno de investimento de cinco anos o custo de armazenar hidrogênio a 20 MPa é aproximadamente de 0,061 US\$/kWh enquanto a 70 MPa, nas mesmas condições, 0,230 US\$/kWh. Outra observação é a acentuada influência do período de amortização do investimento no custo do armazenamento até aproximadamente 7 anos. A partir desse ponto a variação do custo torna-se menos significativa.

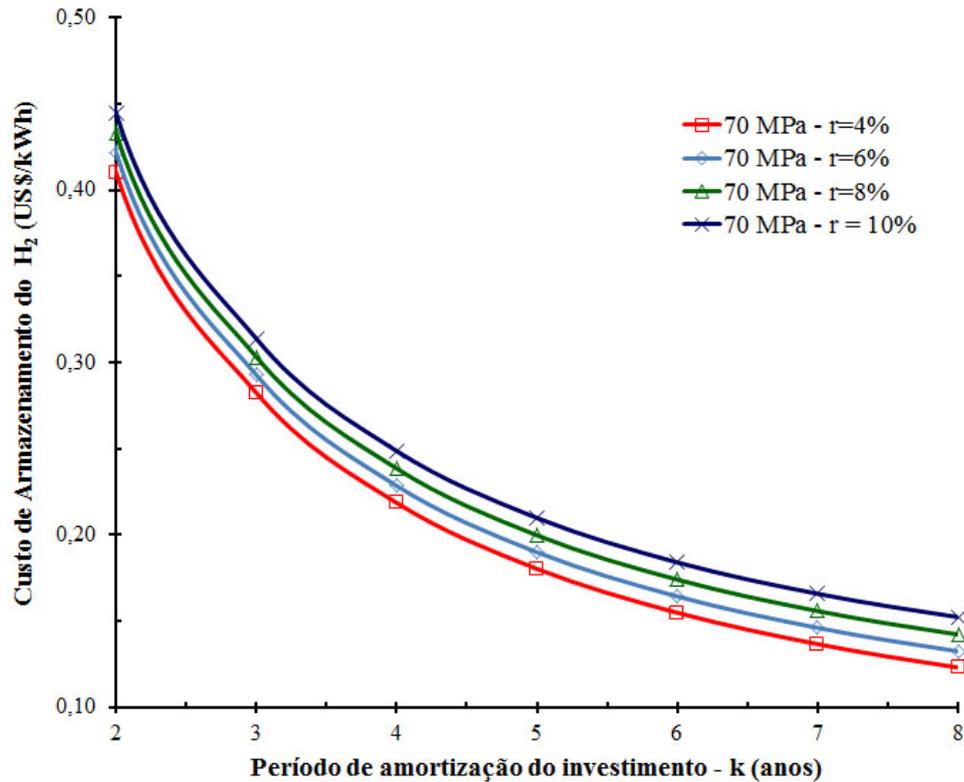
A influência da taxa anual de juros foi verificada para um sistema utilizando energia eólica operando 4800 h/ano variando-se o *payback* entre 2 e 10 anos, nas Figura 25 e Figura 26 são apresentados os resultados dessa análise para as pressões de 20 MPa e 70 MPa respectivamente.

Figura 25 - Custo do armazenamento a 20 MPa utilizando fonte eólica (4800 h/ano).



Fonte: Elaboração própria.

