

LUIGI VIOLA

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO A PARTIR
DE FONTES EÓLICA, SOLAR E HIDRELÉTRICA**

Luigi Viola

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO A PARTIR
DE FONTES EÓLICA, SOLAR E HIDRELÉTRICA**

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

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá

2015

V795e	Viola, Luigi Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica / Luigi Viola – Guaratinguetá : [s.n], 2014. 68 f. : il. Bibliografia : f. 60-68 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira 1. Hidrogênio 2. Eletrólise 3. Energia – fontes alternativas I. Título CDU 546.11
-------	---

Luigi Viola

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

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

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
UNESP-FEG



Prof. Dr. WENDELL DE QUEIROZ LAMAS
USP-EEL

Janeiro 2015

DADOS CURRICULARES

Luigi Viola

NASCIMENTO 12.10.1988 – JUNDIAÍ / SP

FILIAÇÃO Antônio José Viola
Neusa Maria Stocco

2010/2014 Curso de Graduação
Engenharia Elétrica – UNESP

de modo especial aos meus pais
e minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela graça da saúde cada dia de minha vida, e por sua sempre generosa providência. Agradeço também a todos que de algum modo contribuíram em minha vida,

aos meus pais Antonio José e Neusa Maria, por acreditarem em meu potencial e privarem-se de seus desejos pessoais em prol dos meus estudos.

ao meu irmão Gian Viola por sua paciência e companheirismo.

aos familiares, em especial as avós Laura e Dalcisa pelo imenso afeto.

a todos que dedicaram suas orações no momento de minha vida que mais precisei.

ao meu orientador, Prof. José Luz Silveira pelo incentivo à ciência e à pesquisa.

“Líderes que entregam resultados e valores”

Ricardo Voltolini

VIOLA, L. Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica. 2015. 68 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Inserir soluções técnica, econômica e ecologicamente competitivas no mercado de energia é um grande desafio para a sociedade. Este trabalho analisa cada um desses aspectos considerando a produção de hidrogênio eletrolítico com energia proveniente da geração eólica, solar e hidrelétrica, a fim de garantir uma visão global desse vetor energético. Inicialmente realiza-se uma avaliação dos aspectos técnicos abordando as tecnologias de eletrolisadores existentes, suas principais características e diferenças. A distribuição geográfica dos potenciais eólico, solar e hidrelétrico no Brasil também é mapeada, e um esquema da configuração de um sistema de produção de hidrogênio é comentado. Posteriormente, procede-se a análise econômica calculando-se o custo de investimento no eletrolisador alcalino de 60 Nm³/h, semelhante ao do projeto ônibus brasileiro movido a hidrogênio coordenado pela EMTU. Uma vez que o principal insumo da eletrólise é a eletricidade, analisam-se os leilões de energia mais recentes de cada fonte primária e calculam-se os custos de produção do hidrogênio eólico, solar e hidrelétrico. Posposto a isso, são investigados os impactos ambientais intrínsecos ao processo de geração de energia elétrica, propondo-se uma readequação de um indicador de eficiência ecológica para a produção de hidrogênio. Finalmente, o trabalho aborda o conceito de externalidades e exemplifica como a incorporação de custos externos pode alavancar a economia do hidrogênio. Em suma, ficou evidente que os hidrogênios eólico e hidrelétrico apresentaram-se mais promissores ante ao solar, seja no aspecto econômico, pois alcançaram custos menores, seja no aspecto ambiental, pois atingiram maiores eficiências ecológicas.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio. Eletrólise. Energia – fontes alternativas.

VIOLA, L. **Study of electrolytic hydrogen production from wind, solar and hydroelectric sources**. 2015. 68 f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Introduces technical, economic and environmentally competitive solutions in the energy market is a great challenge for society. This work examines each of these aspects considering the production of electrolytic hydrogen with energy from wind power, solar and hydropower, in order to ensure an overview of this energy carrier. Initially, an assessment of the technical aspects is made addressing existing electrolyzers technologies, its main characteristics and differences. The geographical distribution of wind, solar and hydroelectric potential in Brazil is also mapped, and a configuration scheme of a hydrogen production system is discussed. Subsequently, the economic analysis calculates the cost of investment in the alkaline electrolyser of 60 Nm³ / h, similar to the Brazilian bus powered by hydrogen project, coordinated by EMTU. Since the main input of electrolysis is electricity, is analyzed the latest energy auctions of each primary source and it is calculated the cost of production of the wind, solar and hydropower hydrogen. Postponed to this, are investigated the intrinsic environmental impacts of electricity generation process, proposing a readjustment of an indicator of ecological efficiency for the production of hydrogen. Finally, the work discusses the concept of externalities and demonstrates how the incorporation of external costs can leverage the hydrogen economy. In short, it is evident that the wind and hydroelectric hydrogens are more promising compared to solar hydrogen, whether in the economic aspect, because it achieved lower costs, whether in the environmental aspect, because it reached the highest ecological efficiency.

KEYWORDS: Hydrogen. Electrolysis. Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Circuito elétrico das resistências existentes na célula eletrolítica.....	19
Figura 2 – Etapas importantes a se considerar na ACV para a energia eólica.	21
Figura 3 – Processos utilizados na fabricação de painéis fotovoltaicos.....	22
Figura 4 – Principais processos a serem considerados na ACV para a energia hidrelétrica.	23
Figura 5 – Ilustração do funcionamento de um eletrolisador alcalino (a) e a foto de um eletrolisador de 6 Nm ³ /h da Nitidor (b).	25
Figura 6 – Esquema do funcionamento de um eletrolisador PEM (a) e de uma pilha de eletrólise de um modelo comercial (b).	26
Figura 7 – Esquema do funcionamento de um eletrolisador de óxido sólido (a) e foto de um protótipo de eletrolisador SOE (b).	27
Figura 8 – Diagrama esquemático da produção de hidrogênio eletrolítico.....	28
Figura 9 – Metodologia para determinação do investimento no eletrolisador.	33
Figura 10 – Custo de produção de hidrogênio eletrolítico renovável em US\$/kWh.....	37
Figura 11 – Comparativo do PAG de diversas formas de geração de eletricidade.	40
Figura 12 – Eficiência ecológica da produção de hidrogênio para o cenário I.	47
Figura 13 – Eficiência Ecológica da produção de hidrogênio para o cenário II.	49
Figura 14 – Curva de custos para uma externalidade negativa na produção.....	51
Figura 15 – Categorias de classificação do valor econômico dos recursos ambientais.	52
Figura 16 – Comparativo do custo da poluição urbana das tecnologias avaliadas.....	55
Figura 17 – Comparativo do custo social das tecnologias avaliadas.....	56
Figura 18 – Distribuição dos custos externos no setor automobilístico.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalo de capacidade diária de produção de hidrogênio.	20
Tabela 2 – Exemplo de classificação das externalidades.	24
Tabela 3 – Custos dos eletrolisadores segundo a equação (6).....	32
Tabela 4 – Leilões de energia solar realizados no Brasil.	35
Tabela 5 – Preço médio da energia negociada nos leilões para PCHs.	35
Tabela 6 – Preço médio da energia negociada nos leilões para a fonte eólica.	35
Tabela 7 – Principais contribuintes para os impactos ambientais das fontes eólica, solar e hidrelétrica.	38
Tabela 8 – Eficiência relativa das diversas tecnologias ante ao PAG do lignito.	41
Tabela 9 – PAG média para a produção de hidrogênio eletrolítico por diversas fontes.	42
Tabela 10 – Comparativo da eficiência ecológica entre diversas fontes de energia considerando a produção de hidrogênio eletrolítico.....	50
Tabela 11 – Custo unitário do dano por poluente para cada categoria de impacto.	53
Tabela 12 – Emissões de poluentes para fontes não-renováveis.	53
Tabela 13 – Emissões de poluentes para fontes renováveis.	54
Tabela 14 – Custo da parcela de dano ambiental considerando as diversas formas de geração de eletricidade.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CCEE- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
COVNM – Compostos Orgânicos Voláteis Não Metano
EMTU – Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos
EUA – Estados Unidos da América
GEE - Gases do Efeito Estufa
IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
ISO - International Organization for Standardization
LH₂ – Laboratório de Hidrogênio da Unicamp
MP – Material Particulado
PAG – Potencial de Aquecimento Global
PAG – Potencial de Aquecimento Global
PCH – Pequena Central Hidrelétrica
PEM – Próton Exchange Membrane
SOE – Solid Oxide Electrolyser
VERA – Valor Econômico do Recurso Ambiental

