



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

GUSTAVO GARCIA ARANTES BRAGA

**ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E DE SUSTENTABILIDADE DA
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO RENOVÁVEL**

Guaratinguetá
2015

DM
2015

BRAGA, Gustavo Garcia Arantes

GUSTAVO GARCIA ARANTES BRAGA

ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E DE SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO
DE HIDROGÊNIO RENOVÁVEL

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. Júlio Santana Antunes

Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

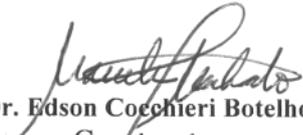
B813a	<p>Braga, Gustavo Garcia Arantes</p> <p>Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável / Gustavo Garcia Arantes Braga. - Guaratinguetá , 2015</p> <p>80 f.: il.</p> <p>Bibliografia: f. 75-80</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Julio Santana Antunes</p> <p>Co orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira</p> <p>1. Hidrogênio 2. Energia – Fontes alternativas 3. Eletrolise</p> <p>I. Título</p> <p>CDU 546.11</p>
-------	---

GUSTAVO GARCIA ARANTES BRAGA

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

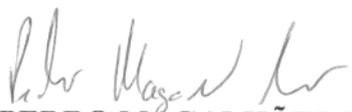
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


P/ Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JULIO SANTANA ANTUNES
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Unesp-Feg


Prof. Dr. EDERALDO GODOY JUNIOR
UNITAU

Agosto de 2015

DADOS CURRICULARES

GUSTAVO GARCIA ARANTES BRAGA

NASCIMENTO 17.05.1989 – BOTUCATU / SP

FILIAÇÃO José Carlos Arantes Braga
Rosana Aparecida Garcia Braga

2008/2012 Curso de Graduação
Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

DEDICATÓRIA

de modo especial, dedico esse trabalho aos meus companheiros da República 6 de Paus que me apoiaram e incentivaram durante mais uma etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Júlio Santana Antunes e ao meu co-orientador Prof. Dr. José Luz Silveira, os quais sempre me auxiliaram durante todo o desenvolvimento desse trabalho,

ao Prof. Dr. Rolando A. Zanzi Vigouroux por me receber em sua casa e por toda sua preocupação e afeto durante minha estadia em Estocolmo.

EPÍGRAFE

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

BRAGA, G. G. A. **Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável**. 2015. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

O desenvolvimento de projetos de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis apresenta cada vez mais destaque no cenário energético. Nesse quesito, o Brasil apresenta um grande potencial para geração de energia oriunda de fontes renováveis, destacando-se a energia solar, energia eólica e as centrais hidrelétricas. Outra fonte de energia em evidência é o hidrogênio, uma vez que a utilização desse combustível não causa a formação de gases causadores do efeito estufa. Entretanto, o hidrogênio só pode ser considerado como fonte renovável se sua produção ocorrer a partir de outras fontes renováveis. Uma forma de produção de hidrogênio é a eletrólise da água, essa reação consiste no processo de dissociação das moléculas da água através da utilização de energia elétrica. Esse dissertação tem como objetivo caracterizar a produção de hidrogênio a partir da eletrólise e expor os principais aspectos técnicos, econômicos e ambientais que influenciam na implantação de uma central de produção de hidrogênio. Com relação aos aspectos econômicos, foi empregada a metodologia proposta por Braga (2014), sendo apresentados gráficos com a finalidade de ilustrar o custo de produção do hidrogênio em função de cada uma das fontes estudadas. Para a análise ambiental, foi utilizada a ferramenta para análise multicritérios AHP proposta por Saaty (1980), associando os aspectos ambientais aos econômicos. Os resultados foram satisfatórios e sugerem que as tecnologias empregadas atualmente sejam significativamente mais atrativas quanto aos aspectos econômicos, entretanto, conforme os aspectos ambientais são ponderados, as alternativas renováveis começam a se destacarem.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio. Fontes Renováveis. Eletrólise. Econômico. Ambiental. AHP.

BRAGA, G. G. A. **Technical, economic and sustainability aspects for renewable hydrogen production.** 2015. 80 p. Master Thesis (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The development of power generation projects from renewable sources has increasingly highlighted in the energy scenario. In this aspect, Brazil has great potential for power generation coming from renewable sources, especially solar energy, wind energy and hydropower. Another source of energy in evidence is the hydrogen, since the use of this fuel does not cause the formation of gases causing the greenhouse effect. However, hydrogen can only be considered as a renewable source if its production occurs from other renewable sources. One form of hydrogen production is the electrolysis of water, this reaction consist in the process of water dissociation through the use of electrical energy. This work aims to characterize the production of hydrogen from electrolysis and expose the main technical, economic and environmental factors that influence the implementation of a central of hydrogen production. With regard to economic aspects, it was used the methodology proposed by Braga (2014), and graphs were presented in order to illustrate the cost of hydrogen production due to each of the sources studied. For environmental analysis, the AHP tool was used to a multiple criteria analysis as proposed by Saaty (1980), and it were associated the environmental aspects to economics. The results were satisfactory and suggest that the currently technologies employed are significantly more attractive when the economic aspects are analyzed, however according to the environmental aspects start to be considered, the renewable alternatives stand out.

KEYWORDS: Hydrogen. Renewable Sources. Electrolysis. Economic. Environmental. AHP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais processos de produção de hidrogênio e suas matérias-primas.....	20
Figura 2: Rede de distribuição dos gasodutos no Brasil.....	22
Figura 3: Sistema básico para eletrólise da água.....	25
Figura 4: Ilustração esquemática de um eletrolisador alcalino.	27
Figura 5: Ilustração esquemática de um eletrolisador PEM.....	30
Figura 6: Ilustração esquemática do funcionamento de um eletrolisador SOEC.....	33
Figura 7: Radiação solar no Brasil – Média anual.	36
Figura 8: Diagrama esquemático de produção de hidrogênio a partir da energia solar.	37
Figura 9: Mapa temático do potencial eólico no Brasil.....	38
Figura 10: Diagrama esquemático de produção de hidrogênio a partir da energia eólica.....	39
Figura 11: Potencial hidrelétrico brasileiro por sub-bacias hidrográficas.....	40
Figura 12: Esquema de eletrólise em uma usina hidrelétrica.....	41
Figura 13: Estrutura da hierarquia de decisão – Objetivo.	57
Figura 14: Estrutura da hierarquia de decisão – Aspectos Econômicos.....	57
Figura 15: Estrutura da hierarquia de decisão – Aspectos Ambientais.	57
Figura 16: Estrutura da hierarquia de decisão – Software SuperDecisions.....	58
Figura 17: Hierarquia das tecnologias apresentada pelo software SuperDecisions.	68
Figura 18: Hierarquia das tecnologias apresentada pelo software SuperDecisions (2ª Simulação).....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação técnica de três fornecedores de eletrolisadores alcalinos.	28
Tabela 2: Especificação técnica de três fornecedores de eletrolisadores PEM.	31
Tabela 3: Principais características dos eletrolisadores abordados.	34
Tabela 4: Rendimento global da produção de hidrogênio – Fontes renováveis x Eletrolisadores PEM.	42
Tabela 5: Resumo dos valores considerados para a análise.	47
Tabela 6: Escala fundamental de Saaty.	54
Tabela 7: Matrizes de comparação dos critérios.	60
Tabela 8: Matrizes de comparação dos subcritérios relacionados aos aspectos econômicos...	61
Tabela 9: Matrizes de comparação dos subcritérios relacionados aos aspectos ambientais. ...	62
Tabela 10: Informações consideradas para a análise do AHP.	62
Tabela 11: Desempenho das tecnologias quanto ao custo de produção.	64
Tabela 12: Desempenho das tecnologias quanto à regionalidade.	65
Tabela 13: Desempenho das tecnologias quanto ao rendimento.	65
Tabela 14: Desempenho das tecnologias quanto às emissões de CO ₂ e.	66
Tabela 15: Desempenho das tecnologias quanto às emissões SO ₂ e.	66
Tabela 16: Desempenho das tecnologias quanto à área requerida.	67
Tabela 17: Desempenho das tecnologias quanto aos impactos diretos.	67
Tabela 18: Matrizes de comparação dos critérios (2ª Simulação).	70
Tabela 19: Matrizes de comparação dos subcritérios relacionados aos aspectos econômicos (2ª Simulação).	70

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

C_{Electric}	custo da eletricidade	US\$/kg
C_{H_2}	custo final do hidrogênio	US\$/kWh
$C_{\text{H}_2\text{O}}$	custo da água	US\$/(m ³ /h)
C_{Main}	custo de manutenção	US\$/kWh
C_{Op}	custo de operação	US\$/kWh
E_{H_2}	energia contida no hidrogênio	kW
f	fator de anuidade	1/ano
H	tempo de operação	h/ano
Inv	valor de investimento no eletrolisador	US\$
k	período de amortização	ano(s)
\dot{m}_{H_2}	vazão mássica de hidrogênio	kg/s
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	quantidade de água requerida pelo eletrolisador	kg/s
PCI	poder calorífico inferior	kJ/kg
P_{Electric}	energia elétrica consumida	kW
r	taxa de juros anual	%
ϕ	fase(s)	-
μ	inconsistência da matriz de julgamento	-
λ	autovalor	-

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES

AA	Aspectos Ambientais	-
AC	Corrente alternada	-
AE	Aspectos Econômicos	-
AHP	Análise Hierárquica de Processos	-
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	-
AR	Área Requerida	-
BCB	Banco Central do Brasil	-
C _n H _m	Hidrocarbonetos	-
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão	-
CO	Monóxido de carbono	-
CO ₂	Dióxido de carbono	-
CO _{2e}	Dióxido de carbono equivalente	-
CP	Custo de produção	US\$/kg
DC	Corrente contínua	-
e ⁻	Elétron	-
EC	Emissões de dióxido de carbono equivalentes	kg/kg
EE	Eletrólise Eólica	-
EH	Eletrólise Hidrelétrica	-
EL	Eletrólise Solar	-
EMTU	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos	-
EPE	Empresa de Pesquisa Energética	-
ES	Emissões de dióxido de enxofre equivalentes	kg/kg
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program	-
GC	Gaseificação do Carvão	-
GESEL	Grupo de Estudos do Setor Elétrico	-
H ⁺	Íon hidrogênio	-
H ₂	Hidrogênio	-
H ₂ O	Água	-
i	Corrente	A
ID	Impactos Diretos	-

IEA	International Energy Agency	-
IGP-M	Índice Geral de Preço do Mercado	-
KOH	Hidróxido de potássio	-
MME	Ministério de Minas e Energia	-
NaOH	Hidróxido de sódio	-
NREL	National Renewable Energy Laboratory	-
O ₂	Oxigênio	-
O ⁻²	Íon oxigênio	-
OH ⁻	Íon hidroxila	-
OP	Oxidação Parcial	-
PCH	Pequena Central Hidrelétrica	-
PEM	Proton Exchanger Membrane	-
PV	Painel fotovoltaico	-
RD	Rendimento	%
RG	Regionalidade	-
RV	Reforma a vapor	-
SABESP	Saneamento Básico do Estado de São Paulo	-
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia	-
SO ₂	Dióxido de enxofre	-
SO _{2e}	Dióxido de enxofre equivalente	-
SOE	Solid Oxide Electrolyzer	-
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell	-
V	Tensão	V
VAC	Tensão de corrente alternada	-
VDC	Tensão de corrente contínua	-
Y ₂ O ₃	Óxido de ítrio	-
YSZ	Zircônia estabilizada por óxido de ítrio	-
ZrO ₂	Dióxido de zircônio	-

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS DA DISSERTAÇÃO	18
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	20
2.1	REFORMA A VAPOR DO GÁS NATURAL	21
2.2	OXIDAÇÃO PARCIAL DE HIDROCARBONETOS	23
2.3	GASEIFICAÇÃO DE CARVÃO	24
2.4	ELETRÓLISE DA ÁGUA	25
2.4.1	Eletrolisador Alcalino	26
2.4.2	Eletrolisadores PEM	29
2.4.3	Eletrolisadores de Óxido Sólido (SOE)	31
3	FONTES RENOVÁVEIS	35
3.1	HIDROGÊNIO A PARTIR DE ENERGIA SOLAR	35
3.2	HIDROGÊNIO A PARTIR DE ENERGIA EÓLICA	37
3.3	HIDROGÊNIO A PARTIR DE ENERGIA HIDRELÉTRICA	39
4	ANÁLISE ECONÔMICA	43
4.1	METODOLOGIA	43
4.2	RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA	47
5	ANÁLISE MULTICRITÉRIOS: MÉTODO AHP	54
6	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

É crucial que haja uma transição dos sistemas energéticos a base de combustíveis fósseis para sistemas baseados em energias renováveis, pois assim é possível combater as mudanças climáticas causadas pelas emissões dos gases originados da queima desses combustíveis. A utilização de hidrogênio renovável é uma possível solução para esse problema (KLEIJN; VOET, 2010).

A produção de hidrogênio pela maioria das tecnologias existentes implica no uso substancial de combustíveis fósseis, o que se associa à emissão de CO₂. Desta forma, apenas se considera a produção de hidrogênio "livre de carbono" caso se empreguem fontes de energia renováveis que não emitam dióxido de carbono para a atmosfera (ABBASI; ABBASI, 2010).

Uma alternativa para uma produção autossustentável de hidrogênio é o emprego da energia solar utilizando-se de células fotovoltaicas e/ou da energia eólica pela implantação de turbinas eólicas, destinando a energia elétrica gerada ao acionamento de eletrolisadores de água. Entretanto, essas são fontes difusas de geração de energia, sendo necessário à utilização de redes de transmissão de longa distância para um possível melhor aproveitamento das regiões ótimas de conversão desses tipos de energia (KLEIJN; VOET, 2010).

As fontes renováveis são candidatas que satisfazem a maioria dos critérios das tecnologias autossustentáveis de abastecimento energético. Entretanto, sabe-se que os custos de produção de energia a partir de fontes renováveis são significativamente mais elevados que os obtidos por sistemas de geração de energia que utilizam combustíveis fósseis e nucleares, com exceção da energia hidrelétrica. No entanto, o futuro pode ser diferente, uma vez que as fontes eólicas e solares experimentam um crescimento exponencial com queda de custos, tornando-se cada vez mais comercialmente competitivas (ORHAN et al., 2012).

Ngoh e Njomo (2012) consideram a energia solar a melhor alternativa para produção de hidrogênio como uma energia autossustentável, tendo em vista que ela é a fonte mais abundante de energia renovável. Já para Genç et al. (2012) a energia eólica apresenta um desenvolvimento mais acelerado quando comparado com as outras fontes de energia renovável, sendo essa uma melhor opção para produção de hidrogênio autossustentável.

Para Padilha et al. (2009) a inviabilidade da economia de hidrogênio ocorre pelo alto custo de produção do combustível. No entanto, em alguns países, como é o caso do Brasil, existe a possibilidade de produção de hidrogênio a partir de um excedente de água vertida em centrais hidrelétricas. Yumurtaci e Bilgen (2004) apresentam se utiliza que a produção de hidrogênio a partir da energia excedente de pequenas centrais hidrelétricas para tornar a produção economicamente viável.

Atualmente, o hidrogênio é principalmente produzido pela reforma a vapor do gás natural, um processo que gera grandes quantidades de gases causadores do efeito estufa. Aproximadamente 50% de toda demanda mundial de hidrogênio é atendida pela produção via reforma a vapor do gás natural, cerca de 30% a partir da reforma do nafta/óleo de refinarias e indústrias químicas, 18% a partir da gaseificação do carvão, apenas 3,9% do hidrogênio é produzido via eletrólise da água, sendo 0,1% gerado por outros meios (KALAMARAS; EFSTATHIOU, 2013).

Existem essencialmente dois tipos de eletrolisadores de baixa temperatura comercializados: os eletrolisadores alcalinos, que estão há mais tempo no mercado; e um mais recente, os eletrolisadores com membrana trocadora de prótons (PEM). Um terceiro tipo, o eletrolisador de sólido óxido (SOE), é o único que ainda está no estágio de pesquisa e desenvolvimento, não sendo disponível comercialmente (NREL, 2008).

Devido a essa grande variedade de tecnologias para a produção de hidrogênio, faz-se necessário a seleção de qual ou quais seriam os métodos mais indicados para a produção do hidrogênio, considerando não apenas os custos associados à produção do hidrogênio, mas sim ponderando, além dos aspectos econômicos, os aspectos ambientais.

Com a finalidade de unir as análises econômicas e ambientais, faz-se necessário a utilização de uma ferramenta multicritério, ou seja, uma metodologia que permite a avaliação e ponderação simultânea de diversos critérios e subcritérios. Existem diversos métodos que possibilitam essa união, dentre eles está o AHP ou Análise Hierárquica de Processos. O método AHP desde a sua invenção, tem sido uma ferramenta muito utilizada pelos tomadores de decisões e pesquisadores; sendo que esse método é uma das ferramentas multicritérios mais amplamente utilizadas para tomada de decisões. Diversos trabalhos veem sendo publicados com base no AHP: incluindo aplicações do AHP para diferentes campos, tais como planejamento, seleção da melhor alternativa, distribuição de recursos, resolução de conflitos, otimização, entre outros. (VAIDYAA; KUMARB, 2006).

1.2 OBJETIVOS

Caracterizar a produção de hidrogênio a partir de eletrólise e expor os principais aspectos técnicos, econômicos e ambientais que influenciam na implantação de uma central de produção de hidrogênio renovável, com eletrolisador acionado por energia elétrica gerada a partir de fontes renováveis, tais como: hidrelétrica, solar e eólica.

Diante deste contexto são traçados os seguintes objetivos específicos:

- Levantamento das tecnologias utilizadas para a realização do processo da eletrólise da água;
- Breve avaliação do potencial de geração de energia elétrica renovável no Brasil, considerando fontes hidrelétricas, solares e eólicas;
- Alocar os custos de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, com eletrolisador acionado através da energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos, usinas hidrelétricas e turbinas eólicas;
- Selecionar dentre as principais tecnologias atualmente utilizadas na produção de hidrogênio e as tecnologias renováveis consideradas nessa dissertação, qual a alternativa mais indicada para produção de hidrogênio, analisando-se os aspectos econômicos e ambientais.

1.3 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS DA DISSERTAÇÃO

Com essa dissertação o autor espera apresentar as seguintes contribuições:

- Sumarizar aspectos técnicos das tecnologias utilizadas para realização do processo de eletrólise da água;
- Alocar um custo de produção de hidrogênio renovável, com o intuito de estabelecer uma ordem de grandeza em relação às tecnologias atualmente implantadas;
- Auxiliar na seleção de uma tecnologia para a produção de hidrogênio, apresentando uma metodologia multicritério como ferramenta de análise.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em um total de sete capítulos, considerando-se esse primeiro capítulo introdutório.

O Capítulo 2 apresenta uma breve explicação sobre os processos de produção de hidrogênio, entre eles a reforma a vapor do gás natural, a oxidação parcial de hidrocarbonetos, a gaseificação do carvão e a eletrólise da água, sendo expostas as três tecnologias mais utilizadas para a realização da eletrólise da água. Além disso, são levantados aspectos técnicos de cada tecnologia, tais como: eficiências, reações químicas relacionadas, entre outros. Ainda no Capítulo 2 são apresentados alguns fornecedores de eletrolisadores e algumas características de catálogos desses equipamentos.

O Capítulo 3 orienta quanto ao potencial energético do Brasil no que diz respeito às fontes renováveis abordadas. É nesse capítulo que é apresentado o rendimento global de geração de hidrogênio de acordo com a tecnologia selecionada e fonte considerada.

No Capítulo 4 são feitos os cálculos para a alocação dos custos de produção de hidrogênio de acordo com as fontes utilizadas para o processo de eletrólise. Para tanto, é selecionada a metodologia proposta por Braga (2014) como referência para os cálculos, sendo elaborados gráficos do custo de produção do hidrogênio por quilowatt hora em relação ao custo da energia elétrica de acordo com sua fonte de geração.

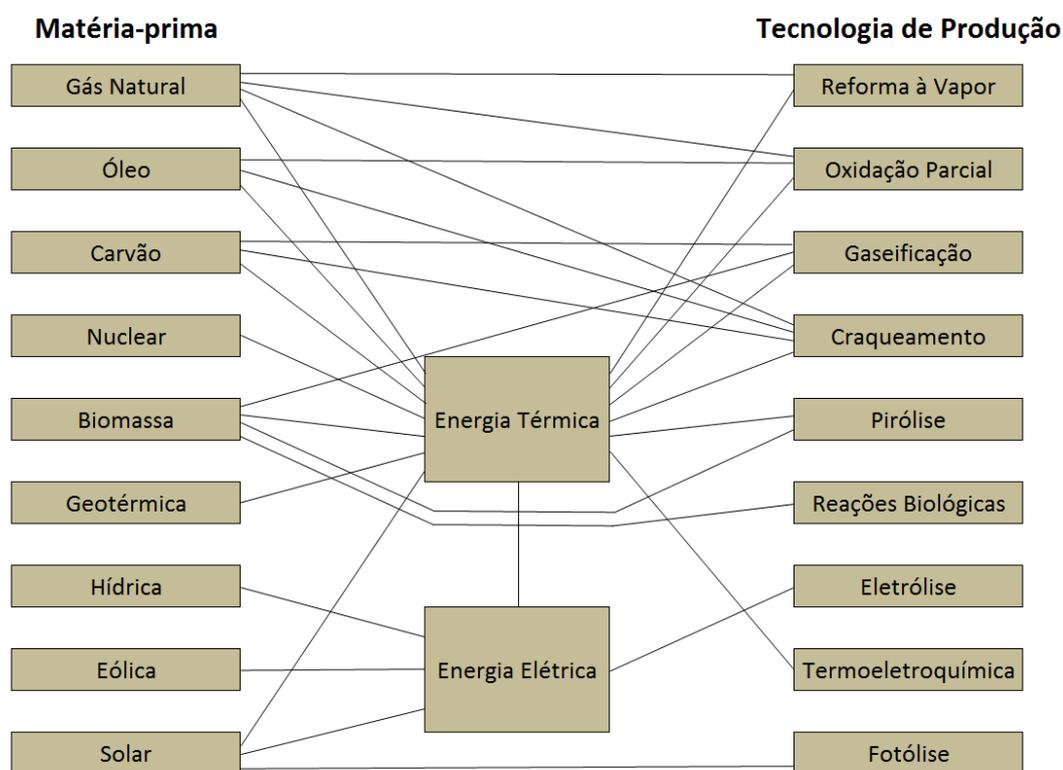
No Capítulo 5 é realizada a análise multicritério para seleção de uma tecnologia mais apropriada para a produção de hidrogênio, de acordo com os critérios considerados. Para tanto, faz-se necessário à introdução do método AHP como ferramenta de análise.