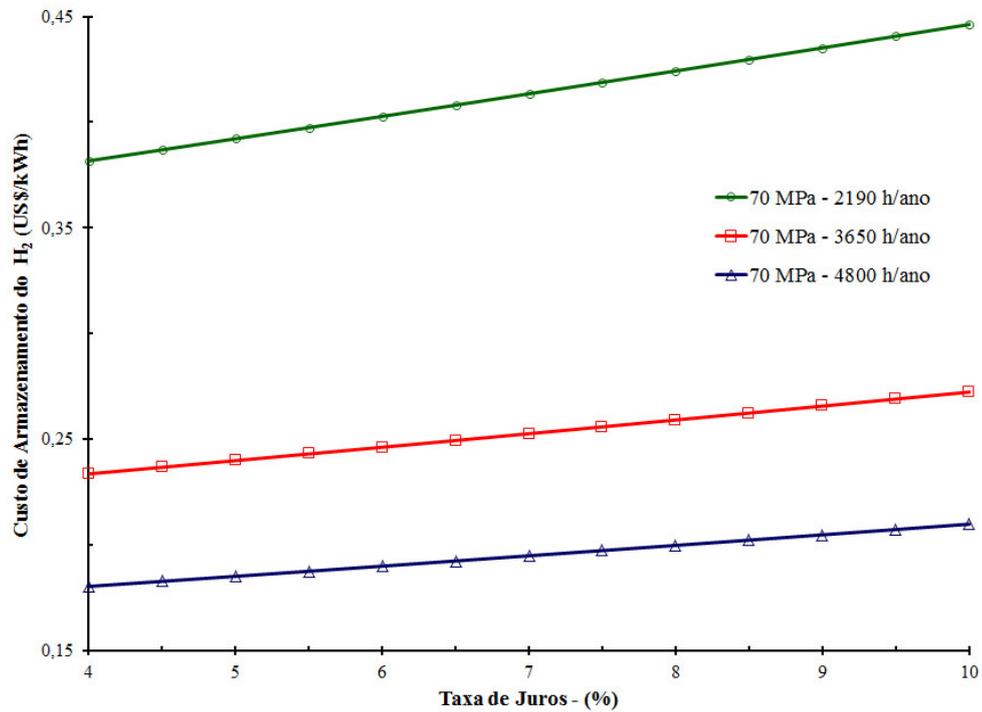
Figura 26 - Custo do armazenamento a 70 MPa utilizando fonte eólica (4800 h/ano).



Fonte: Elaboração própria.

Analisando as Figura 25 e Figura 26 pode ser verificado que para o armazenamento de hidrogênio a variação taxa anual de juros tem uma influência pequena no custo do hidrogênio armazenado quando considerada a variação do *payback*. Para um período de amortização do capital de 5 anos, o custo do armazenamento a 70MPa com uma taxa de juros de 4% ao ano é de 0,180 US\$/kWh aumentando a taxa para 10% ao ano esse custo irá aumentar para 0,210 US\$/kWh. Essa variação é evidenciada no gráfico apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Custo do armazenamento a 70 MPa utilizando fonte eólica, k=5 anos. Influência da taxa de juros.

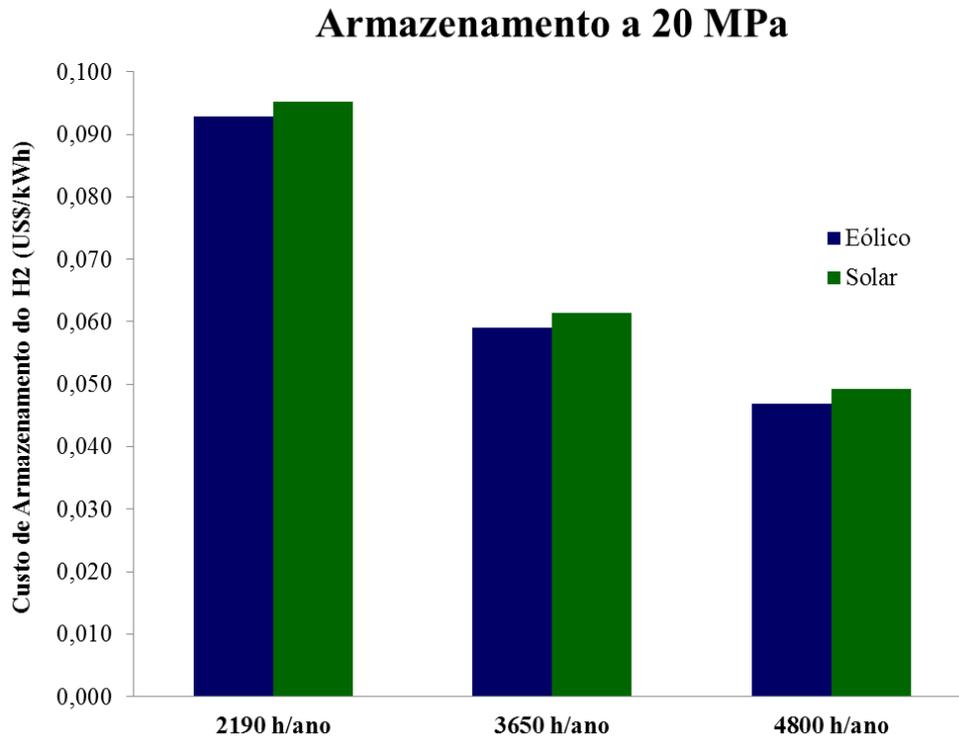


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 27 pode ser observado pela inclinação das retas que a variação da taxa anual de juros exerce pouca influência no custo final do armazenamento.