LISTA DE SÍMBOLOS

H^+	Íon hidrogênio	[-]
e^-	Elétron	[-]
H_2	Hidrogênio	[-]
OH^-	Íon hidróxido	[-]
O_2	Oxigênio	[-]
H_2O	Água	[-]
$E_{célula}$	Potencial elétrico da célula	[V]
V_r	Potencial reversível da célula	[V]
V_a	Sobretensão no anodo	[V]
V_c	Sobretensão no catodo	[V]
$R \cdot i$	Queda de tensão	[V]
ΔG	Variação da Energia Livre de Gibbs	[kJ/mol]
α	Número de elétrons	[-]
F	Constante de Faraday	[C/mol]
CIS	Cobre Índio Selênio	[-]
$CdTe$	Cádmio Telúrio	[-]
$NaOH$	Hidróxido de sódio	[-]
KOH	Hidróxido de potássio	[-]
C_{H_2}	Custo de produção de hidrogênio	[US\$/kWh]
C_{op}	Custo de operação	[US\$/kWh]
C_{man}	Custo de manutenção	[US\$/kWh]
Inv	Custo de investimento no eletrolisador	[US\$]
f	Fator de anuidade	[1/ano]
H	Período de operação do eletrolisador	[h/ano]
E_{H_2}	Potência suprida pelo combustível hidrogênio	[kW]
k	Período de amortização de capital (<i>payback</i>)	[anos]
r	Taxa de anual de juros	[%]
$\dot{m}_{H_2}$	Fluxo de massa de hidrogênio	[kg/s]
PCI	Poder calorífico inferior do hidrogênio	[kJ/kg]
$P_{Elet(req)}$	Potência elétrica requerida pelo eletrolisador	[kW]

C_{Elet}	Custo da eletricidade	[US\$/kWh]
$\dot{m}_{H_2O}$	Vazão de água requerida pelo eletrolisador	[m³/h]
C_{H_2O}	Custo da água	[US\$/m³]
$C_{eletrolisador}$	Custo do eletrolisador	[US\$]
$\dot{m}'_{H_2}$	Capacidade de produção do eletrolisador	[Nm³/h]
C_r	Custo de referência para uma grandeza S_r	[US\$]
S	Grandeza de interesse	[Nm³/h]
S_r	Grandeza de referência	[Nm³/h]
m	Fator de incidência que indica a escala de economia	[-]
ε	Eficiência ecológica	[-]
c	Constante a ser determinada (análise ambiental)	[-]
η	Eficiência do processo de produção de hidrogênio	[-]
π_g	Indicador de poluição	[kg/MJ]
n	Expoente a ser determinado (análise ambiental)	[-]
PAG	Potencial de aquecimento global	[kgCO _{2(eq)} /kgH ₂]
η_{elet}	Eficiência do eletrolisador	[-]
η_{fonte}	Eficiência de geração de energia elétrica	[-]
K	Constante a ser determinada (análise ambiental)	[-]
NO_x	Óxidos de nitrogênio	[-]
SO_2	Dióxido de enxofre	[-]
CO_2	Dióxido de carbono	[-]
CH_4	Metano	[-]
N_2O	Óxido nitroso	[-]
Pb	Chumbo	[-]
Hg	Mercúrio	[-]

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS	14
1 INTRODUÇÃO	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 ELETROLÍSE DA ÁGUA	17
2.2 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETROLÍSE	19
2.3 IMPACTO AMBIENTAL DA GERAÇÃO EÓLICA, SOLAR E HIDRELÉTRICA	20
2.4 O CONCEITO DE EXTERNALIDADE AMBIENTAL.....	23
3 ANÁLISE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO	25
3.1 TIPOS DE ELETROLISADORES	25
3.2 POTENCIAIS EÓLICO, SOLAR E HIDRELÉTRICO BRASILEIROS.....	27
3.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.....	28
4 ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO	30
4.1 METODOLOGIA.....	30
4.2 LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA.....	34
4.3 RESULTADOS OBTIDOS.....	36
5 ANÁLISE AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO	38
5.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	38
5.2 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (PAG)	39
5.3 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA.....	42
5.3.1 Cenário I.....	45
5.3.2 Cenário II	48
6 AVALIAÇÃO DAS EXTERNALIDADES	51

7 CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Devido à sua grande capacidade energética, à possibilidade de geração distribuída de energia e à necessidade de transição para uma matriz energética com fontes de baixa emissão de gases do efeito estufa, o hidrogênio como vetor energético tem despertado a atenção de pesquisadores, empresas e sociedade. Contudo, esse elemento não ocorre isoladamente na natureza em seu estado puro, associando-se a outros elementos como a água, os combustíveis fósseis e em todos os seres vivos.

Existem diversas tecnologias para a produção de hidrogênio. Algumas fazem uso de combustíveis fósseis – como é o caso da reforma a vapor de gás natural – outras, porém, fazem uso de fontes renováveis de energia. Dentre elas destaca-se a eletrólise que utiliza a energia proveniente do vento ou do sol, bem como a energia excedente de hidrelétricas, temas que se abordarão neste trabalho de graduação.

Segundo Fatsikostas, Kondarides e Verykios (2002), a viabilidade e a seleção do processo de produção de hidrogênio dependem de vários fatores, tais como: a escala de produção, localização e disponibilidade da matéria-prima na planta, além da utilização de forma imediata ou para armazenamento do hidrogênio. É necessário ressaltar que as análises técnicas e econômicas quase nunca consideram a questão ambiental dos processos. Desse modo, as tecnologias viáveis para o mercado atual são as que apresentam menores custos e maiores lucros, desconsiderando o impacto, negativo ou positivo, da variável ambiental. De fato, as tecnologias consideradas ambientalmente corretas são mais caras, porém, à medida que a consciência ecológica dissemina-se na sociedade, e essa indaga os atuais padrões, impulsionam-se tais tecnologias.

Dessa forma, a avaliação dos aspectos técnicos, econômicos e ambientais da produção de hidrogênio eletrolítico, permitirá uma visão global das potencialidades e das fragilidades dessa tecnologia, a fim de indicar as melhores alternativas no fomento à economia do hidrogênio, dando-a lugar de destaque no cenário energético mundial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os processos de produção de hidrogênio dividem-se em seis métodos principais: eletroquímico, termoquímico, fotoquímico, radioquímico, bioquímico e híbrido, sendo esse uma combinação entre alguns dos cinco métodos anteriores, por exemplo: eletro-fotoquímico, foto-bioquímico, eletro-termoquímico (DINCER; ZAMFIRESCU, 2012). Atualmente, utiliza-se o hidrogênio em larga escala no refino do petróleo, na produção de amônia e em menor medida no refino de metais como molibdênio, níquel, tungstênio, cobre, zinco e urânio. As principais rotas de produção são a reforma a vapor do gás natural (48%) (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012), a gaseificação do carvão e petróleo coque, bem como a gaseificação e reforma do óleo duro de petróleo (ZENG; ZHANG, 2009).