As conclusões da dissertação e as referências bibliográficas do trabalho são apresentadas nos Capítulos 6 e 7, respectivamente.

2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Atualmente, a produção de hidrogênio baseia-se em tecnologias que utilizam combustíveis fósseis ao longo do processo, sendo os principais métodos de produção a reforma a vapor do gás natural, a oxidação de hidrocarbonetos e a gaseificação do carvão. Além dessas tecnologias, outros métodos são propostos para produção de hidrogênio, como é o caso da eletrólise da água. A Figura 1 apresenta os métodos de produção de hidrogênio mais difundidos e os correlacionam com suas matérias-primas.

Figura 1: Principais processos de produção de hidrogênio e suas matérias-primas.



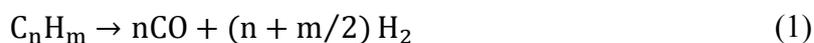
Fonte: (BALAT, 2008 - Adaptado).

Quanto à produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, existem três tecnologias distintas de eletrolisadores, cada qual com suas particularidades. Esse capítulo visa introduzir os processos de reforma a vapor do gás natural, oxidação de hidrocarbonetos, gaseificação do carvão e eletrólise da água, e apresentar as três tecnologias utilizadas para produção de hidrogênio através da eletrólise: os eletrolisadores PEM (Proton Exchange Membrane); os eletrolisadores alcalinos; e os eletrolisadores SOE (Solid Oxide Electrolyzer).

2.1 REFORMA A VAPOR DO GÁS NATURAL

Atualmente, a reforma a vapor do gás natural é um dos métodos mais baratos e mais amplamente empregados para produção de hidrogênio. De maneira geral, esse método consiste na remoção das impurezas do gás natural, o qual é misturado com vapor de água e passa por um reator com aquecimento externo onde o monóxido de carbono e o gás hidrogênio são formados. Em seguida, uma reação de deslocamento catalítica converte o monóxido de carbono e a água em dióxido de carbono mais o gás hidrogênio, o qual é posteriormente purificado (ACAR; DINCER, 2014).

Usualmente, o gás natural é a matéria prima da reação, entretanto hidrocarbonetos pesados podem ser processados da mesma maneira, como é o caso da nafta, sendo o catalisador utilizado nas reações geralmente o níquel. Uma grande desvantagem da reforma a vapor é que a produção de hidrogênio está associada às grandes quantidades de CO₂ emitidas para a atmosfera, uma vez que o processo demanda de combustíveis fósseis tanto como matéria prima quanto para fonte de calor da reação (KOTHARI; BUDDHI; SAWHNEY, 2008). As Reações 1 e 2 representam as reações básicas do processo de reforma.



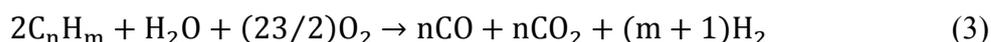
Em relação às emissões de CO₂ dessa tecnologia, Ozbilen, Dincer e Rosen (2013) apresentam a reforma a vapor do gás natural como sendo um dos processos de obtenção de hidrogênio que mais prejudicam o meio ambiente, atingindo valores elevados de quilogramas de CO₂ e SO₂ (equivalentes) emitidos por quilograma de hidrogênio. Os autores estimam emissões de aproximadamente 12,0 kg de CO₂e e 14,0 g de SO₂e por kg de H₂ produzido.

Devido à distribuição dos gasodutos de gás natural por todo país, esse combustível tem uma maior facilidade de transporte quando comparado a outras fontes que dependem de características regionais, como é o caso das fontes renováveis abordadas nessa dissertação: solar, eólica e hidrelétrica. Ou seja, a instalação de uma central de geração de hidrogênio a partir da reforma a vapor de gás natural poderia ser considerada para diversas regiões do país, enquanto para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, como é o caso da eletrólise da água com energia elétrica oriunda de plantas solares, eólicas ou hidrelétricas, deve ser considerado além do custo de produção, um custo de transporte mais elevado. A

Essa tecnologia apresenta baixos custos monetários quando comparado com as demais fontes disponíveis, sendo encontrados valores entre 2,48 e 3,17 US\$/kg de H₂ (TING et al., 2012 e WANG et al. 2010). Corrigindo-se os valores de acordo com a inflação até setembro de 2013 (correção pelo IGP-M) e sendo considerada a cotação do dólar desse mês (2,26 R\$/US\$), são obtidos valores entre 2,40 e 3,07 US\$/kg de H₂.

2.2 OXIDAÇÃO PARCIAL DE HIDROCARBONETOS

A oxidação parcial de hidrocarbonetos consiste em na reação exotérmica de hidrocarbonetos com oxigênio e vapor. Tal processo ocorre em pressões elevadas, e pode necessitar de catalisadores dependendo da matéria prima selecionada. Esse processo é o segundo mais empregado na produção de hidrogênio, uma vez que ele aceita todos os tipos de hidrocarbonetos como combustível, gasosos ou líquidos, podendo ser processados até mesmo componentes com elevado ponto de ebulição e grande concentração de enxofre, tais como óleos pesados e óleos residuais do processo de refinamento do petróleo. Uma desvantagem do processo de oxidação parcial é a emissão de monóxido de carbono junto ao dióxido de carbono. (KOTHARI; BUDDHI; SAWHNEY, 2008). A Reação 3 representa a reação básica do processo de oxidação parcial de hidrocarbonetos.



Kothari, Buddhi e Sawhney (2008) estimam que para hidrocarbonetos mais pesados que a nafta, as emissões de CO₂ e CO podem atingir valores de até 12,35 e 7,85 kg por kg de H₂ produzido, respectivamente. Em termos de CO₂e, de acordo com IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) pode-se considerar o potencial de aquecimento global do CO como sendo três vezes mais prejudicial que o CO₂, ou seja, a emissão de CO₂e do processo de oxidação parcial de hidrocarbonetos pode ser estimada como: 1 x 12,35 + 3 x 7,85 = 35,90 kg de CO₂e por kg de hidrogênio.

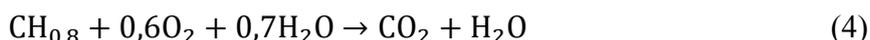
Tipicamente, a eficiência térmica do processo de oxidação parcial utilizando-se do metano como combustível para produção de hidrogênio apresenta valores entre 60% e 75% (KALAMARAS; EFSTATHIOU, 2013). Embora esse método apresente uma eficiência inferior à reforma a vapor, o custo de produção do hidrogênio pela oxidação parcial pode atingir valores mais atrativos. De acordo com um estudo realizado pelo National Renewable

Energy Laboratory (NREL) (1999) do Colorado, o custo do hidrogênio a partir dos gases de exaustão do coque pode ser estimado entre 2,10 a 3,26 US\$/kg de H₂ (valores corrigidos pelo IGP-M e atualizados de acordo com a cotação do dólar – setembro de 2013).

Por tratar-se de uma tecnologia que pode utilizar diversos combustíveis como fonte de energia, a oxidação parcial pode ser tratada como um processo de produção de hidrogênio que não depende de uma determinada região para sua implantação, podendo apresentar, assim como a reforma a vapor do gás natural, menores custos associados ao transporte do hidrogênio produzido quando comparado aos obtidos para a eletrólise da água pelas fontes solar, eólica e hidrelétrica.

2.3 GASEIFICAÇÃO DE CARVÃO

O processo de gaseificação do carvão consiste na oxidação parcial do carvão por meio da inserção de vapor e de oxigênio em um reator a uma elevada temperatura e pressão. Os produtos das reações são principalmente CO e H₂, misturados com vapor e CO₂ (gás de síntese), sendo que para aumentar o rendimento da geração do hidrogênio, o gás de síntese é submetido a uma reação de deslocamento (ACAR; DINCER, 2014). A Reação 4 representa a reação básica do processo de gaseificação do carvão.



A principal preocupação desse processo é o elevado teor de carbono presente no carvão, sendo que as emissões de CO₂ desse método de produção de hidrogênio superiores às emissões de outras opções de matéria prima (ACAR; DINCER, 2014). Kothari, Buddhi e Sawhney (2008) estimam que para o processo de gaseificação do carvão a quantidade de CO₂ emitido para atmosfera possa atingir 29,33 kg/kg de H₂ produzido. Além disso, os autores consideram que essa tecnologia emite cerca de 33,0 g de SO₂ e por kg de hidrogênio.

O NREL (1999) apresenta um custo de produção do hidrogênio a partir da gaseificação do carvão entre 1,20 e 1,44 US\$/kg de hidrogênio. Corrigindo-se esse valor para a inflação até setembro de 2013 e convertendo para a cotação do dólar desse mês, obtém-se um custo de 2,97 a 3,56 US\$/kg de H₂. Em relação ao rendimento do processo, Langer et al. (2007) apresentam uma eficiência de 55% para essa tecnologia.

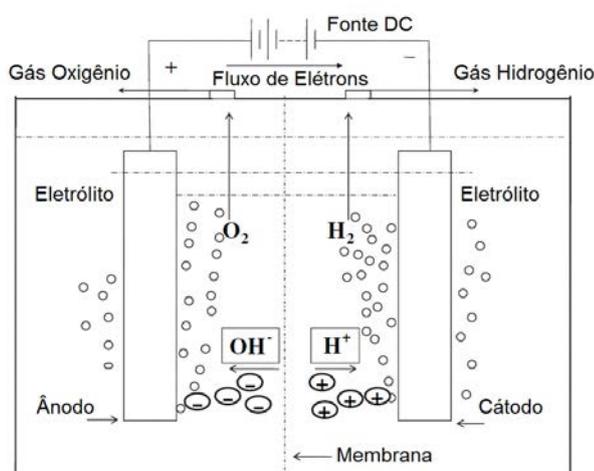
A gaseificação do carvão, em geral, é inviável para plantas de pequeno porte devido à complexidade desse processo (LANGER et al., (2007), desta forma a implantação de uma central de produção de hidrogênio com base na gaseificação do carvão necessitaria de grandes quantidades de matéria-prima. De acordo com a ANEEL (2008), o Brasil apresenta suas reservas de carvão principalmente na região sul do país, desta forma o hidrogênio produzido por esse processo apresenta custos de transporte mais elevados quando comparado aos da reforma a vapor e da oxidação parcial.

2.4 ELETRÓLISE DA ÁGUA

A eletrólise da água é o processo de dissociação das moléculas da água através da utilização de energia elétrica. A corrente elétrica passa por dois eletrodos e quebra a molécula da água, tendo como produto gás hidrogênio e oxigênio. É um processo de conversão de energia elétrica em energia química na forma de hidrogênio, tendo ainda um subproduto útil que é o gás oxigênio (HOLLADAY et al., 2009).

A Figura 3 apresenta um esquema que ilustra um sistema básico para eletrólise da água. Uma corrente elétrica é mantida por uma fonte DC que passa do eletrodo negativo para o eletrodo positivo. Essa corrente mantém um fluxo de elétrons para o cátodo, onde os mesmos são consumidos pelos íons de hidrogênio formando gás hidrogênio. Os elétrons utilizados no cátodo têm origem dos íons hidroxila que são formados no ânodo (ZENG; ZHANG, 2010).

Figura 3: Sistema básico para eletrólise da água.



Fonte: (ZENG; ZHANG, 2010 - Adaptado)

Zeng e Zhang (2010) separam as reações químicas para cada eletrólito no processo de eletrólise da água. As Reações 5 e 6 são as reações químicas que ocorrem no ânodo e no cátodo, respectivamente.



Desta forma, a reação global para esse processo de eletrólise da água pode ser escrito da seguinte maneira:



Mazloomi e Sulaiman (2012) apresentam um estudo dos fatores que influenciam a eficiência elétrica no processo de eletrólise da água. Eles indicam a temperatura como uma das variáveis que mais afetam a eletrólise, uma vez que é a temperatura que impõe o quanto de energia elétrica é demandada para o processo. Esse aumento na eficiência ocorre uma vez que uma temperatura mais elevada reduz o potencial necessário para as reações de separação das moléculas. Além disso, a condutividade iônica dos eletrodos aumenta e as taxas de reações eletroquímicas nas superfícies dos eletrodos são melhoradas em temperaturas elevadas (GANLEY, 2009).

A temperatura não é a única variável importante para esse processo. Mazloomi e Sulaiman (2012) avaliam outros parâmetros tais como: a qualidade do eletrólito, pressão, a resistência elétrica do eletrólito, o material do eletrodo, a membrana de separação e a forma de onda da tensão aplicada durante o processo. No entanto, essa dissertação não terá como principal objetivo avaliar as melhorias de um processo de eletrólise alterando esses parâmetros, ao invés disso deseja-se estimar o custo de produção de hidrogênio por meio das tecnologias disponíveis.

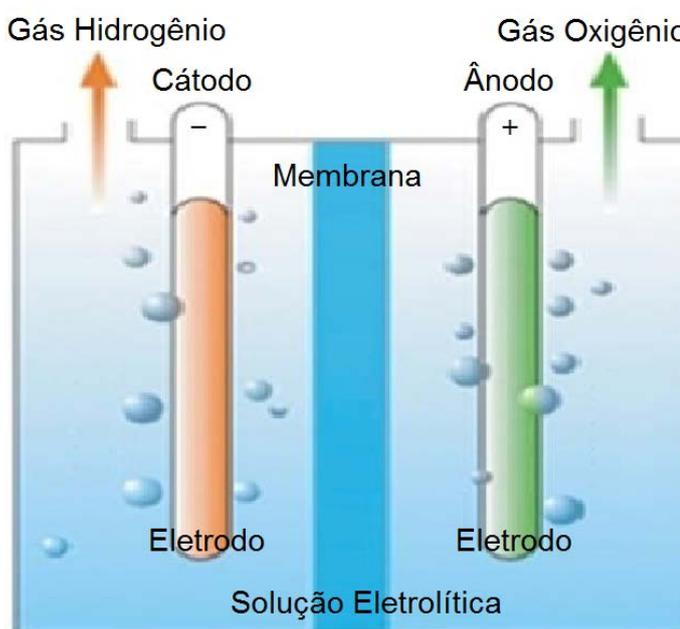
2.4.1 Eletrolisador Alcalino

O eletrolisador alcalino é a tecnologia mais comum de eletrolisador que é utilizada para a produção de hidrogênio. Esse equipamento se baseia na eletrólise de soluções alcalinas, tipicamente uma solução aquosa de aproximadamente 30% em massa de KOH ou NaOH. A adição de um eletrólito (sal) aumenta a condutividade elétrica da água, e o hidrogênio é um

subproduto, como por exemplo, da produção de cloro ou hidróxido de sódio (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012).

Eletrolisadores alcalinos geralmente são formados por eletrodos, uma membrana separadora com micro poros e uma solução de um eletrólito alcalino (TURNER et al., 2008). Quando uma tensão é aplicada através dos eletrodos imersos numa solução aquosa, a reação de separação das moléculas da água se inicia. O hidrogênio é formado no cátodo e o oxigênio no ânodo, como ilustrado pela Figura 4.

Figura 4: Ilustração esquemática de um eletrolisador alcalino.



Fonte: (HYDROGENICS, 2013 - Adaptado).

Os materiais utilizados nos eletrodos são diferentes para o cátodo e ânodo, geralmente o cátodo é de níquel com uma camada catalítica de platina e o ânodo pode ser de níquel ou cobre revestido por óxidos de manganês, volfrâmio e rutênio (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012). O material do eletrodo não apenas influencia o efeito cinética global da reação eletroquímica, mas também o potencial de dissociação da água (SHEN et al., 2011).

Sabe-se que o eletrolisador alcalino apresenta a tecnologia mais avançada para a produção de hidrogênio, por essa razão o preço de mercado é inferior quando se compara as demais tecnologias de eletrólise da água (HOLLADAY et al., 2009). Apesar disso, a eficiência dessa tecnologia não apresenta os maiores valores, variando entre 50% e 60% baseado no poder calorífico inferior do hidrogênio (TURNER et al., 2008).

Os eletrolisadores alcalinos possuem uma temperatura de operação entre 50 °C e 100 °C, trabalhando com água no estado líquido, visto que a pressão de operação normal dessa tecnologia varia de 3,0 até 30,0 bar (MOKWA; TANAKA; GONÇALVES, 2007).

As Reações 8 e 9 são apresentadas por Bičáková e Straka (2012) para o cátodo e ânodo, respectivamente:



No eletrolisador alcalino, a alimentação de água é feita no cátodo, onde a água é dissociada em hidrogênio e íons de hidroxila (OH^-), esses íons atravessam a membrana separadora no sentido do ânodo, onde o oxigênio é formado (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012).

A reação global dos eletrolisadores alcalinos é a mesma que foi apresentada na seção 2.4 para eletrólise da água e pode ser escrita da seguinte maneira:



Silveira e Zanzi (2013) realizaram um levantamento dos fornecedores com configurações de média escala de eletrolisadores alcalinos voltados para a produção de hidrogênio. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Especificação técnica de três fornecedores de eletrolisadores alcalinos.

Especificação	NITIDOR	HYDROGENICS	PURE
Capacidade Normal [Nm ³ /h]	50	60	42
Eletrólito (Solução)	KOH (25%)	KOH (30%)	–
Potência Consumida (máx.) [kW]	260	240	213
Tensão [VAC]	230 / 400 (1φ / 3φ)	400 / 480 / 575 (3φ)	400
Consumo de Água [L/h]	45	90 – 120	36

Tabela 1 (Continuação): Especificação técnica de três fornecedores de eletrolisadores alcalinos.

Pureza (com unidade de purificação)	99,995%	99,998% / 99,999%	99,995%
Faixa de Operação	20% – 100%	40% – 100% 25% – 100%	20% - 100%
Frequência [Hz]	50 / 60	50 / 60	50
Eficiência	80% (pilha de eletrólise)	–	–

Fonte: (SILVEIRA; ZANZI, 2013).

A Nitidor é uma empresa italiana que recentemente ganhou uma licitação para fornecer eletrolisadores para geração de hidrogênio a partir da água do vertedouro da Usina de Itaipu. O fabricante canadense Hydrogenics é o responsável pelo fornecimento dos eletrolisadores para o projeto brasileiro de produção de ônibus movido a hidrogênio. A Pure Energy Centre é uma empresa britânica que opera em diversos segmentos referentes à energia renovável, dispondo-se de produtos e cursos, além de atuar na área de consultorias (SILVEIRA; ZANZI, 2013).

2.4.2 Eletrolisadores PEM

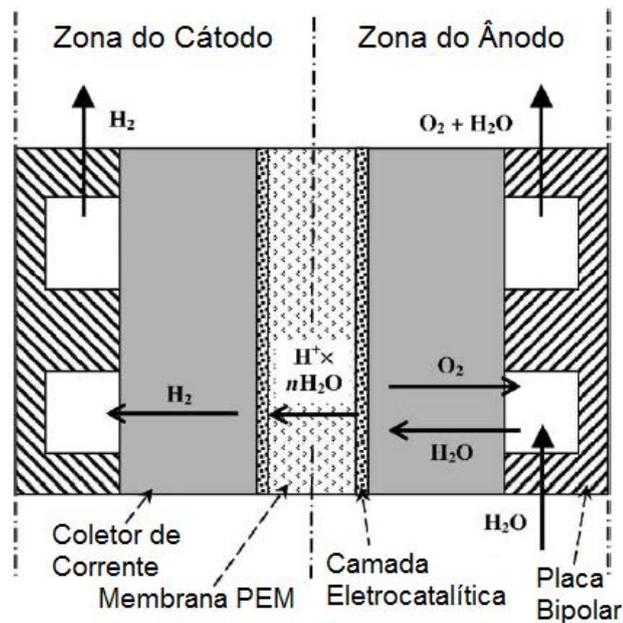
Um eletrolisador baseado na tecnologia PEM apresenta diversas vantagens sobre o convencional eletrolisador alcalino, tais como uma maior eficiência energética (HOLLADAY et al., 2009). A eficiência de um eletrolisador PEM alcança desde 55% até 70% (TURNER et al., 2008). Entretanto, esses sistemas necessitam de componentes mais especiais, incluindo uma membrana polimérica de alto custo e eletrodos porosos, além de coletores de corrente (AWASTHI et al., 2011).

Quanto suas condições operacionais, os eletrolisadores PEM trabalham com temperaturas de operação similares aos valores encontrados em eletrolisadores alcalinos, 80 °C a 100 °C, porém as pressões de operação podem atingir valores superiores, até 70,0 bar (MOKWA; TANAKA; GONÇALVES, 2007).

A base típica dos eletrolisadores PEM é a utilização de platina negra, irídio, rutênio e ródio para as camadas catalíticas dos eletrodos e membranas poliméricas finas de Nafion, que servem como um separador de gás (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012).

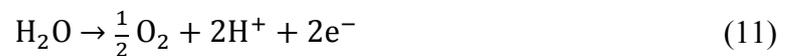
A Figura 5 ilustra esquematicamente um eletrolisador PEM. Nessa tecnologia, a alimentação de água é feita no ânodo, onde ela é decomposta em oxigênio, prótons e elétrons. Os prótons são transportados por meio de uma membrana que permite a passagem dos mesmos até o cátodo, onde eles são recombinados com os elétrons e tem-se a formação do gás hidrogênio (MARSHALL et al., 2007).

Figura 5: Ilustração esquemática de um eletrolisador PEM.



Fonte: (GRIGORIEV et al., 2006 - Adaptada)

As Reações 11 e 12 são apresentadas por Marshall et al. (2007) para o ânodo e cátodo, respectivamente:



Desta forma, a reação global para eletrolisadores PEM é igual à apresentada para eletrolisadores alcalinos, podendo ser escrito da seguinte maneira:



Como apresentado para os eletrolisadores alcalinos, Silveira e Zanzi (2013) também realizaram um levantamento de fornecedores para eletrolisadores PEM que visam a produção de hidrogênio. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Especificação técnica de três fornecedores de eletrolisadores PEM.