No gráfico da Figura 28 é analisado comparativamente o custo do armazenamento do hidrogênio a pressão de 20 MPa considerando uma taxa de juros de 8% ao ano e um período de retorno do capital de 7 anos.

Figura 28 - Custo do armazenamento de hidrogênio a 20 MPa considerando um payback de 7 anos e uma taxa de juros de 8% ao ano.



Fonte: Elaboração própria.

A análise econômica do armazenamento de hidrogênio por compressão permite um aumento na precisão da estimativa do custo do hidrogênio produzido por fontes renováveis de energia. Para isso, o custo do armazenamento deverá ser incorporado ao custo da produção do hidrogênio.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Os principais processos de armazenamento de hidrogênio são por compressão a altas pressões, na forma líquida por processos criogênicos e em hidretos metálicos.

De acordo com pesquisas realizadas o processo por compressão é o mais utilizado por apresentar maior nível de eficiências energéticas e exergéticas e menores custos associados ao armazenamento de hidrogênio.

O processo eletrolítico para produção de hidrogênio renovável envolve a utilização de eletricidade de plantas renováveis de geração de energia para promover a reação química de decomposição da molécula de água em hidrogênio e oxigênio.

Tendo como base os resultados obtidos na análise energética é possível concluir que a compressão do hidrogênio para armazenamento consome uma fração de 4,2 a 7,7 % da energia total armazenada, dependendo da pressão considerada (20 a 70 MPa). Pressões de armazenamento mais elevadas consomem mais energia. Este resultado é compatível com os dados disponíveis na literatura.

Os resultados obtidos da análise exergética permitem concluir que a maior perda de exergia no processo de armazenamento está localizada no primeiro estágio de compressão, correspondendo a 27 % da irreversibilidade total do sistema a 20 MPa e a 28,1% para sistemas de armazenamento a 70 MPa.

O custo de armazenamento do hidrogênio obtido na análise econômica depende da pressão de armazenamento e das fontes de renováveis de produção de eletricidade utilizadas. Considerando um período de retorno de capital de 7 anos, uma taxa anual de juros de 8% e 4800 horas de operação por ano, o sistema de armazenamento de hidrogênio a pressão de 20 MPa utilizando eletricidade proveniente da energia eólica apresentou o menor custo de armazenamento, 0,045 US\$/kWh, enquanto que para a de sistema fotovoltaico apresentou um valor de 0,047 US\$/kWh. Já para pressão armazenamento de 70 MPa utilizando a eletricidade proveniente de fonte eólica foi de 0,235 US\$/kWh e solar foi de 0,506 US\$/kWh. O custo do processo de armazenamento de hidrogênio representa entre 10 e 20 % do seu custo de produção por fontes renováveis, devendo ser considerado para a determinação do custo final

do hidrogênio renovável a ser fornecido ao usuário consumidor, quer seja para aplicações estacionárias, quer seja pra veiculares.

## **6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões de continuidade ao estudo realizado, tem-se:

- Análise técnica e econômica do armazenamento de energia por compressão do hidrogênio em comparação com armazenamento de eletricidade utilizando baterias de lítio;
- Análise ambiental para a determinação da eficiência ecológica considerando a energia utilizada no processo de armazenamento de hidrogênio por compressão;
- Análise técnica e econômica do uso de materiais empregados em tanques para o armazenamento de hidrogênio a alta pressão;
- Estudar a integração da produção de hidrogênio com o armazenamento e sua utilização para a geração de eletricidade em células a combustível estacionárias e veiculares, considerando *smart grid*.

## REFERÊNCIAS

ABBASI, T.; ABBASI, S. A. “Renewable” hydrogen: Prospects and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3034–3040, 2011.

ALAZEMI, J.; ANDREWS, J. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 483–499, 2015.