Mesmo sendo um processo conhecido há aproximadamente dois séculos, demonstrada por Faraday em 1820, (SØRENSEN, 2005), a eletrólise da água representa apenas 4% da produção mundial de hidrogênio. Suas principais vantagens são a alta pureza do hidrogênio obtido, simplicidade do processo, produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis de energia mitigando impactos ambientais, geração distribuída de energia incluindo localidades isoladas da rede de distribuição (ZENG; ZHANG, 2009). Hoje em dia, a eletrólise atende a determinados nichos de mercado que demandam pequenas taxas de produção de hidrogênio, tal como o setor militar, o espacial, o de laboratórios (GENEVIEVE SAUR, 2008), de aplicações médicas, de indústrias de eletrônicos e alimentícios (ZENG; ZHANG, 2009).

2.1 Eletrólise da água

A eletrólise da água é uma reação química desencadeada a partir de uma fonte externa de energia o que a torna não espontânea, ocorrendo a partir de reações parciais que se realizam nos eletrodos – o anodo e o catodo – na presença de um eletrólito que se entende como um condutor de energia (BROWN *et al.*, 2005) conforme mostram as equações (1), (2) e (3).

Catodo:



Anodo:



Global:



Da análise termodinâmica, observa-se que à temperatura e à pressão ambiente (298 K e 1 atm), a variação na entalpia e na energia livre de Gibbs para a água líquida são respectivamente, $\Delta H = -288 \text{ kJ/mol}$ e $\Delta G = 236 \text{ kJ/mol}$. Contudo, somente a energia livre de Gibbs é convertida em energia elétrica, fazendo com que o processo de eletrólise exija uma quantidade mínima de eletricidade de 236 kJ/mol (SØRENSEN, 2005).

Expressa-se o potencial da célula para a eletrólise da água pela equação (4) (SØRENSEN, 2005):

$$E_{célula} = V_r + V_a + V_c + R \cdot i \quad (4)$$

Onde:

$E_{célula}$ – potencial da célula [V];

V_r – potencial reversível da célula [V];

V_a – sobretensão no anodo [V];

V_c – sobretensão no catodo [V];

$R \cdot i$ – queda de tensão [V];

Entende-se por potencial reversível a tensão mínima necessária para dividir a molécula de água e encontra-se seu valor pela equação (5) (CARNIELETTO, 2011).

$$V_r = \frac{-\Delta G}{(\alpha F)} = 1,22 \text{ V} \quad (5)$$

Onde:

V_r – potencial reversível da célula [V];

α – número de elétrons = 2;

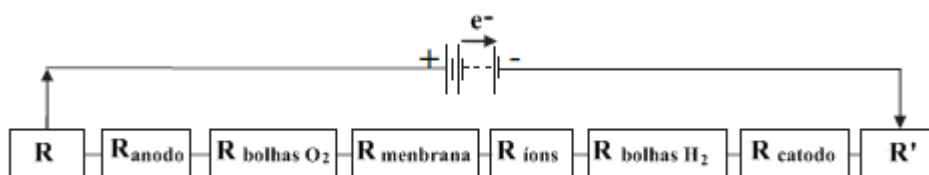
F – constante de Faraday = 96 493 [C/mol];

ΔG – variação da energia livre de Gibbs [kJ/mol];

As sobretensões nos eletrodos originam-se dos efeitos da polarização e se dividem em duas situações. A primeira ocorre quando do movimento do sistema eletroquímico, em que o fluxo contínuo do eletrólito provoca a interação dos íons com as moléculas em seu caminho. A segunda é pertinente a cada eletrodo e se relaciona com o efeito da dupla camada, que é o acúmulo de cargas de sinal oposto derivadas de íons do eletrólito, na superfície do eletrodo (SØRENSEN, 2005).

Finalmente, o termo $R \cdot i$ representa a queda de tensão na célula ocasionada pelo somatório das resistências dos vários elementos da célula eletrolítica que se opõem ao fluxo de elétrons, bem como a oposição ao fluxo de íons no eletrólito, a presença de bolhas de gases e a resistência da membrana, conforme mostrado no circuito da Figura 1.

Figura 1 – Circuito elétrico das resistências existentes na célula eletrolítica.



Fonte: (ZENG; ZHANG, 2009).

A resistência elétrica R corresponde aos condutores e conexões do circuito elétrico externo para o anodo. Já R' é o análogo para o catodo.

2.2 Produção de hidrogênio por eletrólise

Para a produção de hidrogênio eletrolítico, dois insumos são essenciais: a água e a eletricidade. Em razão de o custo da eletricidade afetar diretamente o custo de produção de hidrogênio, a utilização da demanda excedente e que não puder ser redistribuída – proveniente da geração eólica, solar e hidrelétrica – torna-se um nicho de aplicação de grande potencial,

pois se considera o custo da eletricidade como zero (SØRENSEN, 2005), já que a energia se dissiparia na rede.

A configuração do sistema de produção de hidrogênio depende basicamente da fonte de energia disponível e da capacidade desejada, a qual pode ser dividida em pequena, média e grande, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Intervalo de capacidade diária de produção de hidrogênio.

Classificação	Capacidade (Nm³/dia)
Pequena	≤ 1700
Média	1700 – 17.500
Grande	≥ 17.500

Fonte: (DINCER; ZAMFIRESCU, 2012).

Em geral, para pequenas taxas de produção, utilizam-se painéis solares ou turbinas eólicas individuais de média capacidade e eletrolisadores de membrana de troca protônica. No caso de médias e grandes capacidades, os arranjos mais eficientes são a combinação de um parque eólico ou uma hidrelétrica com um eletrolisador alcalino (DINCER; ZAMFIRESCU, 2012).