Especificação	H-TEC	HYDROGENICS	PROTON ONSITE
Capacidade Normal [Nm ³ /h]	0,29 – 3,30	0,50	2 – 30
Potência Consumida (máx.) [kW]	1,8 – 18,0	–	8,1 – 23,7 ⁽¹⁾ 28,7 – 88,1 ⁽²⁾
Tensão [⁽³⁾ : VAC / ⁽⁴⁾ : VDC]	35 – 250 / 300 – 440 ⁽³⁾ 41 – 320 / 360 – 560 ⁽⁴⁾	208 / 120 (3 ϕ) ⁽³⁾ 200 – 260 (1 ϕ) ⁽³⁾ VDC Disponível	380 – 480 ⁽¹⁾⁽³⁾ 342 – 456 ⁽²⁾⁽³⁾ 432 – 528 ⁽⁴⁾
Consumo de Água	–	1,0 [L/Nm ³]	1,83 – 26,90 [L/h]
Pureza (sem unidade de purificação)	–	99,998%	99,9995%
Faixa de Operação	0% – 100%	0% – 100%	20% - 100%
Eficiência	75%	–	–

⁽¹⁾: 2 – 6 Nm³/h; ⁽²⁾: 10 – 30 Nm³/h.

Fonte: (SILVEIRA; ZANZI, 2013).

A H-TEC é uma empresa alemã destaca-se na produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis de energia, além disso, ela é a pioneira na produção de eletrolisadores PEM em escala industrial. Proton OnSite sediada nos Estados Unidos possui grande capacidade de produção de hidrogênio a partir dos eletrolisadores PEM disponíveis no mercado, possuindo uma experiência de 15 anos na produção de hidrogênio e outros gases (SILVEIRA; ZANZI, 2013).

2.4.3 Eletrolisadores de Óxido Sólido (SOE)

O eletrolisadores SOE ou SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) trabalham em elevadas temperaturas (de 500 °C a 800 °C) em comparação aos eletrolisadores PEM e alcalinos (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012). Por essa razão, a energia elétrica necessária para a eletrólise

é menor, e a eficiência térmica dos ciclos de geração de potência é mais elevada (BO et al., 2010).

O eletrolisadores SOE apresenta a maior eficiência energética, entre 70% e 85%, embora seja a menos desenvolvida das tecnologias apresentadas nessa dissertação. Desafios como: corrosão, selagem, ciclo térmico e migração de cromo estão presentes nesse eletrolisador. Por esses motivos a utilização de materiais com alto custo agregado faz-se necessária (HOLLADAY et al., 2009).

Outro diferencial dessa tecnologia é que a mesma trabalha com vapor de água ao invés de água líquida, como é o caso dos eletrolisadores alcalinos e eletrolisadores PEM. Em geral, a pressão de operação dessa tecnologia pode variar desde pressão atmosférica até valores elevados, porém como essa tecnologia ainda está em desenvolvimento, estão sendo realizados estudos para definir a melhor faixa de operação desse parâmetro (MOKWA; TANAKA; GONÇALVES, 2007).

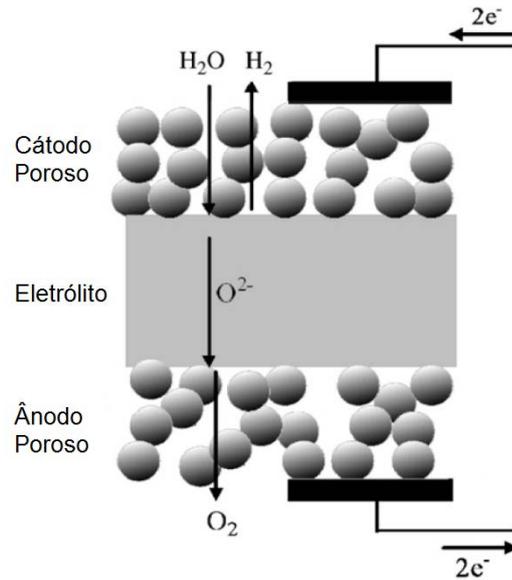
O material eletrolítico mais comum é um condutor iônico de alta densidade que consiste de ZrO_2 (dióxido de zircônio) dopado com 8 mol% de Y_2O_3 (óxido de ítrio), ou YSZ (zircônia estabilizada por óxido de ítrio). Esse material apresenta alta condutividade iônica, assim como estabilidade térmica e química nas temperaturas de operação. Para o eletrodo “combustível” (cátodo durante o processo de eletrólise) utiliza-se um material cerâmico poroso composto de YSZ e níquel metálico, já para o eletrodo do oxigênio o material mais comum é um compósito de manganita de lantânio dopada com estrôncio (LAGUNA-BERCERO, 2012).

As componentes chaves de um eletrolisador SOEC são um condutor eletrolítico iônico de alta densidade e dois eletrodos porosos (NI et al., 2008). O mecanismo fundamental envolvido na operação do eletrolisador SOEC é apresentado pela Figura 6.

O cátodo poroso é alimentado com vapor, e quando é aplicado o potencial elétrico necessário pela SOEC, as moléculas de água difundem-se e são dissociadas em gás hidrogênio e íons de oxigênio no cátodo do eletrolisador. Os íons de oxigênio são transportados através do eletrólito de alta densidade até o ânodo. No ânodo, os íons de oxigênio são oxidados formando gás oxigênio (NI et al., 2008).

Os eletrolisadores SOEC estão em processo de desenvolvimento em institutos de pesquisas e universidades, sendo que eles ainda não estão disponíveis comercialmente (SILVEIRA; ZANZI, 2013).

Figura 6: Ilustração esquemática do funcionamento de um eletrolisador SOEC.



Fonte: (NI et al., 2008 - Adaptado)

As Reações 14 e 15 são apresentadas por Brisse et al., (2008) para o cátodo e ânodo de um eletrolisador SOEC, respectivamente:



Desta forma, a reação global para o eletrolisador SOEC corresponde à mesma reação apresentada para as outras tecnologias abordadas nesse trabalho, podendo ser escrita como:



A Tabela 3 resume as principais características das três tecnologias de eletrolisador abordadas nessa seção.

Tabela 3: Principais características dos eletrolisadores abordados.

Eletrolisadores Alcalinos	Eletrolisadores PEM	Eletrolisadores SOE
➤ Atualmente é a tecnologia de eletrolisador mais utilizada. ⁽¹⁾	➤ Necessitam de componentes especiais. ⁽⁵⁾	➤ Atualmente em processo de desenvolvimento. ⁽⁶⁾
➤ Em geral, apresenta o menor custo de aquisição do mercado. ⁽²⁾	➤ A eficiência energética dessa tecnologia varia de 50% a 60%. ⁽³⁾	➤ Menor consumo de energia elétrica. ⁽⁷⁾
➤ A eficiência energética dessa tecnologia varia de 50% a 60%. ⁽³⁾	➤ Temperatura de operação entre 80 °C e 100 °C. ⁽⁴⁾	➤ A eficiência energética dessa tecnologia varia de 70% a 85%. ⁽²⁾
➤ Temperatura de operação entre 50 °C e 100 °C. ⁽⁴⁾	➤ Pressão de operação entre 1,0 e 70,0 bar. ⁽⁴⁾	➤ Temperatura de operação entre 500 °C e 800 °C. ⁽⁴⁾
➤ Pressão de operação entre 3,0 e 30,0 bar. ⁽⁴⁾		

Fonte: ⁽¹⁾: Bičáková e Straka, 2012; ⁽²⁾: Holladay et al., 2009; ⁽³⁾: Turner et al., 2008; ⁽⁴⁾: Mokwa, Tanaka e Gonçalves, 2007; ⁽⁵⁾: Awasthi et al., 2011; ⁽⁶⁾: Silveira e Zanzi, 2013; ⁽⁷⁾: Bo et al., 2010.

3 FONTES RENOVÁVEIS

Hidrogênio, sem dúvida é um combustível do futuro e um transportador de energia. Ele é um combustível livre de carbono e por consequência não agride o meio ambiente. Embora o hidrogênio esteja naturalmente presente na Terra em estados combinados, como em componentes orgânicos e inorgânicos, ele é escasso no estado livre e molecular. Portanto, o hidrogênio deve ser artificialmente produzido em harmonia com o meio ambiente e em segurança (JOSHI et al., 2011).

Atualmente, a produção de hidrogênio é baseada em tecnologias que se utilizam de combustíveis fósseis como fonte de energia, totalizando 96%, sendo que 48% de toda a produção obtida pela reforma a vapor do gás natural; outros 30% e 18% por processos de oxidação de hidrocarbonetos e carvão, respectivamente. A média de dióxido de carbono emitido para a atmosfera pelo processo de reforma a vapor está na ordem de 9 kg/kg de hidrogênio produzido (NGOH; NJOMO, 2012). Desta forma, o hidrogênio apenas pode ser considerado com um combustível livre de carbono se produzido a partir de fontes renováveis de energia.

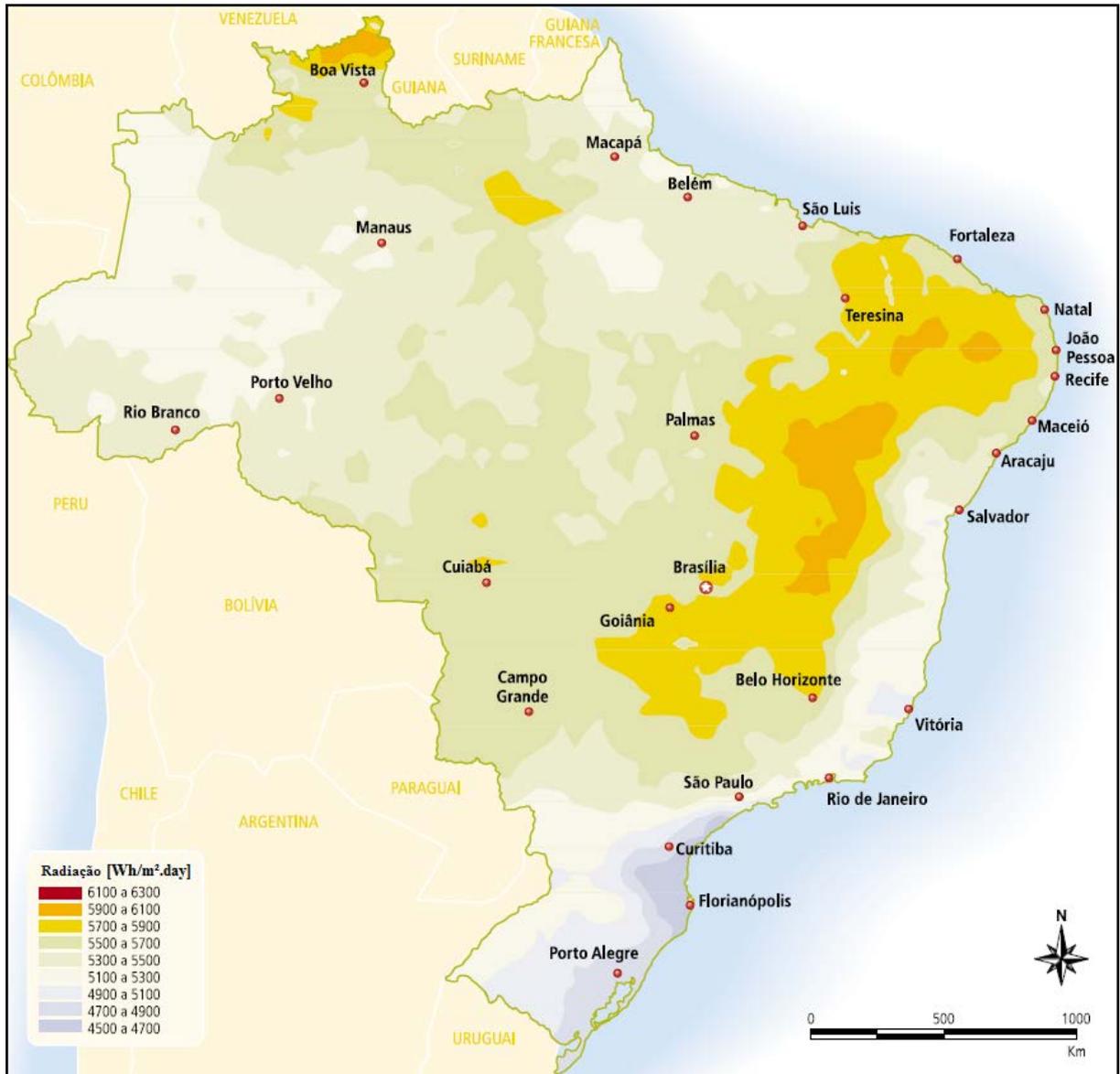
As fontes renováveis utilizadas para a produção de hidrogênio podem variar dependendo de quais estão disponíveis na região de produção. Outro ponto importante é a tecnologia utilizada para essa produção, uma vez que existem diferenças de desenvolvimento tecnológico, custos de instalação e manutenção e eficiência global de geração, por exemplo. Esse capítulo tem como objetivo apresentar algumas fontes renováveis disponíveis no cenário brasileiro, assim como o seu potencial. Além disso, será analisada a eficiência global na produção de hidrogênio para essas fontes, considerando-se a associação das plantas de geração de energia elétrica com um eletrolisador PEM. Selecionou-se como referência eletrolisadores PEM por estarem disponíveis no mercado e apresentarem uma melhor eficiência energética quando comparado ao eletrolisador alcalino.

3.1 HIDROGÊNIO A PARTIR DE ENERGIA SOLAR

O Brasil é privilegiado em termos de radiação solar. A Figura 7 ilustra a variação da radiação solar diária no Brasil, indicando que as maiores taxas são observadas na região nordeste do país, variando entre 5,7 e 6,1 kWh/m² por dia, principalmente no vale do São Francisco. Até mesmo nas regiões onde são observadas taxas menores de radiação existe um

considerável potencial energético, sendo que usinas de energia solar de pequena escala já são cogitadas. Como método de comparação, os níveis de radiação encontrados no Brasil são significativamente maiores que os níveis observados na Alemanha (entre 2,2 e 3,3 kWh/m² por dia), país esse que é o maior produtor de energia a partir de painéis fotovoltaicos (PVs), de acordo com a IEA (PEREIRA et al., 2012).

Figura 7: Radiação solar no Brasil – Média anual.



Fonte: (ANEEL, 2004).

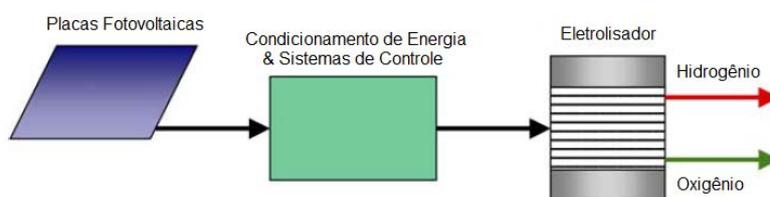
A principal deficiência da eletrólise a partir de painéis fotovoltaicos é a baixa taxa de conversão de energia. Tipicamente valores de eficiência entre 2% e 6% são apresentados para a produção em larga escala de hidrogênio por meio da eletrólise em PV (ZENG; ZHANG,

2010). Do ponto de vista econômico e ecológico, o método mais eficaz de produção é considerado a aplicação de uma fonte de corrente fotovoltaica como um resultado da transformação da energia solar diretamente em energia elétrica. Como a eficiência de conversores fotovoltaicos modernos está na ordem de 20% e a eficiência máxima de um eletrolisador PEM é de 70%, a eficiência global da transformação da energia de radiação solar em energia química na forma de hidrogênio alcança valores próximos a 14% (JOSHI et al., 2011).

Sistemas de geração de energia a partir de fontes solares conectados a rede têm como vantagem fornecer a quantidade de energia que os consumidores necessitam, pelo menos teoricamente. Entretanto, o custo de inversores, conexões, taxas, e perdas na conversão DC/AC fazem desses sistemas menos eficientes e mais dispendiosos (SILVEIRA; ZANZI, 2013).

A Figura 8 apresenta um sistema que contorna os problemas relacionados à conexão com a rede e gerações e encargos de compensação de geração. O eletrolisador é exposto a uma fonte de alimentação variável e um regulador de tensão DC/DC deve ser considerado como parte da caixa de condicionamento de energia e controles, com a função de atingir os requerimentos de tensão-corrente dos eletrolisadores com as menores perdas na conversão. Outra opção seria selecionar um painel fotovoltaico que apresentasse sua saída i-V igual à curva de polarização i-V do eletrolisador (BARBIR, 2005).

Figura 8: Diagrama esquemático de produção de hidrogênio a partir da energia solar.



Fonte: (BARBIR, 2005).

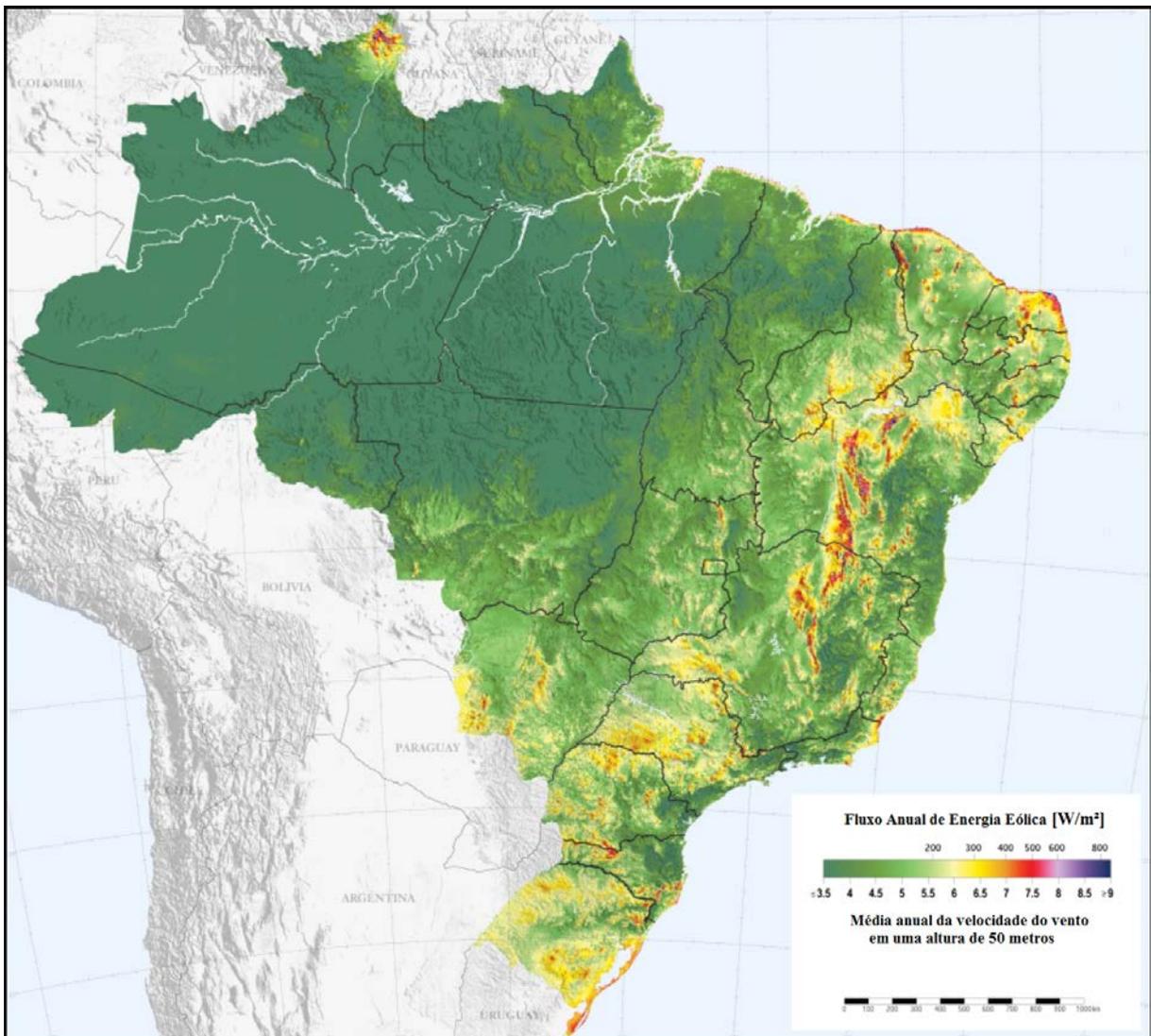
3.2 HIDROGÊNIO A PARTIR DE ENERGIA EÓLICA

A energia eólica no Brasil é favorecida, visto que o país apresenta duas vezes a média de vento mundial e a volatilidade (oscilação de velocidade) de 5%, o que faz com que a quantidade de energia produzida seja mais previsível. Estimativas apresentadas no “Atlas do

Potencial Eólico 2001” indica um potencial de geração de energia eólica de 143 GW no Brasil, valor esse que ultrapassa a capacidade total instalada no país em novembro de 2008, 105 GW (ANEEL, 2008).

A Figura 9 ilustra o potencial eólico brasileiro, o qual apresenta seus maiores valores nas regiões nordeste e sul. Essa estimativa de potencial foi obtida a partir de estudos em bases para torres de geração de até 50 metros de altura. Atualmente, essa tecnologia permite o uso de torres de até 100 metros de altura, tendo como resultado um potencial quase duas vezes maior do que o estimado (PEREIRA et al., 2012).

Figura 9: Mapa temático do potencial eólico no Brasil.



Fonte: (ANEEL, 2004).