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

BOLOY, R. A. M.; SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; CORONADO, C. R.; ANTUNES, J. S. Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5194–5201, 2011.

BROWN, R. N. **Compressors: Selection and Sizing**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2005. 620 p.

CALISKAN, H.; DINCER, I.; HEPBASLI, A. Energy, exergy and sustainability analyses of hybrid renewable energy based hydrogen and electricity production and storage systems: Modeling and case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, n. 2, p. 784–798, 2013.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **3º Leilão de Fontes Alternativas (3º LFA)**, 2015. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE\\_350580](https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_350580)>.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **6º Leilão de Energia de Reserva**, 2014. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/wcm/idc/groups/bibpublic\\_comercenergia/documents/conteudoocce/ccee\\_321418.pdf](http://www.ccee.org.br/portal/wcm/idc/groups/bibpublic_comercenergia/documents/conteudoocce/ccee_321418.pdf)>.

CHAUBEY, R.; SAHU, S.; JAMES, O. O.; MAITY, S. A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and

sustainable sources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 443–462, 2013.

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

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

GAO, D.; JIANG, D.; LIU, P.; et al. An integrated energy storage system based on hydrogen storage: Process configuration and case studies with wind power. **Energy**, v. 66, p. 332–341, 2014.

GONZÁLEZ, E. L.; LLERENA, F. I.; PÉREZ, M. S.; IGLESIAS, F. R.; MACHO, J. G. Energy evaluation of a solar hydrogen storage facility: Comparison with other electrical energy storage technologies. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, p. 5518–5525, 2015.

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

IPCC. **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contributed ed. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

KHAITAN, S. K.; RAJU, M.; MCCALLEY, J. D. Design of a novel and efficient hydrogen compressor for wind energy based storage systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 3, p. 1379–1387, 2015.

KOTAS T.J. **The exergy method of thermal plant analysis**. London: Butterworths; 1985.

KRISHNA, R.; TITUS, E.; SALIMIAN, M.; et al. Hydrogen Storage for Energy Application.

Hydrogen Storage. [S.l.]: InTech, 2012. p. 243–266.

LEMMON, E.W., HUBER, M.L., McLINDEN, M.O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2013.

LIPMAN, T. E.; RAMOS, R.; KAMMEN, D. M. An Assessment of Battery and Hydrogen Energy Storage Systems Integrated with Wind Energy Resources in California. California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research. 2005.

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**, v. 38, n. 36, p. 15868–15877, 2013.

MURADOV, N.; VEZIROGLU, T. “Green” path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, n. 23, p. 6804–6839, 2008.

OZSABAN, M.; MIDILLI, A.; DINCER, I. Exergy analysis of a high pressure multistage hydrogen gas storage system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 17, p. 11440–11450, 2011.

PATEL, M. R. **Wind and Solar Power Systems**. 2 ed. Kings Point: Taylor & Francis Group, 2006. 431 p.

PÉREZ, N. P. *et al.* Energetic and exergetic analysis of a new compact trigeneration system run with liquefied petroleum gas. **Energy**, v. 90, p. 1411–1419, 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 1 ed. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. 529 p.

SILVA, S. B. Dimensionamento Ótimo De Sistemas Híbridos , Com Geração Fotovoltaica E Célula a Combustível , Para Atendimento a Comunidades Isoladas Na Amazônia. , p. 132, 2010.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. D. Q. The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 133–141, 2013.

SILVEIRA, J.L. **Sustainable Hydrogen Production Processes: Energy, Economic and Ecological Issues**. 1 ed. Cham: Springer International Publishing AG, 2016. 246 p.

SOBRINO, F. H.; MONROY, C. R.; PÉREZ, J. L. H. Critical analysis on hydrogen as an alternative to fossil fuels and biofuels for vehicles in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 772–780, 2010.

TZIMAS E.; FILIOU C.; PETEVES S. D.; VEYRET J. B. **Hydrogen storage: state-of-art and future perspective**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. 91 p.

WIPKE, K.; SPRIK, S.; KURTZ, J.; RAMSDEN T.; AINSCOUGH C.; SAUR G. National Fuel Cell Electric Vehicle Learning Demonstration Final Report. National Renewable Energy Laboratory, Golden, 2012.