2.3 Impacto ambiental da geração eólica, solar e hidrelétrica

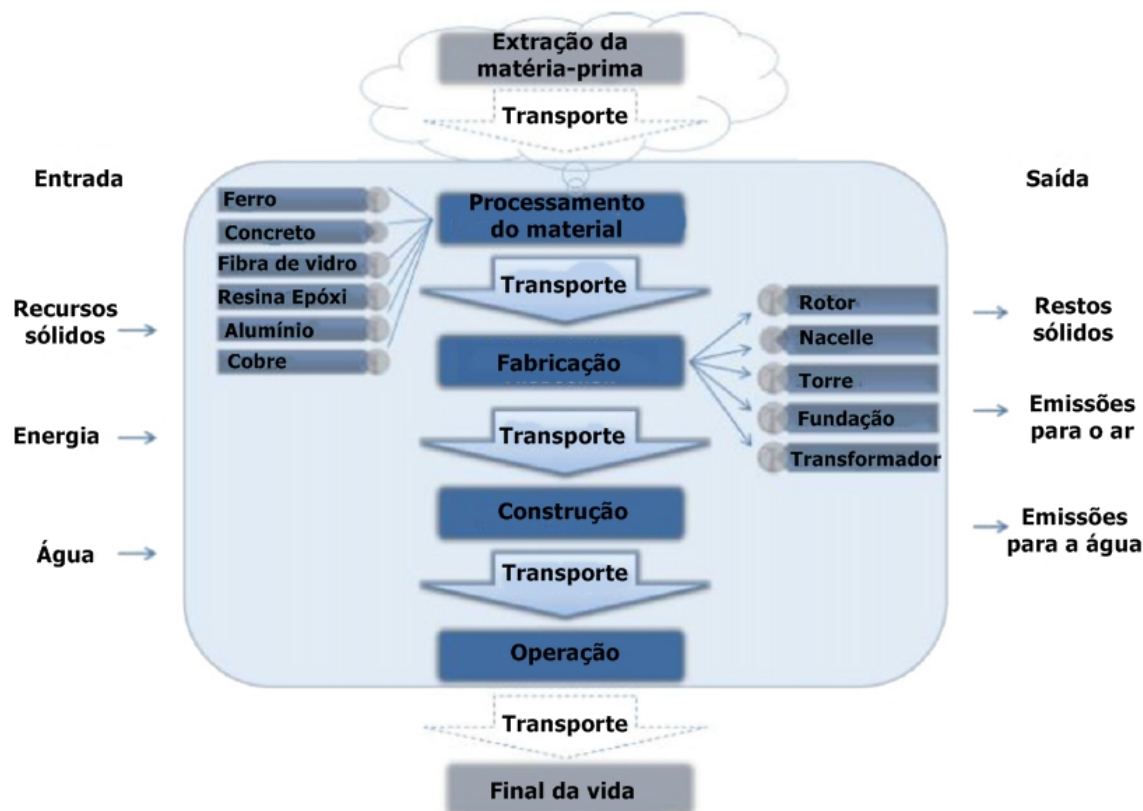
Decerto, a reconversão do hidrogênio em eletricidade a partir de uma célula combustível não acarreta danos ambientais, visto que os subprodutos são a água e o calor (BRAGA, 2010). Entretanto, para que o processo global seja sustentável, a fonte primária de eletricidade deve ser de origem renovável, posto que a utilização de combustíveis fósseis contribuiriam com emissões de poluentes em quantidades significativas (ZOULIAS et al., 2004).

Apesar do rótulo de renováveis para as fontes eólica, solar e hidrelétrica, existem impactos ambientais intrínsecos ao processo de geração de energia que devem ser considerados. A fim de quantificar esses danos, utiliza-se uma metodologia padronizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), denominada análise do ciclo de vida (ACV), sendo que as normas ISO 14040 e 14044 estabelecem os princípios gerais e as diretrizes para os estudos de ACV (DEMIR; TASKIN, 2013). Baseada no conceito “do berço ao túmulo”, a ACV investiga os impactos ambientais desde a extração de matérias-primas,

transporte de materiais, manufatura de equipamentos, até o descomissionamento, quando atingida a vida útil da tecnologia.

Apresenta-se um diagrama esquemático da ACV para um parque eólico na Figura 2.

Figura 2 – Etapas importantes a se considerar na ACV para a energia eólica.



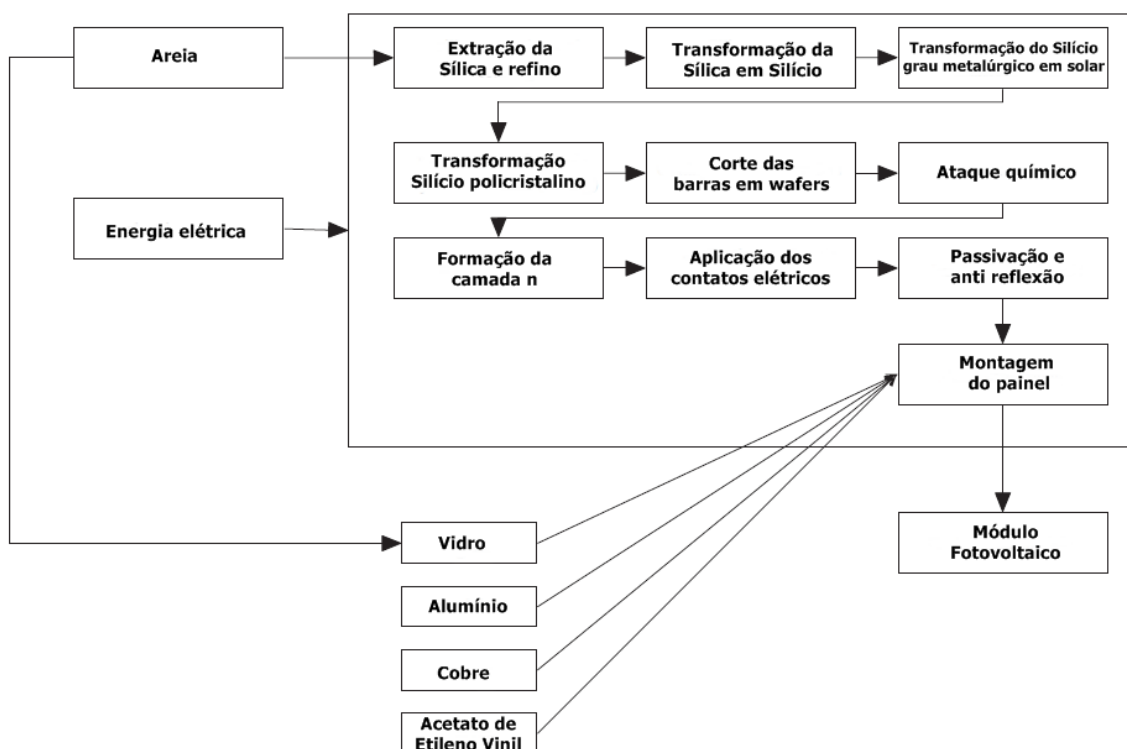
Fonte: (OEBELS; PACCA, 2012).

O grande retângulo em azul claro representa a fronteira do sistema, o qual engloba todo o parque eólico até a subestação que não está incluída no escopo do estudo, assim como a rede de distribuição. À esquerda representam-se os fluxos que adentram o sistema e à direita os que o deixam. Destacam-se as principais etapas do processo e também os principais materiais envolvidos. No caso particular do estudo de Oebels e Pacca (2012) a análise não incluiu o impacto ambiental, pois no Brasil não há nenhuma determinação quanto às medidas a se tomar no final da vida dos parques eólicos, restando aos autores estabelecerem suposições ou basearem-se em casos europeus.

No que concerne à energia solar, as principais emissões concentram-se na manufatura do painel fotovoltaico. O processo inicia-se com a extração do silício da areia (quartzo) seguido de etapas de purificação (eletro-intensivas), até obter-se o silício de grau solar. As etapas posteriores correspondem à manufatura das células solares culminando na montagem

do painel, as quais agregam ainda elementos externos ao processo principal como os cabos de energia, estruturas de apoio e banco de baterias (FTHENAKIS et al., 2011), conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Processos utilizados na fabricação de painéis fotovoltaicos.