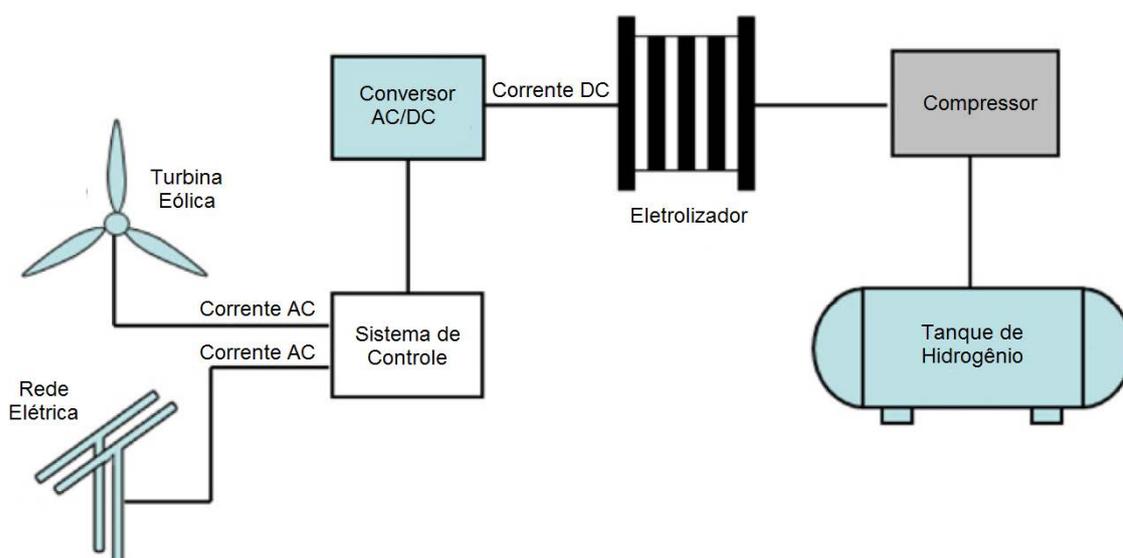
A energia motora para processos de eletrólise utilizando-se da energia eólica demandam ventos constantes com uma velocidade média de 6,0 m/s e mínima de 4,0 m/s (SILVEIRA;

ZANZI, 2013). Como ilustrado pela Figura 9, o nordeste e o sul do Brasil dispõe de valores para velocidades dos ventos compatíveis com os valores médios necessários para a produção de hidrogênio a partir do processo de eletrólise com acionamento eólico, o que torna tal processo atrativo.

De acordo com Akyuz et al. (2012) a eficiência média para turbinas eólicas encontra-se entre 40% e 45% para os modelos modernos. Considerando a eficiência de eletrolisadores PEM modernos (70%) e a máxima eficiência para a turbina eólica, obtém-se uma eficiência total na transformação da energia eólica em energia química na forma de hidrogênio igual a 31,5%.

A Figura 10 ilustra a produção de hidrogênio a partir da energia eólica. A eletricidade produzida na turbina eólica fornece eletricidade para a rede e para um conversor AC/DC, o qual alimenta o eletrolisador para a produção de hidrogênio (GENÇ et al., 2012).

Figura 10: Diagrama esquemático de produção de hidrogênio a partir da energia eólica.



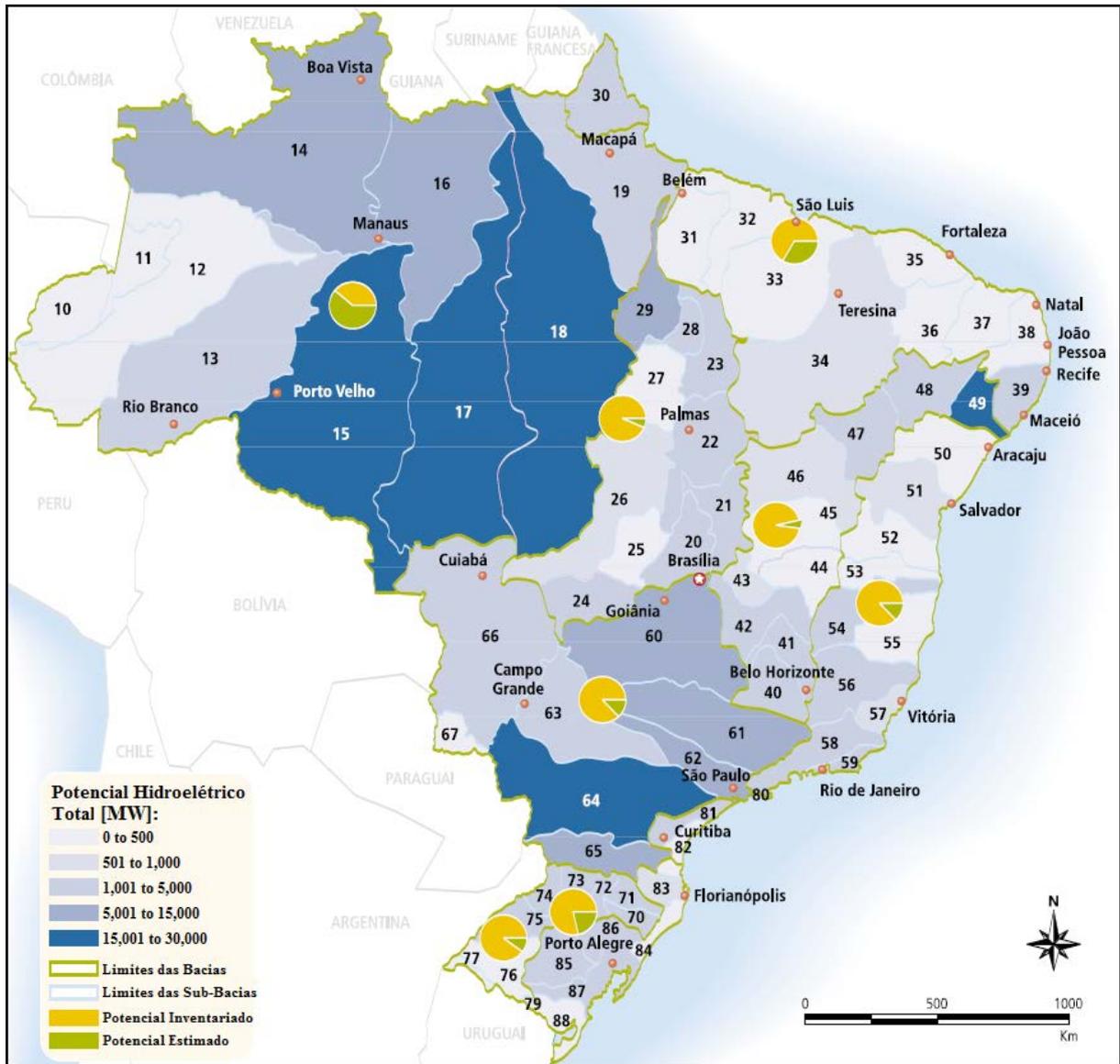
Fonte: (GENÇ et al., 2012 - Adaptado).

3.3 HIDROGÊNIO A PARTIR DE ENERGIA HIDRELÉTRICA

Atualmente, a energia hidrelétrica é a principal fonte de energia elétrica em muitos países, atingindo cerca de 17% de toda eletricidade produzida no mundo. A contribuição dessa energia na matriz energética brasileira corresponde a aproximadamente 83% de toda

eletricidade produzida no país (ANEEL, 2008). O potencial hidráulico brasileiro, estabelecido pelo potencial hidrográfico, é apresentado na Figura 11.

Figura 11: Potencial hidrelétrico brasileiro por sub-bacias hidrográficas.



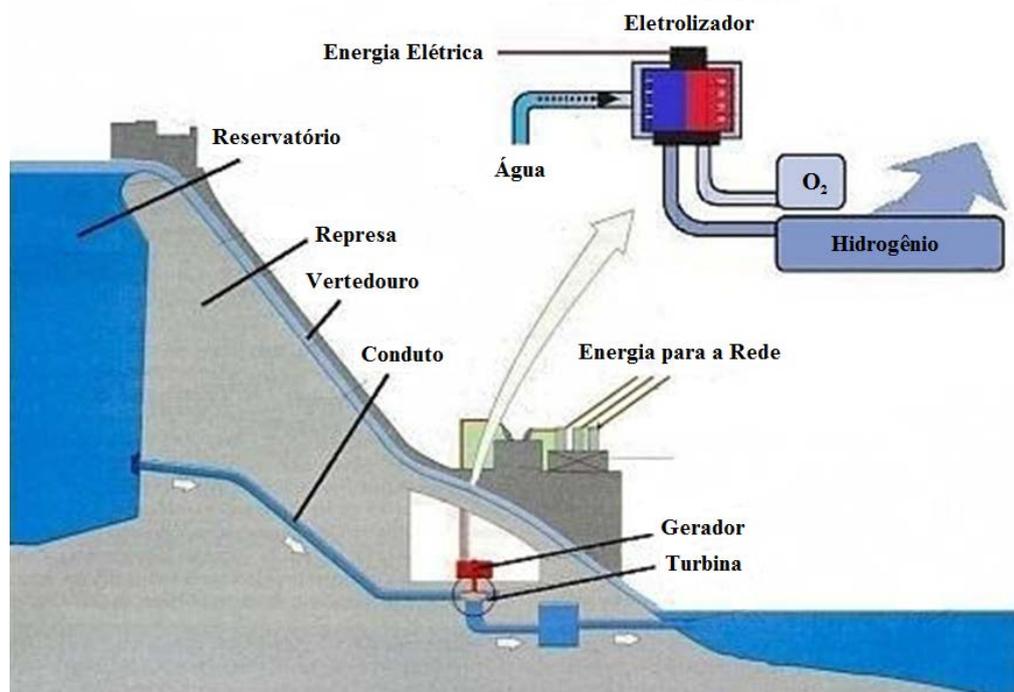
Fonte: (ANEEL, 2004).

Pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) são uma das principais prioridades da ANEEL em termos de oferta de energia elétrica no Brasil. Dadas suas características (potência instalada entre 1 e 30 MW, e área do reservatório de até 3 km²) as PCHs são idealmente adequadas para atender às demandas de energia de pequenos centros urbanos e áreas rurais (PEREIRA et al., 2012).

Uma planta hidrelétrica destina-se a gerar energia elétrica por meio da energia hidráulica dos rios. Desta forma, a produção de hidrogênio só se justifica caso essa produção

seja a partir de uma geração extra de energia elétrica a partir da água do vertedouro, em outras palavras, se for utilizado o excesso de energia da usina para produção de hidrogênio (SILVEIRA; ZANZI, 2013). A Figura 12 ilustra a produção de hidrogênio pela água vertida em uma planta hidrelétrica.

Figura 12: Esquema de eletrólise em uma usina hidrelétrica.



Fonte: (SILVEIRA; ZANZI, 2013).

Com eficiência que alcança valores de até 90%, as turbinas apresentam as mais eficientes taxas de conversão de energia primária em secundária (ANEEL, 2008). Utilizando-se da eficiência dos eletrolisadores PEM (70%) e a eficiência apresentada por uma usina hidrelétrica, tem-se uma eficiência total na produção de hidrogênio igual a 63%.

É evidente a superioridade da eficiência global da produção de hidrogênio pela planta hidrelétrica quando comparada a plantas eólicas e solares. É apresentado na Tabela 4 os rendimentos globais do processo de geração de hidrogênio a partir de plantas solares, plantas eólicas e plantas hidrelétricas associadas com eletrolisadores tipo PEM.

Tabela 4: Rendimento global da produção de hidrogênio – Fontes renováveis x Eletrolisadores PEM.

Fontes de Energia Elétrica	η_{Fonte}	η_{PEM}	η_{Global}
Plantas Solares	20% ⁽¹⁾		14,0%
Plantas Eólicas	45% ⁽²⁾	70% ⁽⁴⁾	31,5%
Plantas Hidrelétricas	90% ⁽³⁾		63,0%

Fonte: ⁽¹⁾: Joshi et al., 2011; ⁽²⁾: Akyuz et al., 2012; ⁽³⁾: ANEEL, 2008; ⁽⁴⁾: Turner et al., 2008.

Com relação à produção de hidrogênio a partir das fontes renováveis abordadas, está sendo considerado que a geração do hidrogênio ocorre nas usinas elétricas. Ou seja, após a produção do combustível é necessário realizar o transporte do mesmo até os consumidores, aumentando assim os custos associados ao hidrogênio.

4 ANÁLISE ECONÔMICA

Neste capítulo será apresentada uma metodologia utilizada para a análise econômica da produção de hidrogênio, bem como as considerações feitas para sua aplicação e os resultados obtidos por essa metodologia.

Devido às variações de alguns parâmetros que dependem da tecnologia do eletrolisador selecionado, nesta dissertação se considerará um eletrolisador PEM para as estimativas de custo. A principal razão da escolha dessa tecnologia é a sua maior eficiência energética quando comparada ao eletrolisador alcalino. Os eletrolisadores SOE foram desconsiderados, visto que os mesmos ainda estão em fase de desenvolvimento.

4.1 METODOLOGIA

A metodologia apresentada nessa seção para análise econômica da produção de hidrogênio foi proposta por Braga (2014). Braga (2014) apresentam a Equação 17 para o cálculo do custo de produção de hidrogênio.

$$C_{H_2} = \frac{Inv \cdot f}{H \cdot E_{H_2}} + C_{Op} + C_{Main} \quad (17)$$

Onde:

- C_{H_2} : custo final do hidrogênio [US\$/kWh];
- Inv: valor de investimento no eletrolisador [US\$];
- f: fator de anuidade [1/ano];
- H: tempo de operação [h/ano];
- E_{H_2} : energia contida no hidrogênio [kW];
- C_{Op} : custo de operação [US\$/kWh];
- C_{Main} : custo de manutenção [US\$/kWh].

Braga (2014) define o fator de anuidade pelas Equações 18 e 19.

$$f = \frac{q^k \cdot (q - 1)}{q^k - 1} \quad (18)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (19)$$

Onde:

- r: taxa de juros anual (%);
- k: período de amortização [anos].

De acordo com o Banco Central do Brasil, a média anual de juros para o Brasil no período de 2012/2013 foi de 7,62%, variando de 7,12% até 8,90%. A meta de setembro de 2013 estabelecida pela SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) para a taxa de juros anual é de 9,50%. Desta forma, para evitar possíveis variações, serão consideradas taxas de juros de 4%, 8% e 12%.

O tempo de vida de um eletrolisador alcalino é reportado como sendo de até 30 anos, apesar da necessidade de uma revisão geral a cada 7 – 15 anos com intuito de substituição dos eletrodos e dos diafragmas (BHANDARI et al., 2013). Sendo assim, o maior período de amortização aceito para estimativas será um terço da vida total dessa tecnologia, 10 anos.

O tempo de operação, H, pode variar dependendo basicamente do número de horas por turno e de turnos por dia. Considerando-se uma operação contínua, 24 h/dia e 365 dia/ano, o maior tempo de operação em um ano de operação é de 8.760 horas. Entretanto, essa dissertação irá considerar três turnos de 7 horas, totalizando 7.665 horas/ano.

A quantidade de energia contida no hidrogênio pode ser calculada multiplicando-se a vazão mássica total de hidrogênio pelo seu poder calorífico inferior (PCI), como apresentado pela Equação 20.

$$E_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot PCI \quad (20)$$

Onde:

- \dot{m}_{H_2} : vazão mássica de hidrogênio [kg/s];
- PCI: poder calorífico inferior [kJ/kg].

A “Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo” (EMTU/SP) apresenta em seu projeto de ônibus movido a hidrogênio estações de abastecimento com capacidade de 60 Nm³/h, por meio de um eletrolisador alcalino da HySTAT-A. Essa capacidade de produção é o suficiente para abastecer três ônibus por dia (EMTU, 2013). Portanto, será utilizado o mesmo valor dessa vazão volumétrica para os cálculos econômicos apresentados neste capítulo, porém será considerado eletrolisadores tipo PEM ao invés de eletrolisadores alcalinos.

Considerando a densidade do hidrogênio nas CNTP (1,0 atm e 0,0 °C) como sendo aproximadamente 0,0899 kg/Nm³, a vazão mássica total de hidrogênio é 5,394 kg/h, ou cerca de 1,50 x 10⁻³ kg/s. O PCI do hidrogênio pode ser estimado como estando na ordem de 120.000 kJ/kg. Com essas considerações, calcula-se a energia contida no hidrogênio (E_{H_2}).

O custo de investimento depende da tecnologia do eletrolisador utilizada. Como apresentado anteriormente, essa dissertação considerará a produção de hidrogênio a partir de eletrolisadores PEM, sendo considerado para geração dos 60 Nm³/h dois eletrolisadores da Proton OnSite. Braga (2014) utilizam a Equação 21 proposta pelo NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2008), a qual estima o custo de investimento com precisão para a faixa de 0,1 kg/h até 100 kg/h para eletrolisadores alcalinos e PEM.

$$\text{Inv} = 224,49 \times (\dot{m}_{H_2})^{0,6156} \quad (21)$$

Os dois últimos parâmetros são o custo de operação (C_{Op}) e o custo de manutenção (C_{Main}). O primeiro depende essencialmente de qual tipo de energia será utilizado, representado, para esse caso, como sendo os reagentes da eletrólise da água: água e energia elétrica. O C_{Op} é dado pela Equação 22.

$$C_{Op} = \frac{P_{Electric} \cdot C_{Electric}}{E_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot C_{H_2O}}{E_{H_2}} \quad (22)$$

Onde:

- $P_{Electric}$: energia elétrica consumida [kW];
- $C_{Electric}$: custo da eletricidade [US\$/kWh];
- \dot{m}_{H_2O} : quantidade de água requerida pelo eletrolisador [m³/h];
- C_{H_2O} : custo da água [US\$/(m³/h)].

P_{Electric} e $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ são definidos de acordo com o eletrolisador selecionado. Para esta dissertação, foram escolhidos dois eletrolisadores PEM de 30,0 Nm³/h da Proton OnSite apresentados na Tabela 2, os quais demandam de um total de aproximadamente 177,0 kW e 54,0 L/h (0,054 m³/h) de energia elétrica e água para operação, respectivamente.

O custo da água é imposto por uma empresa governamental responsável pelo seu fornecimento, que no caso do estado de São Paulo é estabelecido pela empresa SABESP. Para atividades industriais a atual tarifa por metro cubo de água consumida, considerando a utilização de mais de 50 m³/mês está na ordem de US\$ 5,52 (SABESP, 2013).

O custo da energia elétrica é um fator importante na análise econômica da produção de hidrogênio, uma vez que é esse parâmetro que diferencia a energia utilizada para acionamento do eletrolisador. Nesta dissertação serão consideradas apenas as três fontes de energia anteriormente apresentadas: solar, eólica e hidrelétrica.

Lacchini e Dos Santos (2013) propõem uma metodologia para estimativa do custo de eletricidade gerada a partir de painéis fotovoltaicos e concluem que para um sistema com produção superior a 100 kW_p, o custo é cerca de 0,14 US\$/kWh, além disso, a EPE (2012) apresenta valores médios de 0,20 US\$/kWh para um sistema similar de produção. Valores maiores são encontrados nos estudos de Mitscher e Rüther (2012), os quais estimam um custo de geração de eletricidade para PVs entre 0,36 e 0,47 US\$/kWh para um mercado desenvolvido (taxa de juros = 10,5%), e ESMAP (2007) apresenta um estudo para uma implantação off-grid de sistemas de geração de energia solar, apresentando valores entre 0,30 e 0,60 US\$/kWh.

Dincer (2011) propõe o custo de produção de energia eólica para turbinas de médio porte (850 - 1.500 kW) situadas em uma região com regimes de vento atingindo valores médios (velocidade do vento 6,3 m/s a uma altura de 50 m) entre 5 e 6 c€/kWh. Convertendo-se esses valores para US\$/kWh a aplicando-se as taxas de inflação para esse período, o custo atual estaria entre 0,06 e 0,08 US\$/kWh.

O “Grupo de Estudos do Setor Elétrico” (GESEL) apresenta valores mais elevados de custo para a energia eólica no cenário brasileiro, 0,13 US\$/kWh. Entretanto, o GESEL acredita que a energia eólica no Brasil pode atingir valores menores, cerca de 0,06 US\$/kWh (GESEL, 2009).

Sabe-se que no Brasil quase 80% da energia elétrica produzida são de fontes hidrelétricas, por essa razão os preços associados a essa tecnologia são os menores dentre as três tecnologias analisadas. De acordo com o MME (2010), as usinas hidrelétricas de Belo Monte e Teles Pires alcançaram preços de 45 e 32 US\$/MWh no leilão energético de 2010, o

menor valor obtido no mercado regulamentado. A usina de Itaipu apresenta valores similares para o custo da energia hidrelétrica: 41 US\$/MWh (ITAIPU, 2012). Além disso, para PCHs o preço de leilão foi 63 US\$/MWh (EPE, 2013), atingindo o menor um preço equivalente ao menor custo de energia eólica e significativamente menor do que o obtido no caso de energia solar.

Para concluir, o custo de manutenção será considerado 3% do valor do custo de investimento, como proposto por Braga (2014) e é dado pela Equação 23.

$$C_{\text{Main}} = 0,03 \times \left(\frac{\text{Inv. f}}{H \cdot E_{\text{H}_2}} \right) \quad (23)$$

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA

Inicialmente todos os parâmetros foram definidos como sendo constantes com exceção da taxa anual de juros e o custo da energia elétrica. O custo da energia depende de qual fonte renovável será estudada e a taxa de juros é suscetível a flutuações de mercado. Desta forma, para prevenir possíveis variações, as taxas de juros consideradas foram: 4%, 8% e 12%.

A Tabela 5 sumariza os valores encontrados para cada parâmetro da expressão utilizada para os cálculos do custo de produção do hidrogênio.

Tabela 5: Resumo dos valores considerados para a análise.

Fontes	Inv ⁽⁴⁾ [US\$]	r (%)	k [anos]	H [h/ano]	E _{H₂} [kW]
Solar					
Eólica	2 x 413.473,15	4,0 ~ 12,0	Até 10 anos	7.665 ⁽¹⁾	179,5 ⁽²⁾⁽³⁾
Hidrelétrica					
Fontes	P _e [kW]	C _e [US\$/kWh]	ṁ _{H₂O} [m ³ /h]	C _{H₂O} [US\$/(m ³ /h)]	C _M [US\$/kWh]
Solar		0,15 - 0,47			
Eólica	177,0	0,05 - 0,13	0,054	5,52	3%
Hidrelétrica		0,03 - 0,07			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas:

(1): Considerados 03 turnos de 7 horas por dia.

