

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 02/09/2018.



**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

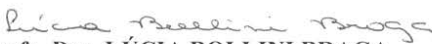
BANCA EXAMINADORA:



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 exérgica da compressão e do armazenamento de hidrogênio, determinando a eficiência exérgica 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, exérgico e econômico.

PALAVRAS-CHAVE: Armazenamento de hidrogênio; Armazenamento por compressão; Análise energética; Análise exérgica; 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 φ 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 ²]
c_p	Calor específico a pressão constante	[kJ/kmol.K]
c_v	Calor específico a volume constante	[kJ/kmol.K]
CP	Coefficiente de potência	[-]
CO_2	Dióxido de carbono	[-]
$(CO_2)_e$	Dióxido de carbono equivalente	[kg (CO ₂)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 ³ /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 ³]
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

ΔG	Varição da energia livre de Gibbs	[kJ/kmol]
ΔH	Varição de entalpia	[kJ/kmol]

ε	Eficiência ecológica	[-]
Π_g	Indicador de poluição	[kg (CO ₂)e/MJ]
η_{ISO}	Eficiência isentrópica	[-]
ρ_{AR}	Massa específica do ar	[kg/m ³]
v	Volume específico	[m ³ /kg]

SUMÁRIO

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

4	ANÁLISE EXERGÉTICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO POR COMPRESSÃO	52
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
5	ANÁLISE ECONÔMICA DO ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO	60
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
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
6.1	CONCLUSÕES	70
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72

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.

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>.

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/conteudocece/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.