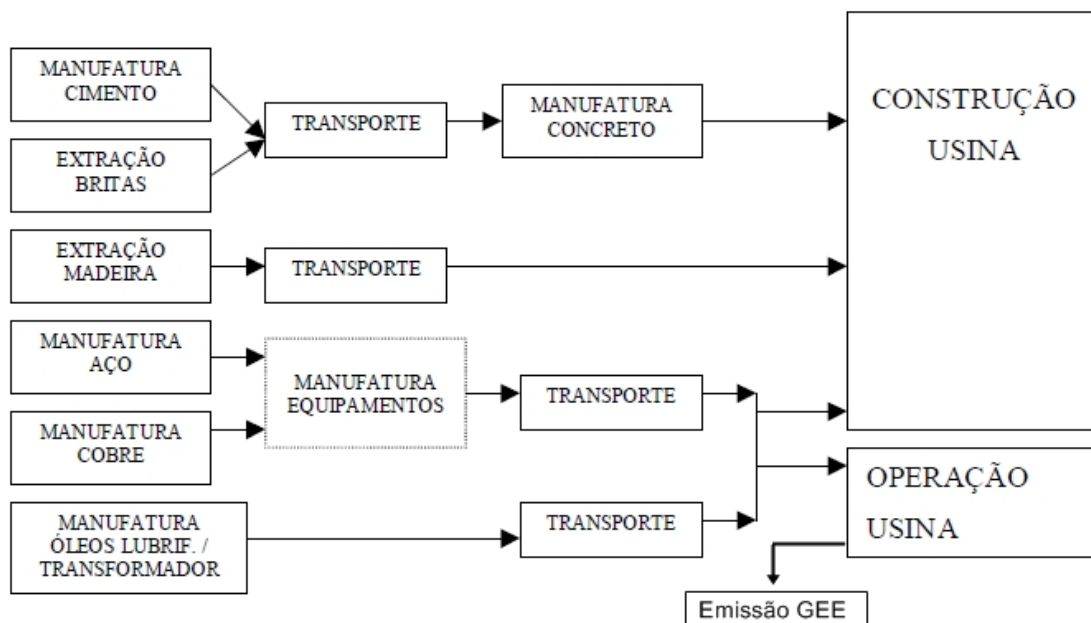


Fonte: (STOPPATO, 2006).

Finalmente, com relação à geração hidrelétrica destacam-se as emissões provenientes da construção civil da usina e barragem. O cimento e as britas são os materiais mais utilizados na construção das hidrelétricas. Eles estão presentes nas barragens, galerias, túneis, edificações auxiliares e de controle etc. Logo em seguida aparece o aço, empregado nas tubulações, geradores, transformadores, turbinas, além de reforçar as estruturas das obras civis. Os explosivos também merecem destaque dado que seu consumo é quase proporcional à quantidade de terra escavada (FLURY; FRISCHKNECHT, 2012).

A Figura 4 sumariza em um diagrama de blocos o estudo da ACV para a fonte hidrelétrica.

Figura 4 – Principais processos a serem considerados na ACV para a energia hidrelétrica.



Fonte: Adaptado de (RIBEIRO, 2003).

As emissões oriundas da decomposição da matéria orgânica das áreas alagadas para formação do reservatório também devem ser cuidadosamente analisadas. De fato, como são necessárias várias hipóteses simplificadoras para a quantificação das emissões (RIBEIRO, 2003), muitas vezes omite-se as mesmas. De acordo com Gagnon, Bélanger e Uchiyama (2002) consideram-se fatores como área do reservatório, clima do local, quantidade e tipo da biomassa alagada. Nas regiões boreais ou de montanha a quantidade de biomassa inundada pelo reservatório é pequena, cerca de 100 t/ha, enquanto que nas regiões tropicais é de 500 t/ha. No caso de pequenas centrais hidrelétricas e usinas a fio d'água, tais emissões não ocorrem ou se desprezam (VATTENFALL AB NORDIC GENERATIONS, 2005), uma vez que não interferem no fluxo do rio ou inundam áreas (RULE; WORTH; A BOYLE, 2009).

2.4 O conceito de externalidade ambiental

Toda forma de geração de energia acarreta impactos ambientais e sociais, que se entendem como custos impostos e não pagos pelos produtores ou consumidores de eletricidade, aos indivíduos ou sociedade. (BIEGLER, 2009). Os custos impostos são denominados externalidades e recebem diversas classificações conforme exemplifica a Tabela 2.

Tabela 2 – Exemplo de classificação das externalidades.

Classificação	Impacto
Interações	Entre produtor(es)
	Entre produtor(es) e consumidor(es)
	Entre consumidores
	Entre consumidor(es) e produtor(es)
Espaço	Efeitos localizados
	Impactos globais
Tempo	Curto período
	Longa duração

Fonte: (CARVALHO, 2005).

Da ACV resultam indicadores como o potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, depleção da camada de ozônio e eco toxicidade (JINQING; LU; YANG, 2012), os quais fornecem medidas quantitativas do dano ambiental. Porém, muitos outros danos são difíceis de mensurar e necessitam análises particularizadas.

No que tange a geração eólica cita-se o impacto direto na vida animal; como colisões de pássaros com as turbinas; e indireto, como por exemplo, a alteração de um habitat para instalação do parque eólico (SAIDUR et al., 2011).

A modificação do ecossistema local também está presente na geração solar fotovoltaica. Nesse caso, a dimensão da área coberta pelo parque solar e a topografia do terreno são fatores a se analisar. No caso das tecnologias de filmes finos *CIS* (Cobre Índio Selênio) e *CdTe* (Cádmio Telúrio), a presença de substâncias tóxicas acarreta um leve risco de contaminação ambiental caso um incêndio atinja os módulos (TSOUTSOS; FRANTZESKAKI; GEKAS, 2005).

No caso da geração hidrelétrica é notória a modificação do ambiente principalmente em grandes empreendimentos. Eventos como a mudança do curso do rio, desmatamento da área a se inundar, área de empréstimo de terra ou roca; para construção das barragens; despejo de resíduos da construção civil, impactam profundamente o bioma local (RIBEIRO, 2003).

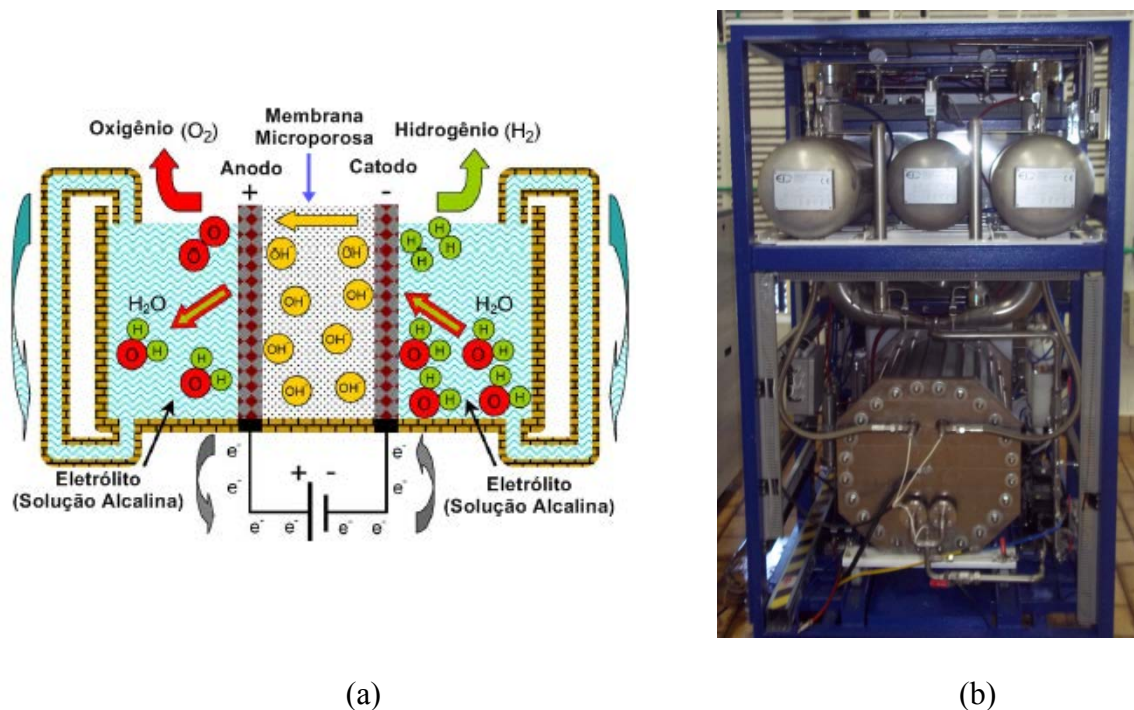
Considera-se a incorporação dos custos uma ferramenta racional de análise dos méritos de cada alternativa energética (BIEGLER, 2009) capaz de balizar as decisões políticas no sentido de subsidiar as tecnologias limpas e taxar as mais danosas, promovendo um mundo mais sustentável (BICKEL; FRIEDRICH, 2005).