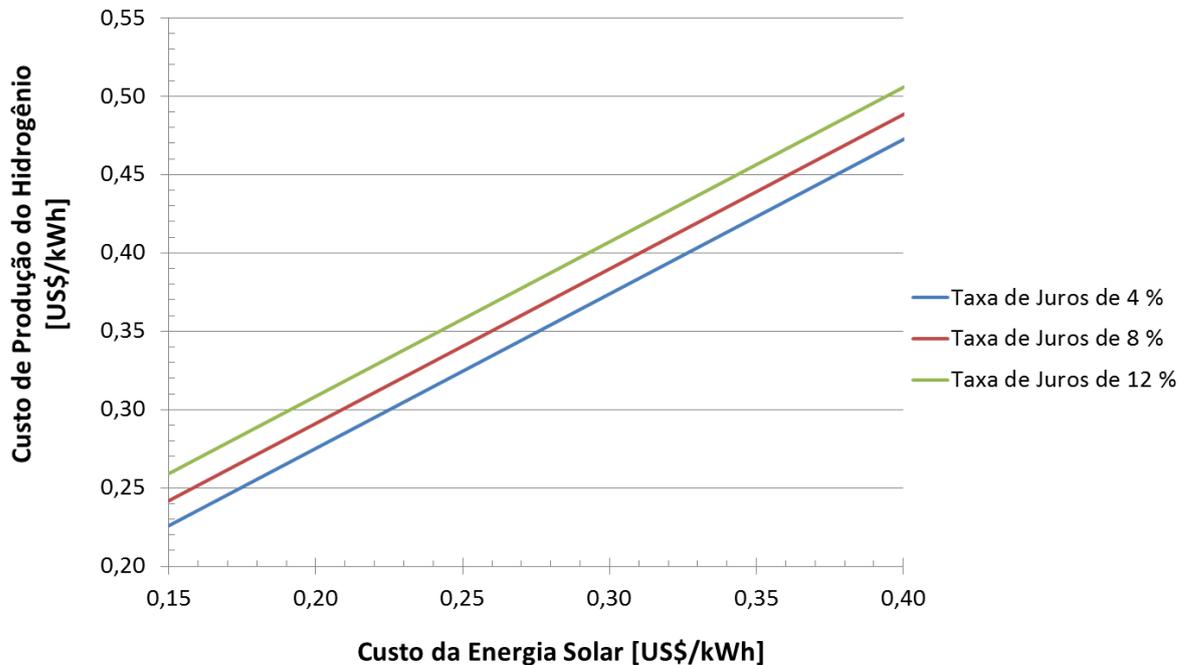
(2): Vazão mássica de hidrogênio produzido: 2 x 2,697 kg/h (60,0 Nm³/h – EMTU/SP).

(3): Poder calorífico inferior do hidrogênio: 119.800,0 kJ/kg.

(4): Investimento nos eletrolisadores PEM (duas unidades).

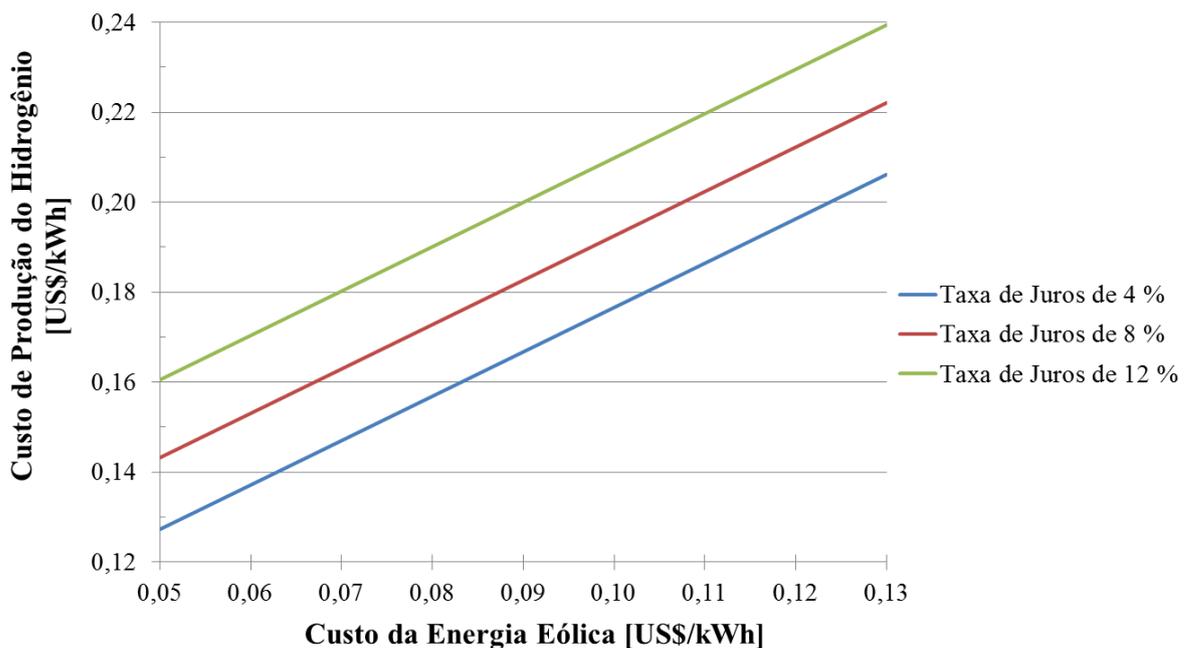
Os Gráficos 1, 2 e 3 ilustram o comportamento do custo do hidrogênio como função da taxa de juros e do custo da energia utilizada para acionar o eletrolisador: solar, eólico e hidrelétrico, respectivamente.

Gráfico 1: Custo de produção de hidrogênio a partir de plantas solares.



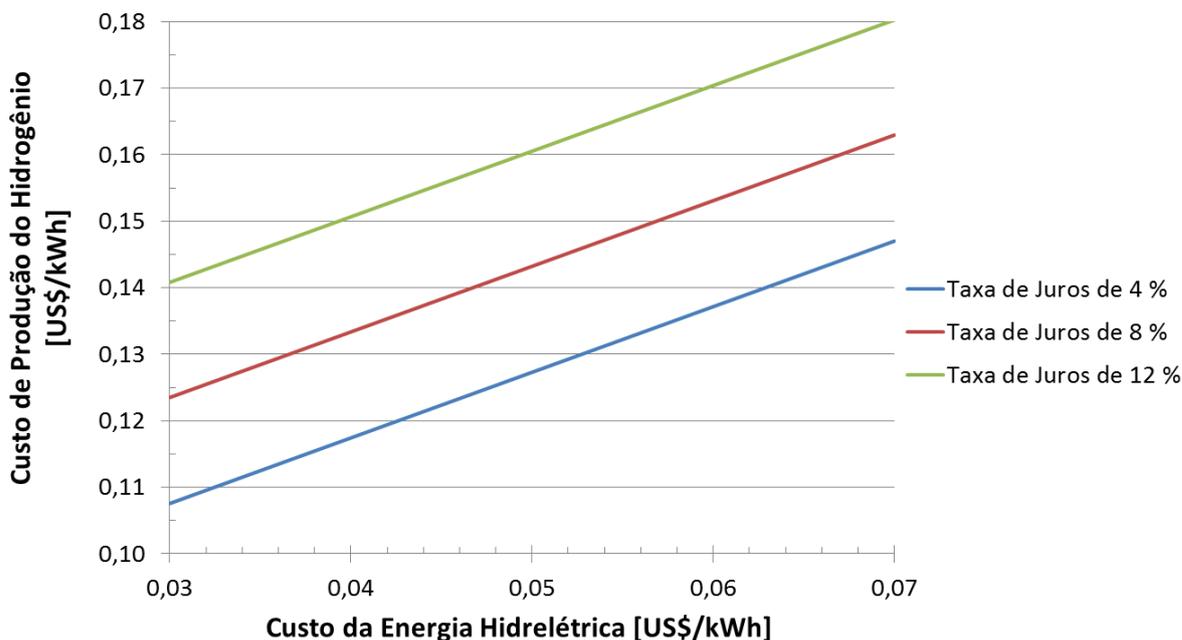
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2: Custo de produção de hidrogênio a partir de plantas eólicas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3: Custo de produção de hidrogênio a partir de plantas hidrelétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela análise do Gráfico 1, verifica-se que para a faixa considerada dos custos da eletricidade gerada a partir de PVs de 0,15 até 0,40 US\$/kWh são encontrados custos de produção de hidrogênio entre 0,23 e 0,51 US\$/kWh. No caso eólico, Gráfico 2, os custos da energia elétrica estão entre 0,05 e 0,13 US\$/kWh correspondendo a um custo do hidrogênio de 0,13 a 0,24 US\$/kWh. Por último, o Gráfico 3 apresenta uma menor amplitude entre os valores devido ao maior desenvolvimento da tecnologia associada, as usinas hidrelétricas, sendo que os custos da energia elétrica estão entre 0,03 e 0,07 US\$/kWh, e de produção de hidrogênio de 0,11 a 0,18 US\$/kWh.

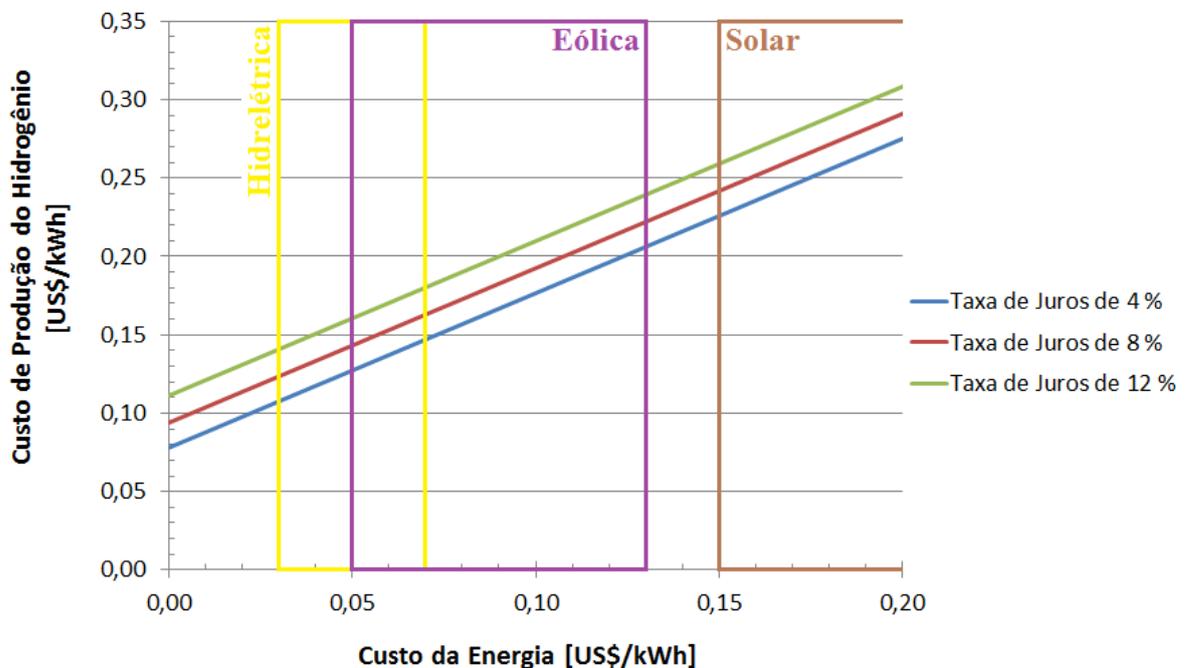
O custo de produção de hidrogênio é obtido para o menor valor do custo de energia elétrica. Por esse motivo, os resultados apresentados para a produção de hidrogênio a partir de energia proveniente de usinas hidrelétricas é mais atrativo, seguido das turbinas eólicas e pelos painéis solares. O maior custo de produção de hidrogênio obtido pelas usinas hidrelétricas está próximo ao menor custo obtido pelos PVs, enquanto o custo de produção de hidrogênio a partir de plantas eólicas atinge valores mais próximos aos apresentados para as usinas hidrelétricas.

Valores similares de custo de produção de hidrogênio para cada uma das fontes analisadas são apresentados por Silveira e Zanzi (2013). Os autores apresentam para um período de amortização de 8 anos e taxa de juros de 4% custos de produção de hidrogênio de

17, 19 e 40 centavos de dólar por quilowatt hora para as fontes hidrelétricas, eólicas e solares, respectivamente. Sendo que os custos da eletricidade considerados pelos autores para esses casos são: 0,07 US\$/kWh; 0,08 US\$/kWh; e 0,20 US\$/kWh. Os valores encontrados nos Gráficos 1, 2 e 3 são por volta de 15% inferiores aos propostos por Silveira e Zanzi (2013). Essa diferença é justificada por diferenças nos parâmetros de entrada, como é o caso do período de amortização que para esses gráficos foi de 10 anos.

O Gráfico 4 sumariza o custo de produção do hidrogênio a partir das faixas de custos da energia elétrica de cada fonte renovável abordada.

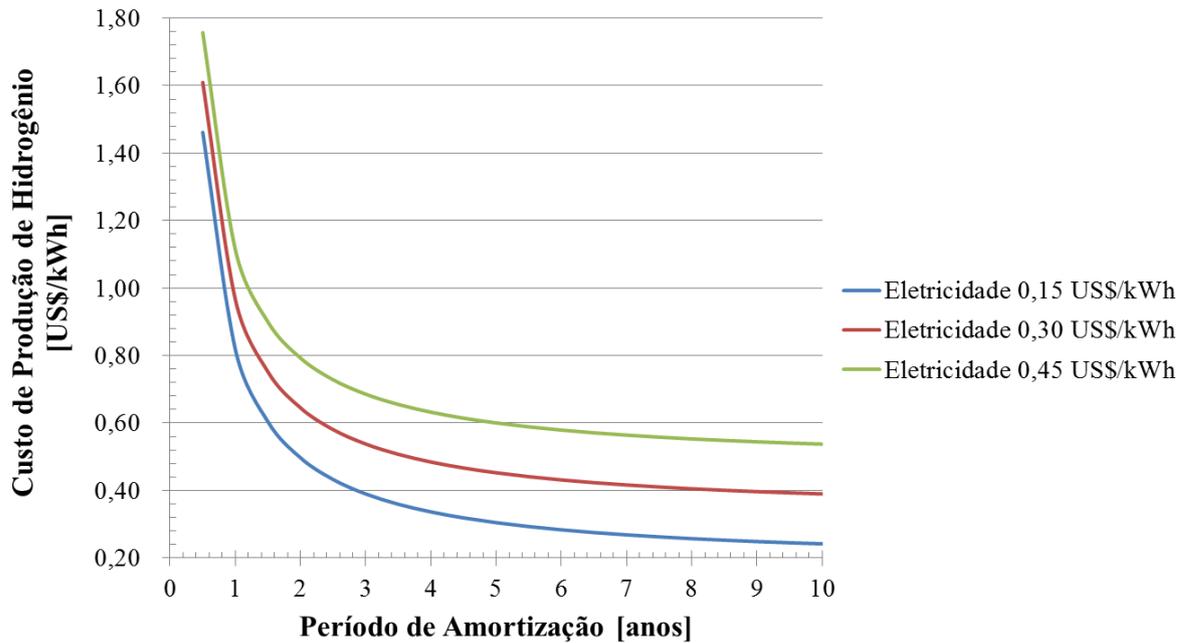
Gráfico 4: Custo de produção de hidrogênio a partir das fontes renováveis abordadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

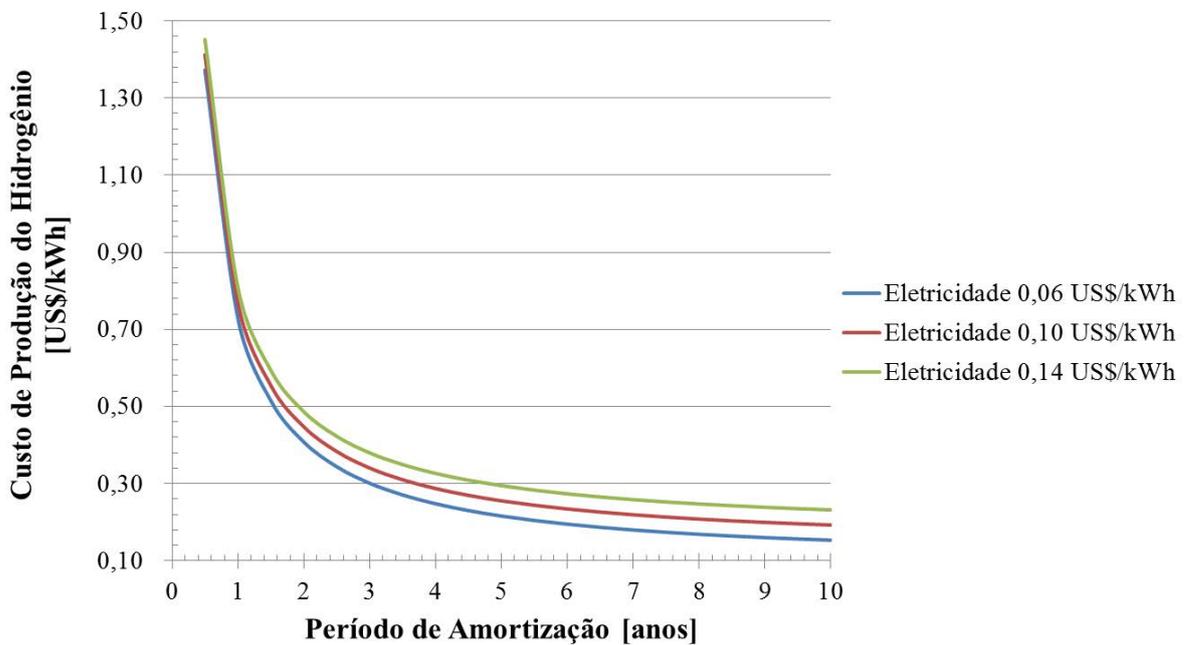
As variações das taxas de juros de 4% para 12% causam uma alteração nos custos do hidrogênio, em média, de 9,4%, 20,4% e 26,4% para os casos solar, eólico e hidrelétrico, respectivamente. Portanto, será adotado um valor de juros de 8% para o estudo do período de amortização, com a finalidade de minimizar as flutuações entre os valores. Quanto aos custos das energias, será considerado um valor mínimo, médio e máximo para todas as fontes, como apresentado nos Gráficos 5, 6 e 7.

Gráfico 5: Período de amortização para produção de hidrogênio a partir de plantas solares.



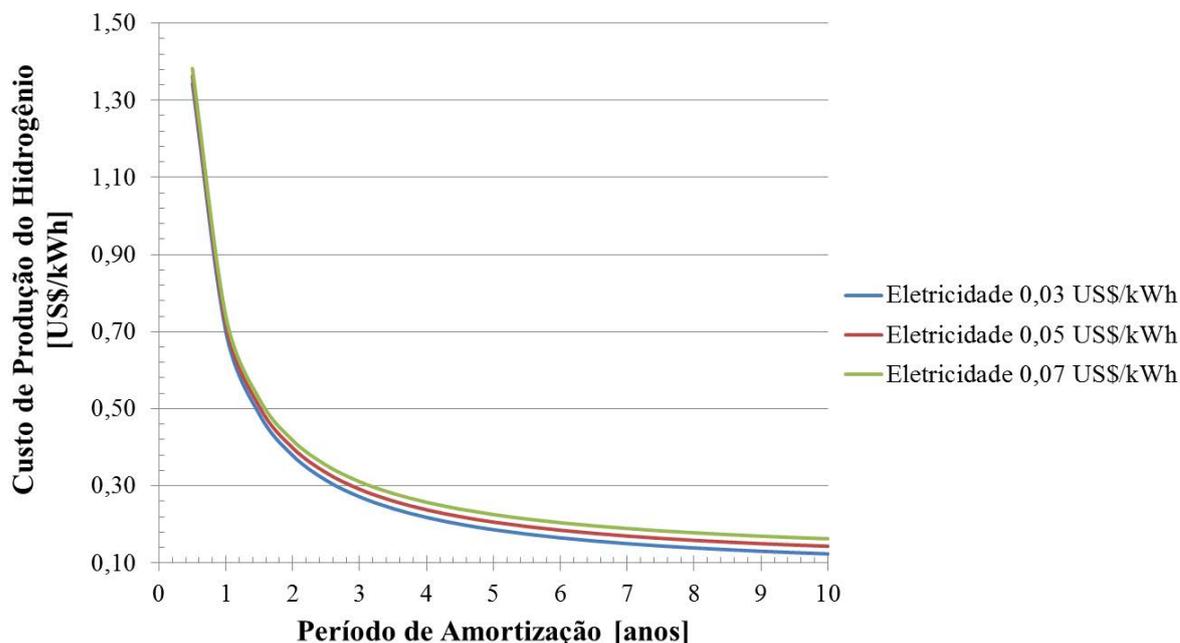
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6: Período de amortização para produção de hidrogênio a partir de plantas eólicas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7: Período de amortização para produção de hidrogênio a partir de plantas hidrelétricas.



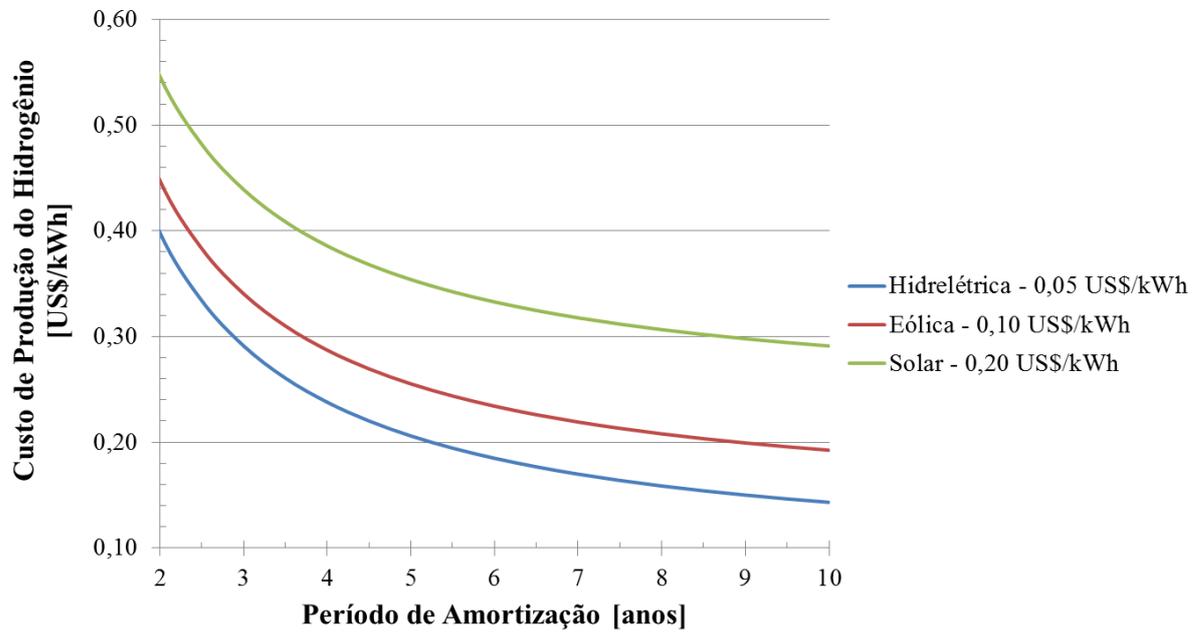
Fonte: Elaborado pelo autor.

O período de amortização é um parâmetro importante para definição de oportunidades de investimentos, sendo que em geral, um elevado período de amortização não é atrativo. Pela análise dos Gráficos 5, 6 e 7 é possível notar a importância de um baixo custo da eletricidade consumida no processo de eletrólise. No Gráfico 7, para um custo de produção do hidrogênio de aproximadamente 0,16 US\$/kWh e custo da eletricidade de 0,07 US\$/kWh o tempo de amortização é 10 anos, enquanto para os mesmo 0,16 US\$/kWh e o preço da eletricidade gerada de 0,03 US\$/kWh o tempo de amortização é reduzido à 75% do tempo, 7,5 anos.

Inicialmente, o período de amortização foi assumido como sendo de 10 anos, todavia pela análise dos três últimos gráficos é possível a consideração de uma amortização em um prazo mais curto sem que haja uma alteração significativa no custo de produção do hidrogênio.

O Gráfico 8 compara os custos de produção de hidrogênio a partir de valores intermediários dos custos da energia elétrica de cada fonte, variando-se o período de amortização de 2 até 10 anos. Considerando-se um período de amortização de 10 anos, obtêm-se os valores de custo de produção de hidrogênio iguais a 0,14, 0,19 e 0,29 US\$/kg de H₂ produzido para as fontes hidrelétrica, eólica e solar, respectivamente.

Gráfico 8: Período de amortização para produção de hidrogênio a partir das fontes renováveis abordadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 ANÁLISE MULTICRITÉRIOS: MÉTODO AHP

De maneira geral, esse capítulo visa analisar os impactos ambientais causados pelos três métodos mais utilizados para produção de hidrogênio, assim como os parâmetros econômicos relacionados com cada tecnologia e compará-los com a eletrólise da água. Para tanto, será utilizado o método AHP (Análise Hierárquica de Processos) para essa análise, o qual consiste em uma ferramenta multicritério que pode ser aplicada com o intuito de estabelecer uma hierarquia entre processos.

A Análise Hierárquica de Processos (AHP) consiste em uma teoria de medições que a partir de comparações entre pares de atributos e julgamentos de prioridades estabelece uma hierarquia entre as alternativas propostas. As comparações são feitas usando uma escala de julgamentos absolutos que representa o quanto um elemento domina o outro em relação a um dado atributo (SAATY, 1980; SAATY, 2008). A Tabela 6 apresenta a “Escala Fundamental” do AHP proposta por Saaty (1980; 2008) para as comparações entre os critérios e subcritérios.

Tabela 6: Escala fundamental de Saaty.

Intensidade da Importância	Definição	Explicação
1	Mesma Importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
2	Pouco Importante	-
3	Moderadamente Importante	Julgamento pouco a favor de uma atividade em relação à outra.
4	Mais que Moderadamente Importante	-
5	Fortemente Importante	Julgamento fortemente a favor de uma atividade em relação à outra.
6	Mais que Fortemente Importante	-
7	Extremamente Importante	Um atividade domina a outra na prática.
8	Mais que Extremamente Importante	-
9	Importância Absoluta	As evidências a favor de uma atividade são as maiores possíveis em relação à outra.
1,1 - 1,9	Pode ser utilizado para comparar duas atividades com importância muito próxima.	

Fonte: (SAATY, 1980; SAATY, 2008).

De acordo com Saaty (1980; 2008), o uso de julgamentos pode ser considerado questionável quando a objetividade é a norma, entretanto, um pouco de reflexão é o suficiente para confirmar que mesmo quando números são obtidos a partir de uma escala padrão, e conseqüentemente considerados objetivos, a interpretação desse número sempre é subjetiva.

Para as aplicações do AHP, os desempenhos de cada alternativa são obtidos pela utilização de matrizes de julgamento. Os pesos para cada um dos critérios são estabelecidos por decisões, ou seja, de maneira subjetiva (SALOMON; SHIMIZU, 2006).

Saaty (1980; 2008) propõe que as etapas abaixo devem ser respeitadas para que seja possível tomar uma decisão de maneira organizada através de prioridades.

1. Definir qual é o problema e determinar quais parâmetros devem ser avaliados.
2. Estruturar uma hierarquia de decisões a partir do topo, sendo o primeiro elemento o objetivo da decisão. Em seguida, são estruturados os objetivos em uma perspectiva mais ampla, relacionando seus níveis intermediários dentro de cada objetivo. E por último, no nível mais baixo, deve ser estruturado o conjunto de alternativas.
3. Construir um conjunto de matrizes de comparação dois a dois, comparando-se sempre os mesmos níveis hierárquicos.
4. Utilizar-se das prioridades obtidas pelas comparações para ponderar as prioridades dos níveis imediatamente inferiores. Essa operação deve ser repetida para todos os critérios/subcritérios. Esse processo deve ser seguido até que as prioridades entre as alternativas sejam obtidas.

A seguir é apresentada a análise econômica e ambiental da produção de hidrogênio, comparando as três tecnologias mais empregadas com a eletrólise da água por meio de eletrolisadores alcalinos. A análise respeita a teoria proposta por Saaty (1980), de maneira que são avaliados tanto os aspectos econômicos quanto os ambientais. Para apresentar a avaliação de maneira mais clara, as etapas anteriormente propostas serão seguidas.

1. Definir qual é o problema e determinar quais parâmetros devem ser avaliados.
 - O problema consiste na seleção da tecnologia mais indicada para produção de hidrogênio no cenário atual.
 - Os parâmetros que foram considerados para a análise são os aspectos econômicos e ambientais na produção de hidrogênio.
 - Os aspectos econômicos considerados são:
 - i. Custo de produção do hidrogênio: custo em US\$/kg de hidrogênio produzido.
 - ii. Regionalidade: custo associado ao transporte; tem como finalidade estimar qual das tecnologias apresenta maior custo de transporte, uma vez que quando a produção de um combustível é restrita a uma região, os custos de transporte do mesmo são mais elevados. Avaliado utilizando-se números binários (0: Não regional; 1: Regional).
 - iii. Rendimento do processo de produção do hidrogênio: esse parâmetro está relacionado aos desperdícios durante o processo de produção do combustível.
 - Os aspectos ambientais considerados são:
 - i. Emissão de dióxido de carbono (equivalente): quantidade de CO₂e em kg/kg de hidrogênio produzido.
 - ii. Emissões de dióxido de enxofre (equivalente): quantidade de SO₂e em kg/kg de hidrogênio produzido.
 - iii. Área utilizada para implantação: parâmetro associado às grandes desocupações de terra como consequência da implantação de uma usina, ocupando regiões que poderiam ser destinadas à agricultura. Avaliado utilizando-se números binários (0: Sem grande desocupação; 1: Grande desocupação).
 - iv. Impactos diretos à fauna e flora: prejuízos causados em curto espaço de tempo apenas pela construção da usina. Avaliado utilizando-se números binários (0: Sem grande impacto; 1: Grande impacto).

2. Estruturar uma hierarquia de decisões a partir do topo, sendo o primeiro elemento o objetivo da decisão. Em seguida, são estruturados os objetivos em uma perspectiva mais ampla, relacionando seus níveis intermédios dentro de cada objetivo. E por último, no nível mais baixo, deve ser estruturado o conjunto de alternativas.

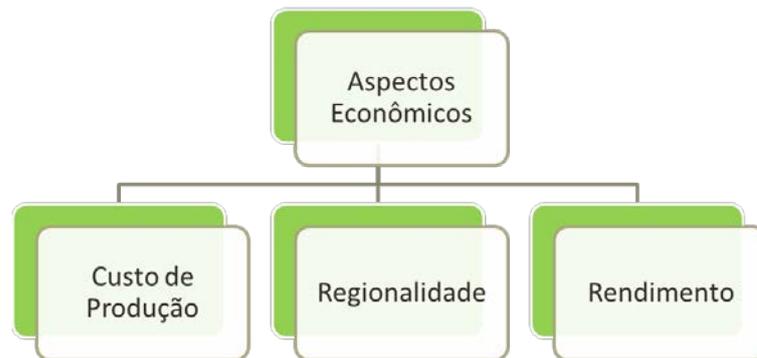
As Figura 13, 14 e 15 apresentam as hierarquias de decisões estruturadas para o problema em questão. A Figura 16 ilustra a hierarquia elaborada através do software gratuito SuperDecisions para o desenvolvimento do método AHP.

Figura 13: Estrutura da hierarquia de decisão – Objetivo.



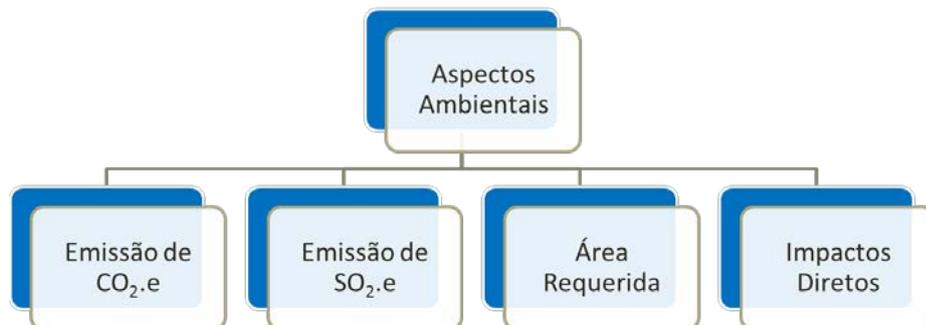
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14: Estrutura da hierarquia de decisão – Aspectos Econômicos.



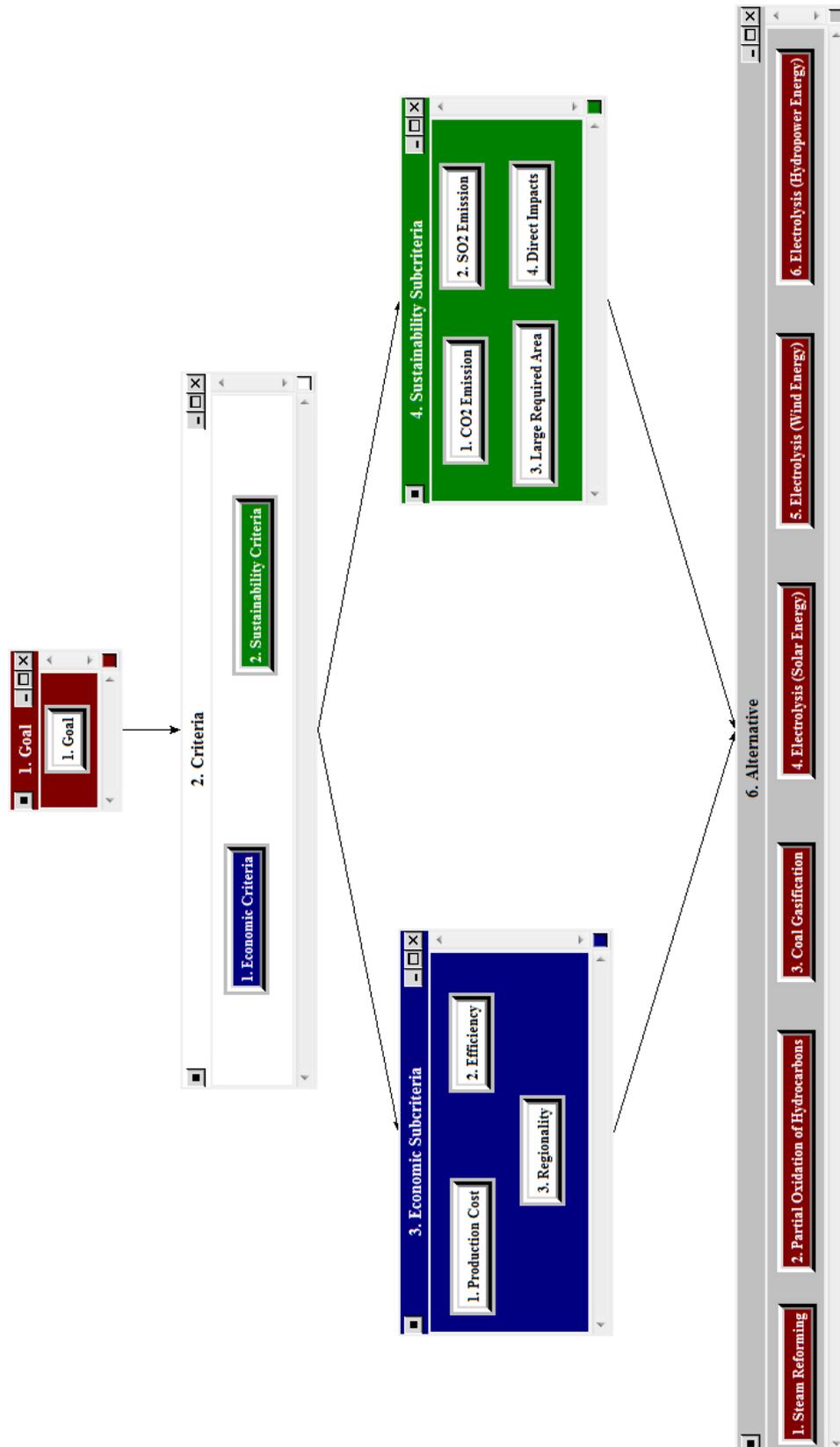
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15: Estrutura da hierarquia de decisão – Aspectos Ambientais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16: Estrutura da hierarquia de decisão – Software SuperDecisions.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 ilustra a hierarquia estabelecida para a análise da tomada de decisão. O primeiro nível consiste no “Goal”, ou seja, no objetivo da tomada de decisão: selecionar uma tecnologia para produção de hidrogênio. O segundo nível corresponde aos critérios que serão considerados, no caso dessa dissertação: aspectos econômicos e ambientais. O terceiro nível são os subcritérios, ou seja, quais parâmetros dentro de cada critério serão analisados. O quarto nível apresenta as alternativas para a seleção, sendo consideradas apenas as três atualmente mais utilizadas e a eletrólise da água com acionamento a partir de fontes renováveis (solar, eólica e hidrelétrica).

O software SuperDecisions foi desenvolvido pelo próprio Thomas Saaty, criador do método AHP, com finalidade de tornar mais prático os procedimentos matemáticos do AHP e a estruturação da hierarquia de tomada de decisão.

3. Construir um conjunto de matrizes de comparação dois a dois, comparando-se sempre os mesmos níveis hierárquicos.

A seguir são apresentadas as matrizes de comparação dos critérios e subcritérios. Os julgamentos são baseados na escala fundamental proposta por Saaty (1980; 2008), ilustrada pela Tabela 4. Após as comparações é calculado o autovetor para cada parâmetro, sendo o mesmo igual à média geométrica da linha correspondente ao critério. O peso do critério é calculado dividindo-se seu autovetor pela soma dos autovetores de todos os critérios. As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam os resultados das comparações, assim como os autovetores e os pesos para cada critério e subcritério.

A consistência dos julgamentos é avaliada pelo parâmetro “ μ ”, denominado inconsistência da matriz de julgamentos. Para tanto, é calculado o valor intermediário “ λ ” como sendo igual à soma das somas das colunas de cada critério multiplicado pelo seu peso. Por exemplo, para a Tabela 5, a soma dos julgamentos da coluna do critério aspectos econômicos é igual a 1,33 enquanto para o critério aspectos ambientais vale 4,00, desta forma, multiplica-se cada um desses valores pelo peso associado a cada critério e os valores são, novamente, somados ($1,33 \times 0,75 + 4 \times 0,25 = 2$). Por fim, é calculada a inconsistência da matriz de julgamentos, como sendo igual ao “ λ ” menos o número de critérios da matriz dividido pelo número de critérios subtraído 1,0.

As inconsistências das matrizes de julgamento devem ser menores que 10% para garantir que os julgamentos foram feitos sem contradições ou equívocos por parte do tomador

de decisão. Atualmente, valores superiores estão sendo aceitos para as matrizes, valores até 20%.

Tabela 7: Matrizes de comparação dos critérios.

Julgamento - Critérios				
	AE	AA	Autovetor	Peso
Aspectos Econômicos (AE)	1	3	1,73	75%
Aspectos Ambientais (AA)	1/3	1	0,58	25%
Soma:	1,33	4,00	2,31	

λ	2,00
μ	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 compara os aspectos econômicos e ambientais da produção de hidrogênio. Os valores da diagonal principal devem ser iguais a “1”, uma vez que correspondem à comparação de um parâmetro com ele mesmo, ou seja, pela escala fundamental do AHP equivale a “dois” parâmetros igualmente importantes. Para a comparação entre os aspectos econômicos com os ambientais foi atribuído o valor “3”, ou seja, estão sendo considerados os aspectos econômicos com sendo moderadamente mais importantes que os aspectos ambientais. A comparação recíproca (aspectos ambientais com os econômicos) também deve ser preenchida, entretanto, para que seja mantida a consistência dos julgamentos é necessário que o valor seja o inverso da comparação contrária (aspectos econômicos com ambientais).

Como já exposto anteriormente, o autovetor de cada critério é calculado pela média geométrica dos julgamentos em sua linha correspondente. Para o caso da Tabela 7, os aspectos econômicos apresentam autovetor igual a 1,73, ou seja, $\sqrt{(1 \times 3)}$. Outro valor de extrema importância são os pesos, pois eles são as informações que se deseja extrair das matrizes de comparação. O peso é calculado dividindo-se o autovetor do critério pela soma dos autovetores, ou seja, para a análise da produção de hidrogênio está sendo considerado que a importância dos aspectos econômicos corresponde a 75% contra 25% dos aspectos ambientais.

Vale lembrar que os julgamentos são realizados de maneira abstrata, não sendo necessária a realização de cálculos matemáticos para determinação de seus valores. Por essa razão, o tomador de decisão durante seus julgamentos pode cometer erros ou avaliar critérios de maneira contraditória. Por exemplo, em um julgamento de qual critério é o mais

importante dentre três opções, o tomador de decisão avalia a opção “A” como sendo melhor que a “B” que por sua vez é melhor que a “C”, e avalia a opção “C” como sendo melhor que a “A”. Por essa razão, faz-se necessário um parâmetro de avaliação da consistência da matriz de comparação.

A Tabela 8 apresenta as avaliações da matriz de julgamentos dos subcritérios dos aspectos econômicos. De modo geral, pelos julgamentos do tomador de decisão, o custo de produção do hidrogênio é o subcritério com maior destaque, 74%, contra 17% e 9% da regionalidade e rendimento, respectivamente. Outros valores de pesos podem ser encontrados de acordo com os julgamentos realizados, por esse motivo, será apresentada mais adiante uma segunda simulação de análises para a seleção da tecnologia mais indicada para a produção de hidrogênio.

Tabela 8: Matrizes de comparação dos subcritérios relacionados aos aspectos econômicos.

Julgamento - Subcritério Aspectos Econômicos					
	CP	RG	RD	Autovetor	Peso
Custo de Produção (CP)	1	5	7	3,27	74%
Regionalidade (RG)	1/5	1	2	0,74	17%
Rendimento (RD)	1/7	1/2	1	0,41	9%
Soma:	1,34	6,50	10,00	4,42	

λ	3,01
μ	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o grau de inconsistência para a Tabela 8 é diferente de zero como apresentado para a Tabela 7. Isso ocorre, pois esse parâmetro avalia a proporcionalidade entre os julgamentos, ou seja, avaliando um critério (ou subcritério) em relação a um segundo como sendo igual a 2,0 (pouco mais importante) e o mesmo critério em relação a um terceiro como sendo igual a 4,0 (mais que moderadamente importante), quando relacionados o segundo e terceiro critérios, o segundo deverá apresentar um julgamento igual a 2,0 em relação ao terceiro para que seja mantida a proporcionalidade. Não é considerado errado colocar outros valores para o julgamento, mas caso a proporcionalidade não for mantida, será refletido na inconsistência da matriz.

A Tabela 9 finaliza as matrizes de julgamentos da análise do AHP, correspondendo aos subcritérios dos aspectos ambientais. Pelos julgamentos estabelecidos, é considerado como subcritério de maior relevância dentro dos aspectos ambientais a emissão de dióxido de carbono (equivalente) a atmosfera, com mais de 50% de importância.

Tabela 9: Matrizes de comparação dos subcritérios relacionados aos aspectos ambientais.

Julgamento - Subcritério Aspectos Ambientais						
	EC	ES	AR	ID	Autovetor	Peso
Emissão CO ₂ e (EC)	1	3	5	3	2,59	53%
Emissão SO ₂ e (ES)	1/3	1	2	1	0,90	19%
Área Requerida (AR)	1/5	1/2	1	1/2	0,47	10%
Impactos Diretos (ID)	1/3	1	2	1	0,90	19%
Soma:	1,87	5,50	10,00	5,50	4,87	

λ	4,00
μ	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 10 apresenta um resumo das informações de cada tecnologia que foram consideradas nesta dissertação.

Tabela 10: Informações consideradas para a análise do AHP.