3 ANÁLISE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO

3.1 Tipos de Eletrolisadores

Existem atualmente três tecnologias para eletrolisadores: de eletrólito alcalino, de membrana de troca protônica – *proton exchange membrane* (PEM) – e de membrana de óxido sólido – *solid oxide electrolyzer* (SOE). Os eletrolisadores alcalinos são os mais difundidos atualmente em razão de sua maior maturidade tecnológica (estado da arte). Compõem-se basicamente por dois eletrodos imersos em uma solução aquosa de KOH ou $NaOH$ (25% - 30%) e separados por uma membrana micro porosa permeável aos íons OH^- . Sua eficiência de operação varia de 47% - 82%, atingindo mais de 15 anos de vida útil e capacidade de produção de 1 a 500 Nm^3/h (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012). A Figura 5 mostra um esquema do princípio de funcionamento de um eletrolisador alcalino e a foto de um modelo comercial.

Figura 5 – Ilustração do funcionamento de um eletrolisador alcalino (a) e a foto de um eletrolisador de 6 Nm^3/h da Nitidor (b).

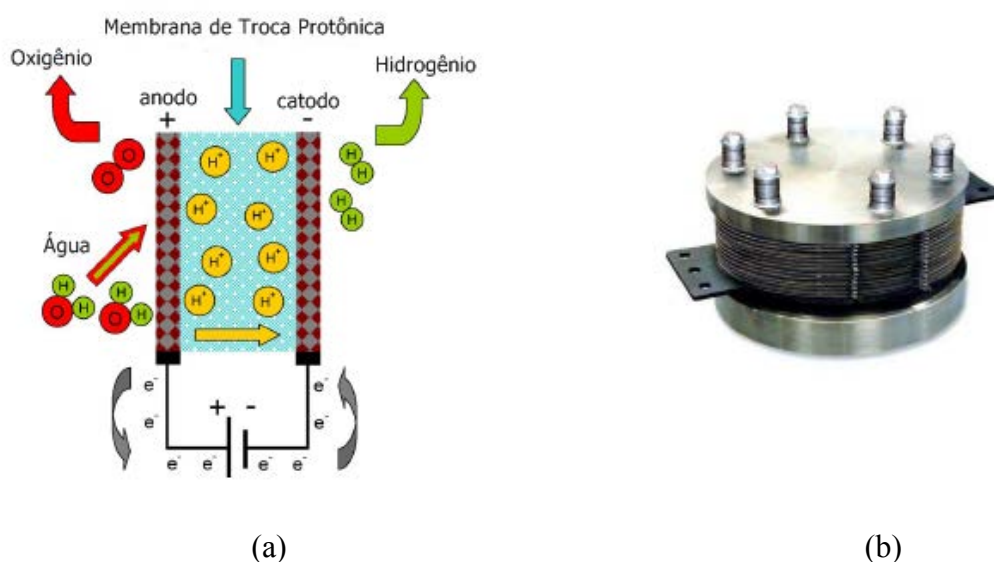


Fonte: (a) (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012). (b) Foto do autor¹.

¹Foto tirada em visita técnica realizada no Laboratório de Hidrogênio LH₂ – UNICAMP / Hytron .

Os eletrolisadores PEM surgiram para contornar algumas dificuldades que a solução alcalina possui como o aumento significativo na corrosão dos eletrodos em temperaturas acima de 100 °C (SØRENSEN, 2005). Nesse caso o eletrólito é uma estrutura polimérica capaz de transportar íons H^+ com alta condutividade. A Figura 6 mostra uma ilustração do funcionamento dessa tecnologia de eletrolisador e a pilha de eletrólise de um modelo comercial.

Figura 6 – Esquema do funcionamento de um eletrolisador PEM (a) e de uma pilha de eletrólise de um modelo comercial (b).



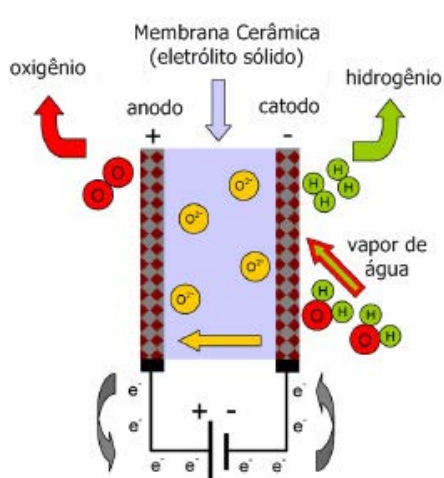
Fonte: (a) (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012). (b) (HIDROGENICS, 2014a).

São pouco sensíveis aos efeitos das flutuações no fornecimento de energia, ao contrário dos alcalinos que tem sua eficiência comprometida por possuir uma grande inércia no transporte dos íons (GAZEY; SALMAN; AKLIL-D'HALLUIN, 2006). Também se destacam pela pureza do hidrogênio produzido da ordem de 99,99%, e em alguns casos atingindo 99,999%, sem a necessidade de um equipamento auxiliar, contrastando com os 99,9% do modelo alcalino (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012). Contudo, ainda estão em fase de desenvolvimento, possuindo capacidade de produção de 0,29 a 30 Nm³/h (PROTON ON SITE, 2014, H-TEC, 2014), baixa vida útil e alto custo (SEQUEIRA; MATTOS, 2010).

Finalmente, os eletrolisadores SOE abordam o conceito de eletrólise em altas temperaturas (600 °C a 900 °C), possibilitando eficiências maiores que os modelos alcalinos e PEM, uma vez que a energia elétrica requerida diminui significativamente. Entretanto, esse

processo esbarra na dificuldade de se encontrar materiais estáveis termicamente, impermeáveis e que possam operar por um longo prazo. Atualmente os eletrolisadores SOE encontram-se em fase de pesquisa e desenvolvimento em países como Japão, Alemanha, Estados Unidos e China (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012). A Figura 7 mostra o esquema do processo e um protótipo desenvolvido pelo Idaho National Laboratory em parceria com a empresa Ceramatec.

Figura 7 – Esquema do funcionamento de um eletrolisador de óxido sólido (a) e foto de um protótipo de eletrolisador SOE (b).



(a)



(b)

Fonte: (a) (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012). (b) (DOE, 2014).

3.2 Potenciais Eólico, Solar e Hidrelétrico brasileiros

Indubitavelmente, o Brasil é um país de enorme potencial de geração de energia renovável. Aqui a presença de ventos é duas vezes superior à média mundial e sua velocidade oscila apenas 5%, garantindo previsibilidade na estimativa da produção de energia (ANEEL, 2008). O potencial disponível brasileiro é da ordem de 143 GW (AMARANTE et al, 2001), sendo que as regiões Nordeste e Sul concentram os principais parques eólicos.

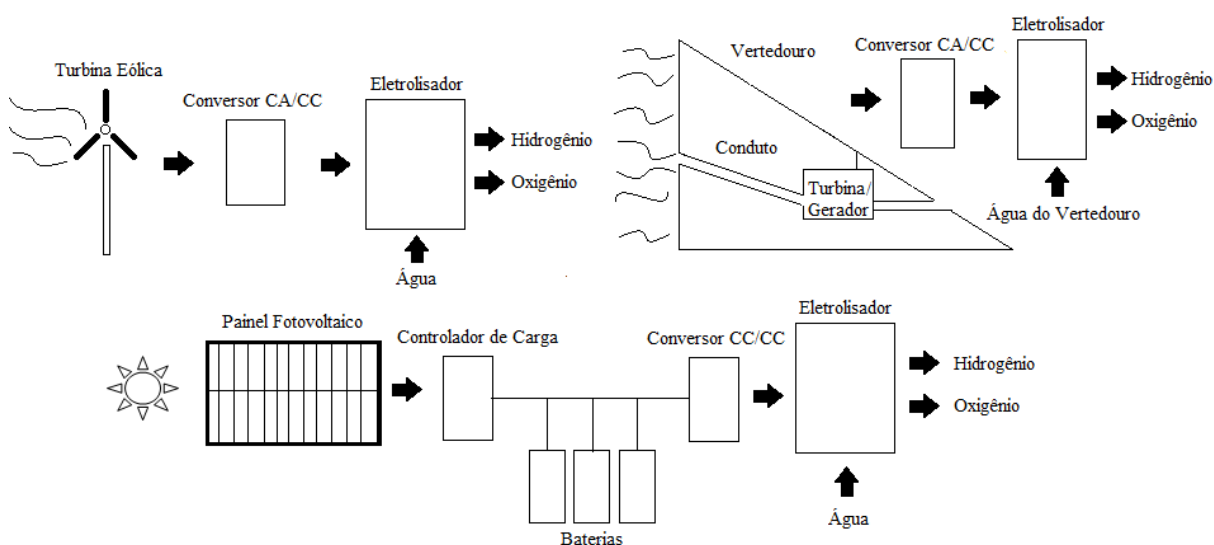
No que concerne à energia solar fotovoltaica, a parte central da região Nordeste apresenta o maior índice de radiação solar, sendo que algumas áreas apresentam níveis comparáveis às melhores regiões do mundo. De modo geral, a radiação solar diária, média mensal, para o país varia entre 8-22 MJ/m².dia, com ápice nos meses de outubro, novembro e dezembro (TIBA, 2011).

A geração hidrelétrica é majoritária na matriz elétrica brasileira, respondendo por 64,9% da oferta interna de eletricidade (EPE, 2014). Considerando-se as grandes centrais hidrelétricas, a principal rota de produção de hidrogênio consiste no aproveitamento da energia vertida turbinável. A título de exemplo, a quantidade total de energia vertida nas hidrelétricas brasileiras em 2008 foi de 106,2 TWh, correspondendo a 24 % de toda a energia elétrica gerada, ou ainda 30% da energia hidrelétrica produzida no país, que produziria cerca de $3,22 \times 10^6$ toneladas de hidrogênio (PADILHA et al., 2009).

3.3 Configuração do sistema de produção de hidrogênio

De maneira geral o processo de produção de hidrogênio com energia proveniente de fontes renováveis se resume em três etapas: a obtenção da energia elétrica, a adequação e compatibilização da eletricidade a ser fornecida ao eletrolisador e a produção propriamente dita. O diagrama de blocos da Figura 8 ilustra cada etapa para as três fontes.

Figura 8 – Diagrama esquemático da produção de hidrogênio eletrolítico.



Fonte: Elaboração própria.

No caso das fontes eólica e hidrelétrica os geradores disponibilizam tensão e corrente alternada que é retificada por meio de um conversor CA/CC, visto que o eletrolisador opera em corrente contínua a fim de evitar a alternância da produção de hidrogênio nos eletrodos a cada mudança de sinal da onda de corrente. A particularidade da fonte solar está na natureza

contínua da tensão e da corrente disponibilizada pelos semicondutores que compõem as células do painel.

É possível observar na Figura 8, que a etapa 2 para o caso solar é bem mais complexa se comparada às outras fontes. O controlador de carga coordena o carregamento e o descarregamento do banco de baterias, que por sua vez armazena a energia excedente. O conversor CC/CC por sua vez compatibiliza a tensão de saída do sistema fotovoltaico com a do eletrolisador. A simplificação do sistema de eletrólise removendo os controladores de carga, baterias de armazenamento, e conversores CC/CC, reduz o custo, bem como a resistência elétrica do sistema. Para Gibson e Kelly (2009), é necessário que a tensão e a corrente no ponto de máxima potência do painel sejam as mais próximas possíveis das condições de operação do eletrolisador, o que se obtém conectando um número correto de módulos fotovoltaicos em série, particularizando o sistema solar para a produção de hidrogênio.

4 ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO

4.1 Metodologia

Com o intuito de obter o custo do hidrogênio eletrolítico utilizou-se a metodologia desenvolvida por Silveira (1998), considerando uma capacidade de produção de 60 Nm³/h, a mesma do projeto brasileiro do ônibus a hidrogênio. A equação (6) sintetiza a metodologia.

$$C_{H_2} = \frac{Inv \cdot f}{H \cdot E_{H_2}} + C_{op} + C_{man} \quad (6)$$

Onde:

C_{H_2} – custo de produção de hidrogênio [US\$/kWh];

Inv – valor do investimento no eletrolisador [US\$];

f – fator de anuidade [1/ano];

H – período de operação do eletrolisador [h/ano];

E_{H_2} – potência suprida pelo combustível hidrogênio [kW];

C_{op} – custo de operação [US\$/kWh];

C_{man} – custo de manutenção [US\$/kWh];

Calcula-se o fator de anuidade a partir das equações (7) e (8).

$$f = \frac{q^k \cdot (q - 1)}{q^k - 1} \quad (7)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (8)$$

Onde:

r – taxa anual de juros [%];

k – período de amortização de capital (*payback*) [anos];

Calcula-se a potência suprida pelo combustível hidrogênio conforme a equação (9).

$$E_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot PCI \quad (9)$$

Onde:

$\dot{m}_{H_2}$ – fluxo de massa do hidrogênio [kg/s];

PCI – poder calorífico inferior do hidrogênio [119 950 kJ/kg];

Calcula-se o custo de operação pela equação (10).

$$C_{op} = \frac{P_{Elet(req)} \cdot C_{Elet}}{E_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot C_{H_2O}}{E_{H_2}} \quad (10)$$

Onde:

$P_{Elet(req)}$ – potência elétrica requerida pelo eletrolisador [kW];

C_{Elet} – custo da eletricidade [US\$/kWh];

$\dot{m}_{H_2O}$ – vazão de água requerida pelo eletrolisador [m³/h];

C_{H_2O} – custo da água [US\$/m³];

De acordo com Genevieve Saur (2008), a equação (11) garante uma boa estimativa dos custos de um eletrolisador, em mil dólares, para uma faixa de produção de hidrogênio de 0,1 kg/h a 100 kg/h.

$$C_{eletrolisador} = 224,49 \cdot (\dot{m}'_{H_2})^{0,6156} \quad (11)$$

Onde:

$C_{eletrolisador}$ – custo do eletrolisador [US\$];

$\dot{m}'_{H_2}$ – capacidade de produção do eletrolisador [Nm³/h];

Utilizou-se a equação (11) para determinar os preços dos eletrolisadores de 1 Nm³/h e 100 Nm³/h com o intuito de aplicar a técnica de Boehm (1987) para obter indiretamente o custo final de investimento de um eletrolisador de 60 Nm³/h. Apresentam-se os resultados parciais na Tabela 3.