Resumo das Alternativas de Produção de Hidrogênio							
	CP	RG	RD	EC	ES	AR	ID
	[US\$/kg]	[0;1]	[%]	[kg/kg]	[g/kg]	[0;1]	[0;1]
Reforma à Vapor	2,40	0	80,0	12,00	14,00	0	0
Oxidação Parcial	2,10	0	75,0	35,90	0,00	0	0
Gaseificação do Carvão	2,97	1	55,0	29,33	33,00	0	0
Eletrólise - Solar	12,30	1	14,0	0,00	0,00	1	1
Eletrólise - Eólica	6,15	1	31,5	0,00	0,00	1	1
Eletrólise - Hidrelétrica	4,82	1	63,0	0,00	0,00	1	1

Legenda:

1. CP: Custo de produção do hidrogênio;
2. RG: Regionalidade da tecnologia;
3. RD: Rendimento global do processo;
4. EC: Emissões de CO₂e;
5. ES: Emissões de SO₂e;
6. AR: Grandes áreas requeridas para implantação;
7. ID: Impactos diretos à fauna e flora.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os custos de produção apresentados na Tabela 10 para os processos de eletrólise foram estimados a partir dos valores médios encontrados nos Gráficos 1, 2 e 3. Estimou-se o custo de produção do hidrogênio para cada tecnologia renovável em US\$/kWh, e utilizando-se do PCI [kJ/kg] do hidrogênio são convertidos esses valores para US\$/kg de hidrogênio produzido, conforme a Equação 24.

$$[\text{US\$/kg}] = [\text{US\$/kWh}] \times \left(\frac{\text{PCI}}{3600} \right) \quad (24)$$

Como esperado, os custos de produção associados a fontes renováveis são significativamente maiores que os a partir de fontes fósseis. Com relação à regionalidade de cada tecnologia, as fontes renováveis foram consideradas como sendo viáveis em apenas algumas regiões do país, uma vez que essas tecnologias dependem de diversos fatores ambientais para que as mesmas possam ser utilizadas eficientemente. O mesmo ocorreu para a gaseificação do carvão, pois as reservas de sua matéria-prima estão relacionadas principalmente a região sul do país.

Em relação aos rendimentos apresentados na Tabela 10, os mesmos correspondem aos rendimentos globais de geração de hidrogênio encontrados para cada tecnologia. Tais valores foram obtidos multiplicando-se o rendimento do processo de geração de energia elétrica com o rendimento do eletrolisador selecionado. Para a reforma a vapor do gás natural, oxidação parcial de hidrocarbonetos e gaseificação do carvão, os rendimentos são 80%, 75% e 55% ,respectivamente.

Quanto às áreas requeridas pelas fontes renováveis, as usinas hidrelétricas destacam-se por demandarem grandes áreas para construção de seus reservatórios, causando diversos impactos ambientais em sua implantação. Entretanto, não são apenas as usinas hidrelétricas que necessitam de grandes áreas, as usinas solares e as eólicas também demandam de espaço para as construções de seus respectivos parques. Desta forma, foi considerado que essas tecnologias apresentam um maior requerimento de área quando comparadas às tecnologias atualmente empregadas.

Outro ponto importante a ser considerado são os impactos instantâneos que as usinas hidrelétricas, solares e eólicas causam à fauna e à flora locais durante suas implantações. Sabe-se que são possíveis implantações com impactos reduzidos, mas para esta análise está sendo considerado o pior cenário.

A partir das informações presentes na Tabela 10, foi possível verificar os desempenhos de cada subcritério para cada alternativa. São apresentados nas Tabelas de 11 a 17 os desempenhos de cada subcritério para as tecnologias abordadas.

Com relação ao desempenho das tecnologias quanto ao custo de produção, Tabela 11, sabe-se que quanto menor o custo de produção melhor deve ser seu desempenho (eVetor). Para o cálculo do desempenho de um parâmetro cuja característica é quanto menor o valor, melhor o desempenho, deve-se adotar o seguinte procedimento: somam-se os valores do subcritério de cada alternativa; divide-se o valor encontrado pelos valores referentes de cada alternativa (por exemplo, $30,74 / 2,40 = 12,81$), tal processo é chamado de harmonização; em seguida somam-se os valores harmonizados, e é feita a ponderação de cada alternativa para o determinado subcritério, dividindo-se o valor da alternativa pelo valor da soma (por exemplo, $12,81 / 51,67 = 0,25$).

Tabela 11: Desempenho das tecnologias quanto ao custo de produção.

Desempenho - Custo de Produção			
Aspectos Econômicos	CP	Harmonização	eVetor
Reforma à Vapor (RV)	2,40	12,81	0,25
Oxidação Parcial (OP)	2,10	14,64	0,28
Gaseificação do Carvão (GC)	2,97	10,35	0,20
Eletrólise - Solar (EL)	12,30	2,50	0,05
Eletrólise - Eólica (EE)	6,15	5,00	0,10
Eletrólise - Hidrelétrica (EH)	4,82	6,38	0,12
Soma:	30,74	51,67	

Legenda:

1. CP: Custo de produção do hidrogênio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela análise da Tabela 11, nota-se que o melhor desempenho para o custo de produção é da oxidação parcial de hidrocarbonetos, e como esse subcritério apresenta o maior peso (74%) e está relacionado ao critério com maior peso (aspectos econômicos: 75%), esse será um ponto de grande importância para a seleção da tecnologia indicada para produção de H₂.

O AHP é um processo multiplicativo, desta forma quando são julgados critérios ou subcritérios como sendo binários, é necessário elaborar uma matriz de comparação de modo a eliminar os zeros. A Tabela 12 apresenta o desempenho das tecnologias quanto à regionalidade (subcritério binário), ou seja, quando comparadas duas alternativas que são

regionais retorna-se o valor “1” (igualmente importante), da mesma maneira é retornado o valor “1” quando comparadas duas alternativas que não estão sendo consideradas como regionais. Quando é feita a comparação de uma alternativa regional com uma alternativa não regional foi arbitrado o valor “1/9”, ou seja, a alternativa não regional domina a regional.

Os cálculos do Autovetor e eVetor são feitos da mesma maneira que o Autovetor e o Peso na matriz de julgamentos dos critério e subcritérios.

Tabela 12: Desempenho das tecnologias quanto à regionalidade.

Desempenho - Regionalidade									
Aspectos Econômicos	RG	RV	OP	GC	EL	EE	EH	Autovetor	eVetor
Reforma à Vapor (RV)	0	1	1	9	9	9	9	4,33	0,41
Oxidação Parcial (OP)	0	1	1	9	9	9	9	4,33	0,41
Gaseificação do Carvão (GC)	1	1/9	1/9	1	1	1	1	0,48	0,05
Eletrólise - Solar (EL)	1	1/9	1/9	1	1	1	1	0,48	0,05
Eletrólise - Eólica (EE)	1	1/9	1/9	1	1	1	1	0,48	0,05
Eletrólise - Hidrelétrica (EH)	1	1/9	1/9	1	1	1	1	0,48	0,05
Soma:		2,44	2,44	22,00	22,00	22,00	22,00	10,58	

Legenda:

1. RG: Regionalidade da tecnologia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao contrário do custo de produção, o rendimento é um subcritério que quanto maior seu valor, melhor será o desempenho da tecnologia. Desta forma, os cálculos do eVetor apresentam diferenças quando comparado aos cálculos do desempenho dos custos de produção. Os procedimentos para o caso da Tabela 13 consistem em: somar os valores dos rendimentos e dividir cada um deles pela soma (por exemplo, $80,0 / 318,5 = 0,25$), sendo esse valor o próprio eVetor, uma vez que a soma dos valores harmonizados é igual a 1,0.

Tabela 13: Desempenho das tecnologias quanto ao rendimento.

Desempenho - Rendimento			
Aspectos Econômicos	RD	Harmonização	eVetor
Reforma à Vapor (RV)	80,0	0,25	0,25
Oxidação Parcial (OP)	75,0	0,24	0,24
Gaseificação do Carvão (GC)	55,0	0,17	0,17
Eletrólise - Solar (EL)	14,0	0,04	0,04
Eletrólise - Eólica (EE)	31,5	0,10	0,10
Eletrólise - Hidrelétrica (EH)	63,0	0,20	0,20
Soma:	318,5	1,00	

Legenda:

1. RD: Rendimento global do processo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela análise da Tabela 13, nota-se que o melhor rendimento global para a geração de hidrogênio é da reforma à vapor do metano, seguido da oxidação parcial de hidrocarbonetos e eletrólise da água com acionamento do eletrolisador por usinas hidrelétricas.

Para a Tabela 14 e 15, desempenho das tecnologias quanto às emissões de CO₂e e SO₂e, respectivamente, foi realizado um procedimento similar aos cálculos binários, com o intuito de eliminar os zeros. A principal diferença consiste que nestes casos a comparação entre duas alternativas quanto às emissões apresentam valores quantitativos e não qualitativos, podendo ser avaliadas as alternativas ponto a ponto.

Tabela 14: Desempenho das tecnologias quanto às emissões de CO₂e.

Desempenho - Emissões CO ₂ e									
Aspectos Ambientais	EC	RV	OP	GC	EL	EE	EH	Autovetor	eVetor
Reforma à Vapor (RV)	12,00	1	4	3	1/7	1/7	1/7	0,57	0,06
Oxidação Parcial (OP)	35,90	1/4	1	1/2	1/9	1/9	1/9	0,24	0,02
Gaseificação do Carvão (GC)	29,33	1/3	2	1	1/8	1/8	1/8	0,33	0,03
Eletrólise - Solar (EL)	0,00	7	9	8	1	1	1	2,82	0,29
Eletrólise - Eólica (EE)	0,00	7	9	8	1	1	1	2,82	0,29
Eletrólise - Hidrelétrica (EH)	0,00	7	9	8	1	1	1	2,82	0,29
Soma:		22,58	34,00	28,50	3,38	3,38	3,38	9,60	

Legenda:

1. EC: Emissões de CO₂e.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15: Desempenho das tecnologias quanto às emissões SO₂e.

Desempenho - Emissões SO ₂ e									
Aspectos Ambientais	ES	RV	OP	GC	EL	EE	EH	Autovetor	eVetor
Reforma à Vapor (RV)	14,00	1	1/6	2	1/6	1/6	1/6	0,34	0,04
Oxidação Parcial (OP)	0,00	6	1	9	1	1	1	1,94	0,23
Gaseificação do Carvão (GC)	33,00	1/2	1/9	1	1/9	1/9	1/9	0,21	0,02
Eletrólise - Solar (EL)	0,00	6	1	9	1	1	1	1,94	0,23
Eletrólise - Eólica (EE)	0,00	6	1	9	1	1	1	1,94	0,23
Eletrólise - Hidrelétrica (EH)	0,00	6	1	9	1	1	1	1,94	0,23
Soma:		25,50	4,28	39,00	4,28	4,28	4,28	8,32	

Legenda:

1. ES: Emissões de SO₂e.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As Tabelas 16 e 17 correspondem aos desempenhos das tecnologias quanto à área requerida e aos impactos diretos, respectivamente. Como já abordado anteriormente, tais subcritérios estão sendo tratados como binários e a dominância de uma alternativa sobre a outra está indicada pelo valor “9”.

Tabela 16: Desempenho das tecnologias quanto à área requerida.

Desempenho - Área Requerida									
Aspectos Ambientais	AR	RV	OP	GC	EL	EE	EH	Autovetor	eVetor
Reforma à Vapor (RV)	0	1	1	1	9	9	9	3,00	0,30
Oxidação Parcial (OP)	0	1	1	1	9	9	9	3,00	0,30
Gaseificação do Carvão (GC)	0	1	1	1	9	9	9	3,00	0,30
Eletrólise - Solar (EL)	1	1/9	1/9	1/9	1	1	1	0,33	0,03
Eletrólise - Eólica (EE)	1	1/9	1/9	1/9	1	1	1	0,33	0,03
Eletrólise - Hidrelétrica (EH)	1	1/9	1/9	1/9	1	1	1	0,33	0,03
Soma:		3,33	3,33	3,33	30,00	30,00	30,00	10,00	

Legenda:

1. AR: Grandes áreas requeridas para implantação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17: Desempenho das tecnologias quanto aos impactos diretos.

Desempenho - Impactos Diretos									
Aspectos Ambientais	ID	RV	OP	GC	EL	EE	EH	Autovetor	Peso
Reforma à Vapor (RV)	0	1	1	1	9	9	9	3,00	0,30
Oxidação Parcial (OP)	0	1	1	1	9	9	9	3,00	0,30
Gaseificação do Carvão (GC)	0	1	1	1	9	9	9	3,00	0,30
Eletrólise - Solar (EL)	1	1/9	1/9	1/9	1	1	1	0,33	0,03
Eletrólise - Eólica (EE)	1	1/9	1/9	1/9	1	1	1	0,33	0,03
Eletrólise - Hidrelétrica (EH)	1	1/9	1/9	1/9	1	1	1	0,33	0,03
Soma:		3,33	3,33	3,33	30,00	30,00	30,00	10,00	

Legenda:

1. ID: Impactos diretos à fauna e flora.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4. Utilizar-se das prioridades obtidas pelas comparações para ponderar as prioridades dos níveis imediatamente inferiores. Essa operação deve ser repetida para todos os critérios/subcritérios. Esse processo deve ser seguido até que as prioridades entre as alternativas sejam obtidas.

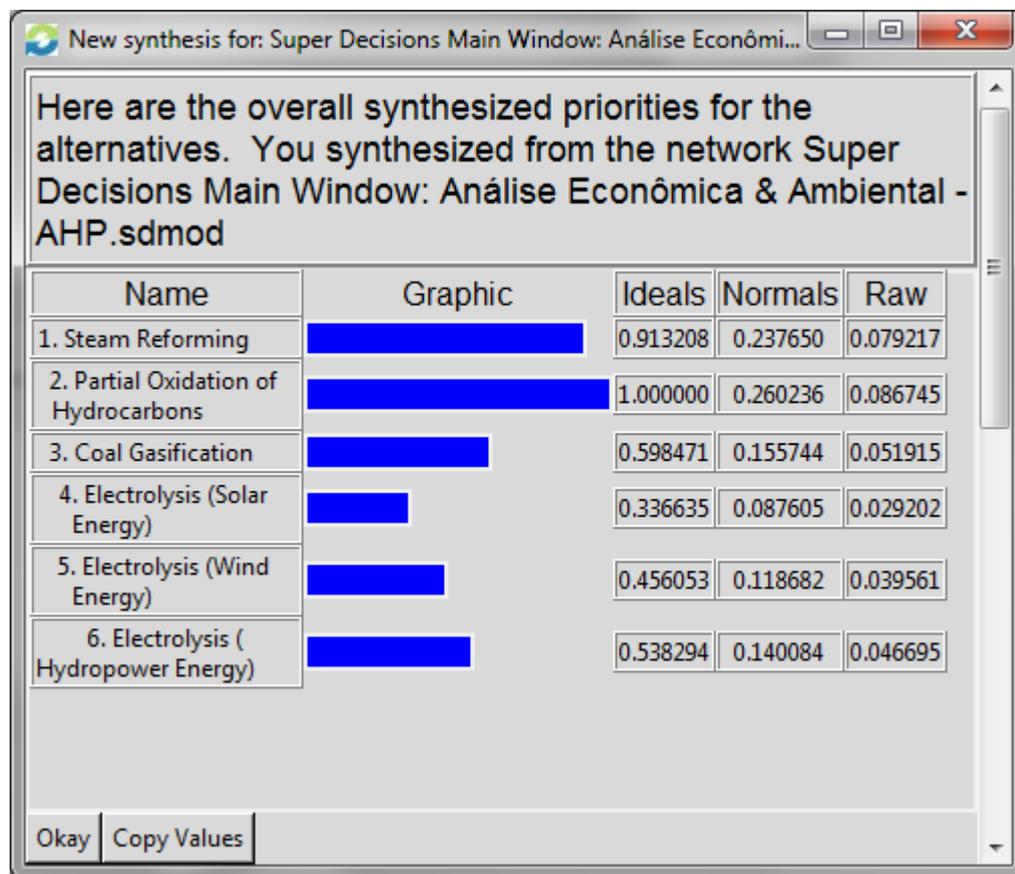
A Figura 17 sintetiza os valores obtidos pelo software SuperDecisions, tais valores ordenam de maneira hierárquica as tecnologias estudadas. Nota-se que pelas considerações anteriores, as tecnologias que apresentam melhores parâmetros econômicos ocupam os primeiros lugares na seleção de qual tecnologia utilizar.

Em primeiro lugar da hierarquia está a oxidação parcial de hidrocarbonetos com 26% da prioridade, conforme indicado pela coluna “Normals” da Figura 17. A reforma a vapor do metano está classificada como segunda opção e a gaseificação do carvão como terceira. Dentre as alternativas renováveis a que mais se destaca é a eletrólise com eletrolisador

acionado pela energia hidrelétrica. A alternativa eólica aproxima-se da hidrelétrica, entretanto a opção de eletrolisador acionado por painéis fotovoltaicos não apresentou bons resultados, sendo classificada como última opção, principalmente devido ao alto custo do hidrogênio produzido por essa tecnologia.

Embora o método AHP tenha priorizado as tecnologias com base fóssil por apresentarem um menor custo, é possível analisar qual deveria ser a relação dos pesos dos aspectos econômicos e aspectos ambientais para que um dos métodos de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis ocupasse o topo da hierarquia. Para tanto, é necessário analisar-se o gráfico de sensibilidade do método AHP.

Figura 17: Hierarquia das tecnologias apresentada pelo software SuperDecisions.



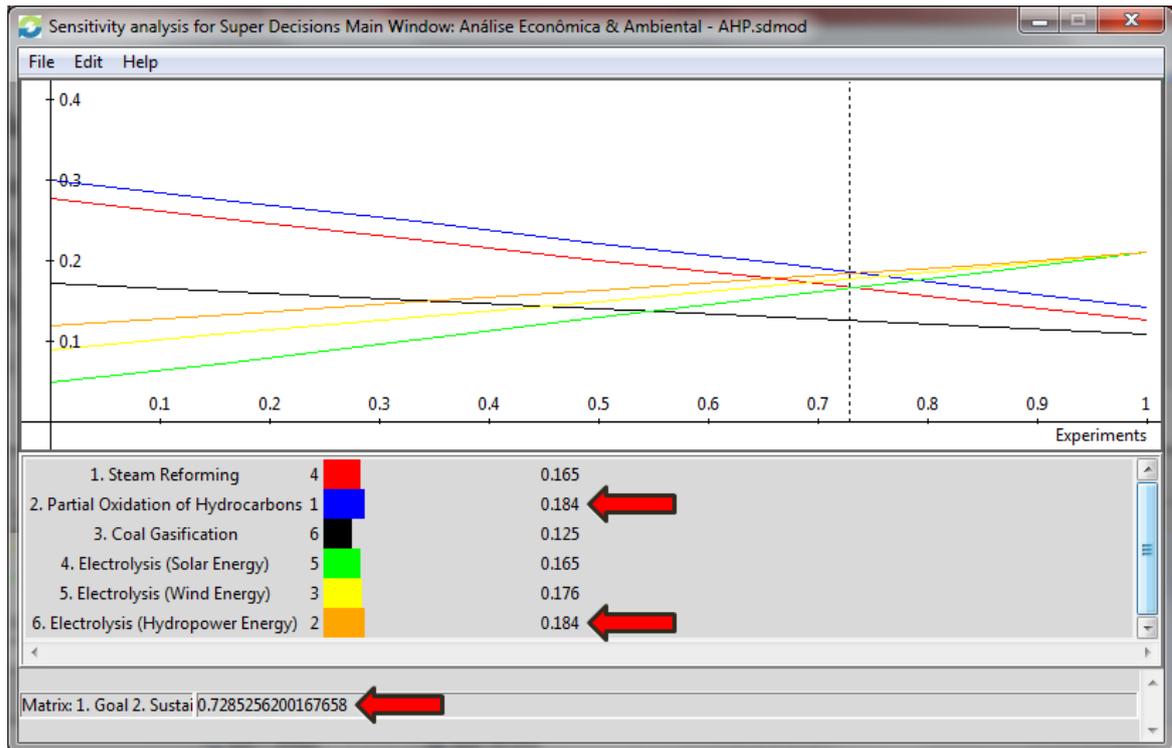
Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráficos 9 ilustra a sensibilidade na organização da hierarquia. O eixo “X” do gráfico corresponde ao peso dos aspectos ambientais, e o eixo “Y” corresponde à hierarquia normalizada para seleção das tecnologias.

O ponto marcado no Gráfico 9 pela linha vertical tracejada ilustra a situação em que a produção de hidrogênio a partir de energia hidrelétrica ocupa a primeira posição da hierarquia

de seleção. O valor do peso dos aspectos ambientais nesse ponto é de aproximadamente 72,8%. Ou seja, é necessário julgar os aspectos ambientais como sendo mais importantes que os econômicos para que uma fonte renovável seja selecionada para a produção de hidrogênio, mantendo-se todos os outros parâmetros inalterados.

Gráfico 9: Análise de sensibilidade do AHP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mencionado anteriormente, com a finalidade de ilustrar as diferenças que julgamentos distintos poderiam causar na análise, foram alteradas as Tabelas 7 e 8 e foram refeitos os cálculos utilizando-se o SuperDecisions. Todos os desempenhos foram mantidos conforme as tabelas anteriores.

Para a segunda simulação de julgamentos, os aspectos econômicos e ambientais são considerados como tendo o mesmo peso na análise das alternativas, conforme ilustrado pela Tabela 18. Desta forma, pode-se prever o comportamento da hierarquia de alteração em um cenário que os aspectos econômicos e ambientais apresentam a mesma importância.

Tabela 18: Matrizes de comparação dos critérios (2ª Simulação).

Julgamento - Critérios				
	AE	AA	Autovetor	Peso
Aspectos Econômicos (AE)	1	1	1,00	50%
Aspectos Ambientais (AA)	1	1	1,00	50%
Soma:	2,00	2,00	2,00	

λ	2,00
μ	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à Tabela 19, foram alterados os julgamentos de modo que o peso do custo de produção do hidrogênio diminuísse sua influência na tomada de decisão. Desta forma, foram obtidos os resultados conforme a Figura 18.

Tabela 19: Matrizes de comparação dos subcritérios relacionados aos aspectos econômicos (2ª Simulação).

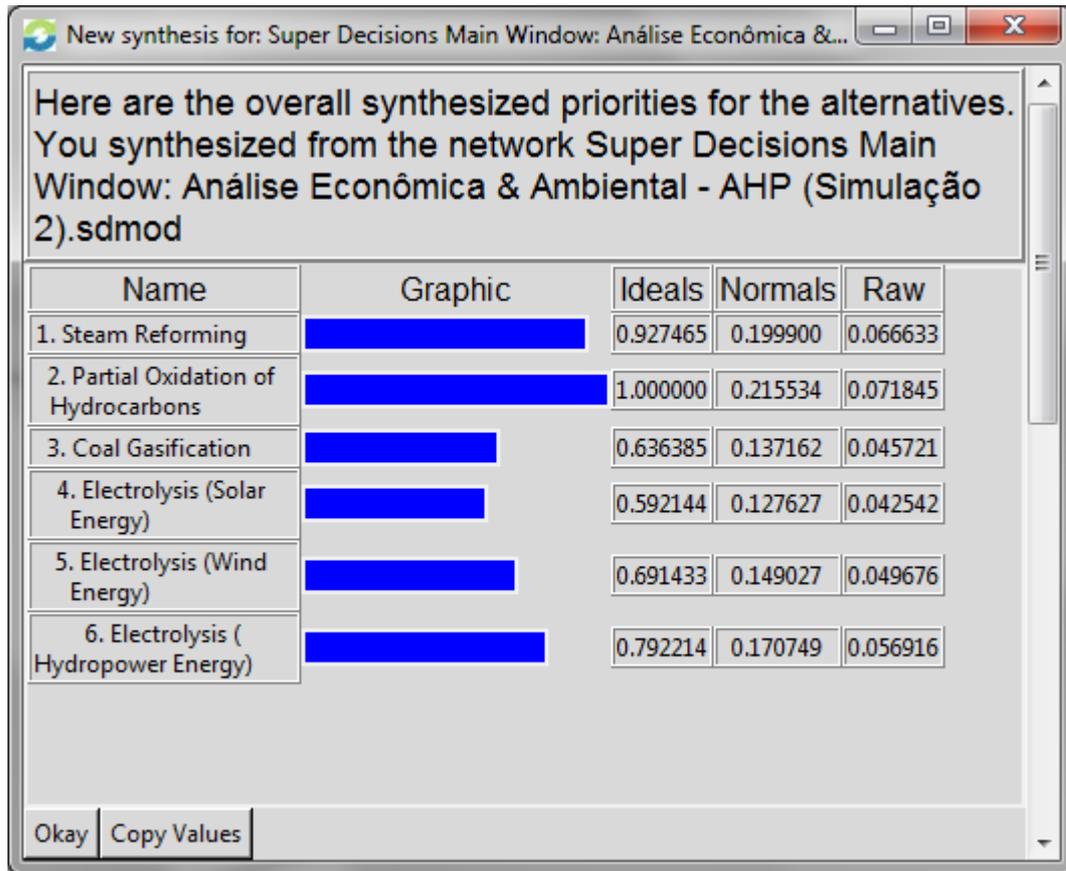
Julgamento - Subcritério Aspectos Econômicos					
	CP	RG	RD	Autovetor	Peso
Custo de Produção (CP)	1	3	2	1,82	54%
Regionalidade (RG)	1/3	1	1/2	0,55	16%
Rendimento (RD)	1/2	2	1	1,00	30%
Soma:	1,83	6,00	3,50	3,37	

λ	3,01
μ	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando a Figura 18 com a Figura 17, é evidente um melhor desempenho das tecnologias renováveis, apesar de a tecnologia selecionada continuar sendo a oxidação parcial de hidrocarbonetos. Destaca-se que para este novo cenário, tanto a produção a partir da energia hidrelétrica quanto da energia eólica superam a produção de hidrogênio pela gaseificação do carvão.

Figura 18: Hierarquia das tecnologias apresentada pelo software SuperDecisions (2ª Simulação).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tapia (2013) realiza uma análise multicritério para seleção de uma tecnologia para a produção de hidrogênio, considerando para avaliação além de aspectos econômicos e ambientais, os aspectos sociais. Os resultados encontrados por Tapia (2013) apontam que a tecnologia ideal para produção de hidrogênio é a eletrólise a partir de fontes renováveis empatada com a produção via processo biológico (biofotólise). O processo de gaseificação do carvão foi classificado como a pior alternativa (4º lugar) dentre as analisadas e a reforma a vapor do gás natural atingiu uma posição intermediária (3º lugar). A tendência por fontes com menores impactos ambientais em seu trabalho ocorre pelos critérios que foram considerados na análise, desta forma, fica evidente a importância da seleção dos critérios a serem avaliados.

6 CONCLUSÕES

A eletrólise da água pode ser realizada por diversas tecnologias, dentre elas estão às três estudadas nesta dissertação: os eletrolisadores alcalinos, os eletrolisadores tipo PEM e os eletrolisadores tipo SOEC. Desses equipamentos apenas os alcalinos e os tipo PEM estão presentes no mercado comercialmente, sendo que o eletrolisador tipo SOE ainda está em desenvolvimento. Foi visto que a eficiência para esses eletrolisadores está diretamente vinculada a alguns parâmetros, tais como: temperatura, pressão, material dos eletrodos, solução eletrolítica, entre outros parâmetros apresentados anteriormente. A temperatura é considerada a variável que mais tem influência sobre o rendimento do processo, uma vez que sua alteração está relacionada com diminuição do potencial energético demandado para os rompimentos das ligações entre as moléculas em uma reação, por meio do aumento da condutividade iônica dos eletrodos.

Apesar das reações globais serem as mesmas para as três tecnologias, a formação do hidrogênio não ocorre da mesma maneira, tendo cada qual sua particularidade. Outra diferença importante está na eficiência energética de cada processo, apesar de ainda não estar liberado comercialmente para compra, os eletrolisadores SOE são os que apresentam a maior eficiência energética das tecnologias aqui abordadas, seguido pelos eletrolisadores PEM e por último os alcalinos.

Como analisado, o Brasil dispõe de um grande potencial de geração de energia renovável, tanto para energia solar quanto para hidrelétrica e eólica. Entretanto as duas que aparecem com maior destaque são a eólica e a hidrelétrica. A energia eólica está em um processo rápido de diminuição de custos, fazendo com que cada vez mais seja visada a investimentos. Todavia, a utilização de qualquer uma dessas tecnologias para a produção de hidrogênio depende da situação de como esse combustível é produzido. Por exemplo, se uma PCH ou usina hidrelétrica de grande porte está trabalhando em seu ponto de operação máxima, com uma quantidade pequena de água vertida, a instalação de um eletrolisador para esse cenário ficaria comprometida. Entretanto, o sistema de geração de hidrogênio é atrativo quando o mesmo utiliza-se da energia “desperdiçada” por esses processos de geração de energia elétrica para o seu funcionamento. O mesmo é válido para as energias eólica e solar, em um caso de pico de produção de eletricidade acima da energia demandada pela rede, é possível utilizar-se dessa energia com a implantação de controladores/conversores para o acionamento de um eletrolisador.

Quanto à análise econômica, a produção do hidrogênio a partir da energia solar de painéis fotovoltaicos não se mostrou como sendo uma alternativa atrativa, apresentando custos significativamente superiores aos obtidos pelas fontes eólica e hidrelétrica. Tal fato se explica devido ao elevado custo de geração de energia elétrica atualmente obtida por essa fonte. Para as outras fontes foram encontrados valores razoáveis para o custo de produção de hidrogênio, sobretudo para a fonte hidrelétrica, a qual apresentou o menor custo de produção de hidrogênio. Entretanto, faz-se necessário um estudo que englobe os custos associados ao armazenamento e ao transporte desse combustível, pois a geração desses tipos de energia é geralmente vinculada às características geográficas ou ambientais.

Os valores dos custos de produção de hidrogênio encontrados para fontes renováveis são significativamente maiores que os a partir de fontes fósseis. Desta forma, vale ressaltar a importância de políticas de incentivo às fontes renováveis, com auxílios governamentais à produção de hidrogênio por fontes não fósseis, podendo tornar mais atrativa aos investidores essas alternativas.

De qualquer forma, é sabido que a utilização de matrizes energéticas apenas com base em fontes fósseis está comprometida, do ponto de vista ambiental. Por esse motivo, a análise multicritérios para seleção de uma determinada tecnologia se torna de suma importância, uma vez que o custo já não é mais o único parâmetro a ser analisado.

Com relação ao método AHP, esse se mostrou suficiente para auxiliar no processo de seleção da tecnologia mais indicada à produção de hidrogênio. É evidente que o julgamento de cada indivíduo pode apresentar diferenças, a utilização de softwares como o SuperDecisions torna mais prático os estudos.

A hierarquia das alternativas apresentada pelo software qualificou a oxidação parcial de hidrocarbonetos como sendo a tecnologia de produção de hidrogênio mais eficiente, dados os parâmetros e pesos considerados na avaliação. Um dos principais motivos desse processo ser selecionado dá se ao fato de que o mesmo apresentou como sendo a tecnologia com menor custo de produção de hidrogênio, um dos critérios com maior peso nessa análise. Como o AHP depende de julgamentos abstratos para sua avaliação, outros parâmetros e outros pesos poderiam ter sido utilizados. A segunda análise do AHP ilustra como pode ser alterada a hierarquia do processo pela alteração de julgamentos.

Analisando-se apenas os aspectos econômicos, a seleção de uma tecnologia fóssil seria o mais indicado. Entretanto, como pode ser visto pela segunda simulação do AHP, conforme os aspectos ambientais ganharam importância, a opção de produção de hidrogênio através da eletrólise da água com energia elétrica oriunda de plantas hidrelétricas começou a se destacar.

Esse fato torna imprescindível a avaliação de multicritérios quando se deseja selecionar uma alternativa.

Como apresentado, a produção de hidrogênio a partir da energia hidrelétrica foi a tecnologia renovável que mais se aproximou às fontes fósseis. Entretanto, ela só poderia ser considerada a tecnologia ideal caso os pesos dos aspectos ambientais superassem aos aspectos econômicos.

Outro ponto muito importante, é que a análise multicritérios considerou alguns dos impactos causados pelas fontes renováveis. Porém, para a implantação de uma central de geração de hidrogênio em uma usina hidrelétrica que está atualmente em operação, tais impactos poderiam ser desconsiderados visto que a instalação da central apenas diminuiria os desperdícios da usina.

Dessa forma, para futuros trabalhos pode-se pensar em remover os impactos da causados para implantação de tecnologias para obtenção de energia a partir de fontes renováveis. Assim como proposto por Tapia (2013), outros critérios podem ser considerados para a análise do AHP e poderiam ser elaborados, ainda, questionários com a função de auxiliar em uma maior confiabilidade nos julgamentos, sendo apresentados para estudantes e professores de engenharia para que os julgamentos representem os pontos de vistas de um grupo. A utilização de outras ferramentas multicritérios para a análise poderia ajudar na confirmação dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S. A.. 'Renewable' hydrogen: Prospects and challenges. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, p. 3034-3040. dez. 2010. Disponível em: <<http://raceadm3.nuca.ie.ufrj.br/BuscaRace/Docs/tabassi1.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2015.
- ACAR, C.; DINCER, I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. **International Journal Of Hydrogen Energy**. out. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913025330>>. Acesso em: 31 ago. 2015.
- AKYUZ, E.; OKTAY, Z.; DINCER, I. Performance investigation of hydrogen production from a hybrid wind-PV system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 21, p. 16623–16630, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319912005149>>. Acesso em: 5 abr. 2014.
- ANEEL: **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2008 Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2013.
- ANEEL: **Energia Eólica**. 2008 Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>. Acesso em: 8 dez. 2013.
- ANEEL: **Energia Hidráulica**. 2004 Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica(2).pdf)>. Acesso em: 8 dez. 2013.
- ANEEL: **Energia Solar**. 2004 Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 8 dez. 2013.
- AWASTHI, A.; SCOTT, K.; BASU, S. Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 22, p. 14779–14786, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319911006343>>. Acesso em: 5 abr. 2014.
- BCB: **Histórico das taxas de juros**. 2013. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp#notas/>>. Acesso em: 8 dez. 2014.
- BARBIR, F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. **Solar Energy**, v. 78, n. 5, p. 661–669, 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X04002464>>. Acesso em: 21 mar. 2014.
- BHANDARI, R.; TRUDEWIND, C. A.; ZAPP, P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. **Journal of Cleaner Production**, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261300509X>>. Acesso em: 2 abr. 2014.
- BIČÁKOVÁ, O.; STRAKA, P. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 16, p. 11563–11578, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319912011901>>. Acesso em: 22 mar. 2014.

BO, Y.; WENQIANG, Z.; JINGMING, X.; JING, C. Status and research of highly efficient hydrogen production through high temperature steam electrolysis at INET. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 7, p. 2829–2835, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031990900706X>>. Acesso em: 5 abr. 2014.

BRAGA, L. B. **Aspectos técnicos, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio**. 2014. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

BRISSE, A; SCHEFOLD, J.; ZAHID, M. High temperature water electrolysis in solid oxide cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 20, p. 5375–5382, 2008. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319908008355>>. Acesso em: 1 abr. 2014.

CEGAS: **Distribuição de gasodutos**. 2008. Disponível em: <<http://www.cegas.com.br/imagens/grafbrasilbolivia.gif>>. Acesso em: 1 abr. 2014.

DINCER, F. The analysis on wind energy electricity generation status, potential and policies in the world. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5135–5142, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111002838>>. Acesso em: 5 abr. 2014.

DINCER, I. Green methods for hydrogen production. **International Journal Of Hydrogen Energy**. mar. 2011. Disponível em: <gazi.edu.tr/posts/download?id=104923>. Acesso em: 31 ago. 2015.

EPE: **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**. 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2014.

EPE: **Informe à imprensa: 2º Leilão de Energia A-5/2013**. 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20131213_1.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2014.

EMTU: **Ônibus brasileira a hidrogênio**. Disponível em: <<http://www.emtu.sp.gov.br/EMTU/pdf/Livro%20digital%20do%20Projeto%20Hidrog%C3%AAnio-4.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2014.

ESMAP Technical Report. **Technical and economic assessment of off-grid, mini-grid and grid electrification technologies**. ESMAP /TP-121/07. dez. 2007.

ORHAN, M. F.; DINCER, I.; ROSEN, M. A.; KANOGLU, M. Integrated hydrogen production options based on renewable and nuclear energy sources. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, p. 6059-6082. jun. 2012. Disponível em: <<http://www.citeulike.org/user/mpellow/article/11081358>>. Acesso em: 31 ago. 2015.

GANLEY, J. C. High temperature and pressure alkaline electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 9, p. 3604–3611, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319909003577>>. Acesso em: 5 abr. 2014.

GENÇ, M. S.; ÇELIK, M.; KARASU, İ. A review on wind energy and wind–hydrogen production in Turkey: A case study of hydrogen production via electrolysis system supplied by wind energy conversion system in Central Anatolian Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 9, p. 6631–6646, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112004807>>. Acesso em: 5 abr. 2014.

GRIGORIEV, S.; POREMBSKY, V.; FATEEV, V. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 2, p. 171–175, 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031990500145X>>. Acesso em: 21 mar. 2014.

GESEL: **Os custos da energia eólica brasileira**. Disponível em: <http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/19_TDSE9.pdf>. Acesso: 11 ago. 2014.

HYDROGEN ANALYSIS RESOURCE CENTER: **Lower and Higher Heating Values of Fuels**. Disponível em: <http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen/site_specific/fuel_heating_calculator/>. Acesso: 8 dez. 2014.

HYDROGENICS CORPORATION: **Electrolysis**. 2013. Disponível em: <<http://www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology/electrolysis>>. Acesso: 11 ago. 2014.

HOLLADAY, J. D.; HU, J.; KING, D. L.; WANG, Y. An overview of hydrogen production technologies. **Catalysis Today**, v. 139, n. 4, p. 244–260, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920586108004100>>. Acesso em: 19 mar. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso: 28 jan. 2015.

ITAIPU BINACIONAL: **Itaipu prevê bater novo recorde neste ano na produção de energia**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/itaipunamidia/itaipu-preve-bater-novo-recorde-neste-ano-na-producao-de-energia>>. Acesso: 11 ago. 2014.

JOSHI, A. S.; DINCER, I.; REDDY, B. V. Solar hydrogen production: A comparative performance assessment. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 17, p. 11246–11257, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910023372>>. Acesso em: 27 mar. 2014.

KALAMARAS, C. M.; EFSTATHIOU, A. M. Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. **Conference Papers in Energy**. 2013. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/cpis/2013/690627>>. Acesso em: 27 mar. 2014.

KLEIJN, R.; VOET, E. van der. Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Sp, p. 2784-2795. jul. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002467>>. Acesso em: 27 mar. 2014.

KOTHARI, R.; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R. L.. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. jun. 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106001158>>. Acesso em: 27 mar. 2014.

KOUMI NGOH, S.; NJOMO, D. An overview of hydrogen gas production from solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 9, p. 6782–6792, 2012. Elsevier. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112004698>>. Acesso em: 21 mar. 2014.

- LACCHINI, C.; SANTOS, J. C. V. dos. Photovoltaic energy generation in Brazil – Cost analysis using coal-fired power plants as comparison. **Renewable Energy**, v. 52, p. 183–189, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148112006787>>. Acesso em: 5 abr. 2014.
- LAGUNA-BERCERO, M. A. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. **Journal of Power Sources**, v. 203, p. 4–16, 2012. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775311024384>>. Acesso em: 2 abr. 2014.
- LANGER, F. M. et. al. Techno-economic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term. **International Journal Of Hydrogen Energy**. 2007. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/223299689_Techno-economic_assessment_of_hydrogen_production_processes_for_the_hydrogen_economy_for_the_short_and_medium_term>. Acesso em: 2 abr. 2014.
- MARSHALL, A.; BØRRESEN, B.; HAGEN, G.; TSYPKIN, M.; TUNOLD, R. Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers—Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. **Energy**, v. 32, n. 4, p. 431–436, 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054420600199X>>. Acesso em: 21 mar. 2014.
- MAZLOOMI, S. K.; SULAIMAN, N. Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4257–4263, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112002353>>. Acesso em: 5 abr. 2014.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso: 11 ago. 2014.
- MITSCHER, M.; RÜTHER, R. Economic performance and policies for grid-connected residential solar photovoltaic systems in Brazil. **Energy Policy**, v. 49, p. 688–694, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421512005903>>. Acesso em: 19 mar. 2014.
- MOKWA, R. H.; TANAKA, J. G. P.; GONÇALVES, R. do R. **Estudo e análise experimental de um sistema de células a combustível**. 2007. 117 f. Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- NI, M.; LEUNG, M.; LEUNG, D. Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 9, p. 2337–2354, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319908002255>>. Acesso em: 1 abr. 2014.
- NREL Technical Report. **Survey of the Economics of Hydrogen Technologies**. NREL/TP-570-27079. set. 1999.
- NREL Technical Report. **Wind-To-Hydrogen Project: Electrolyzer Capital Cost Study**. NREL/TP-550-44103. dez. 2008.
- OZBILEN, A.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods. **Environmental Impact Assessment Review**. abr. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925513000371>>. Acesso em: 1 abr. 2014.

- PADILHA, J. C.; TRINDADE, L. G. DA; SOUZA, R. F. DE; MIGUEL, M. An evaluation of the potential of the use of wasted hydroelectric capacity to produce hydrogen to be used in fuel cells in order to decrease CO₂ emissions in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 19, p. 7898–7902, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319909011884>>. Acesso em: 10 jul. 2014.
- PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. da. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3786–3802, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112002079>>. Acesso em: 26 mar. 2014.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal Services Sciences**. 2008. Disponível em: <http://www.colorado.edu/geography/leyk/geog_5113/readings/saaty_2008.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2014.
- SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**, New York: McGraw Hill. 1980.
- SALOMON, V.A.P.; SHIMIZU T. Performance of three different methods of multiple criteria decision making applied to the supplier selection. **18th International Conference on MCDM**, Chania, Greece, June, 2006.
- SABESP: **Tarifas**. Disponível em: <<http://www.sabesp.com.br/>>. Acesso: 11 ago. 2014.
- SHEN, M.; BENNETT, N.; DING, Y.; SCOTT, K. A concise model for evaluating water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 22, p. 14335–14341, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910023712>>. Acesso em: 5 abr. 2014.
- SILVEIRA, J. L.; ZANZI, R. **Aspectos técnico e econômicos de processos eletrolíticos para produção de hidrogênio: O caso brasileiro**. Artigo em desenvolvimento. nov. 2013.
- TAPIA, L. C. F.. **Sustainability assessment of hydrogen production techniques in Brazil through multi-criteria analysis**. Department of Industrial Ecology, Royal Institute of Technology (KTH). 2013.
- TING, L. H. et al.. Techno-economic Analysis of Distributed Hydrogen Production from Natural Gas. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. abr. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1004954111602103>>. Acesso em: 20 mar. 2014.
- TURNER, J.; SVERDRUP, G.; MANN, M. K.; et al. Renewable hydrogen production. **International Journal of Energy Research**. February 2007, p. 379–407, 2008. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.1372/abstract>>. Acesso em: 20 mar. 2014.
- VAIDYA, O. S.; KUMARB, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**, v. 169, p, 1-29. fev. 2006. Disponível em: <<http://www.fcmmpep.org.br/disciplinas/turma1/MB-721/Aula03/AHP%20an%20overview%20of%20applications.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2014.
- YUMURTACI, Z.; BILGEN, E.. Hydrogen production from excess power in small hydroelectric installations. **International Journal Of Hydrogen Energy**, p. 687-693. ago. 2004. Disponível em: <http://bsesrv214.bse.vt.edu/Grisso/Ethiopia/Books_Resources/Hydroelectric/Hydrogen%20production%20from%20excess%20power%20in%20small%20hydroelctric.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2014.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307–326, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128509000598>>. Acesso em: 20 mar. 2014.

ZHANG, H.; LIN, G.; CHEN, J. Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 20, p. 10851–10858, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910014710>>. Acesso em: 27 mar. 2014.