Tabela 3 – Custos dos eletrolisadores segundo a equação (6).

	1 Nm³/h	100 Nm³/h
Custo inicial (US\$)	50.633,91	862.266,45
Custo inicial (US\$/kWh)	8.582,02	1.724,53

Fonte: Elaboração própria.

O custo por kWh é bastante grande para o eletrolisador de 1 Nm³/h. Isso se deve tanto pelo fato de a produção ser pequena, tanto pelo próprio método proposto por Genevieve Saur (2008), o qual ressalta que para pequenas capacidades o custo se aproxima de eletrolisadores PEM, enquanto que para médias e grandes capacidades o custo é próximo aos modelos alcalinos.

A técnica de Boehm (1987) retorna o investimento no eletrolisador a partir da solução da equação (12), desenvolvida pelo autor para refinar a estimativa no cálculo do investimento em equipamentos de sistemas térmicos.

$$Inv = C_r \cdot \left(\frac{S}{S_r}\right)^m \quad (12)$$

Onde:

Inv – investimento no eletrolisador [US\$];

C_r – custo do equipamento para uma grandeza de referência *S_r* [US\$];

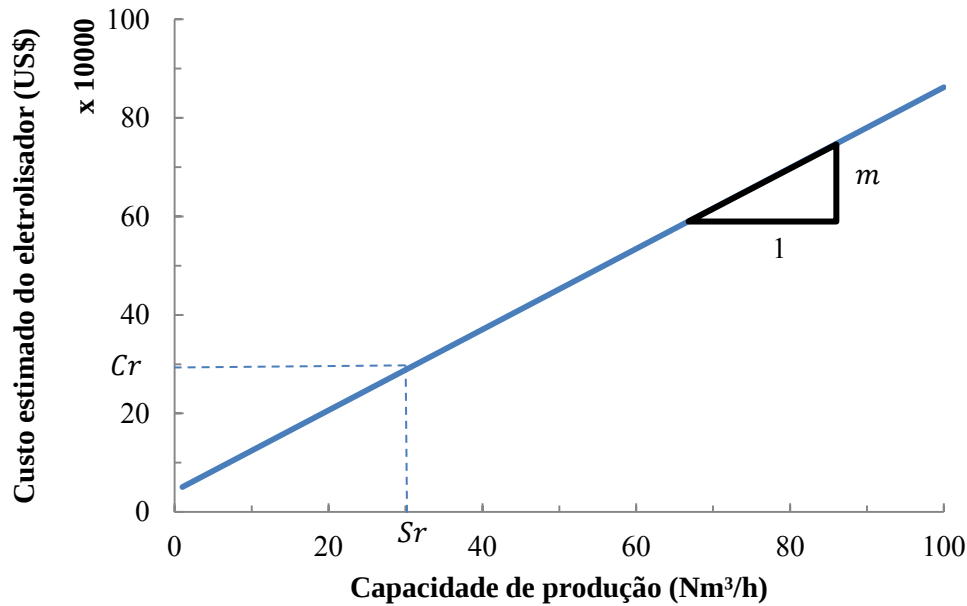
S – grandeza de interesse [60 Nm³/h];

S_r – grandeza de referência [Nm³/h];

m – fator de incidência que indica a escala de economia [0,5 – 1,0];

Apresenta-se a curva do custo inicial na Figura 9 e determina-se o valor de “*m*” usando semelhança de triângulos.

Figura 9 – Metodologia para determinação do investimento no eletrolisador.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Boehm (1987) considera-se um triângulo hipotético com um cateto adjacente unitário e outro formado por quaisquer outros dois pontos da curva. Vale ressaltar que para o cálculo “ m ” considera-se ambos os eixos na mesma ordem de grandeza e que “ m ” deve estar no intervalo $[0,5-1,0]$ (BOEHM, 1987). Realizam-se sucessivas tentativas até a obtenção do valor 0,8198. Com o auxílio do gráfico da Figura 9 determinam-se C_r e S_r respectivamente como 28 e 30, resultando na equação (13).

$$Inv = 28 \cdot \left(\frac{S}{30}\right)^{0,8198} \quad (13)$$

Desse modo, o investimento para um eletrolisador de 60 Nm³/h com valores corrigidos de acordo com a inflação americana para setembro de 2014 é de US\$ 546.900,29².

O eletrolisador HySTAT 60-10 da Hydrogenics, o mesmo do projeto do ônibus a hidrogênio brasileiro, consome 312 kW de potência, valor que será adotado para o parâmetro $P_{Elet(req)}$ (HYDROGENICS, 2014b). Também segundo Hydrogenics (2014b), o fornecimento de água necessário para abastecer o eletrolisador varia de 1,5-2,0 l para cada 1,0 Nm³ de

² Calculadora para correção disponível em: <<http://www.usinflationcalculator.com/>>

hidrogênio produzido. Adotando-se o valor médio, $1,75 \text{ l/Nm}^3\text{H}_2$, obtém-se um consumo de água de $0,105 \text{ m}^3/\text{h}$.

De acordo com o consórcio do projeto ônibus brasileiro movido a hidrogênio ([2009]), a água oriunda do sistema público de abastecimento apresentou excelente qualidade para o abastecimento do eletrolisador, e dessa forma o custo da água utilizada será o praticado pela SABESP, que é a principal companhia de abastecimento do estado. Para uma instalação industrial na região metropolitana de São Paulo que consome acima de $50 \text{ m}^3/\text{mês}$, o valor da tarifa é $13,12 \text{ R\$/m}^3$ (SABESP, 2014).

Por fim, para calcular o custo de produção de hidrogênio, assume-se que o custo de manutenção representa 3% do primeiro termo da equação (6) (SILVEIRA, 1998), conforme apresentado na equação (14).

$$C_{man} = 0,03 \cdot \frac{Inv \cdot f}{H \cdot E_{H_2}} \quad (14)$$

4.2 Leilões de energia elétrica

Com o intuito de estabelecer comparações entre as fontes eólica, solar e hidráulica, adotaram-se os preços da energia elétrica estabelecidos pelos leilões de acordo com os resultados consolidados publicados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Desde Junho de 2013 a CCEE publica mensalmente a série histórica dos leilões das diversas fontes realizados a partir de 2004, corrigindo mês a mês o preço de venda pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). Esse documento também fornece detalhes dos leilões como, por exemplo, quem foram os compradores, os vendedores, localização do empreendimento, garantia física, quantidade contratada etc.

Na atual matriz energética brasileira a geração solar fotovoltaica ainda é incipiente e apenas muito recentemente adentrou aos leilões, a partir de uma iniciativa do governo de Pernambuco, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Leilões de energia solar realizados no Brasil.

SOLAR				
Leilão	Realizado	Operação	Valor Médio (R\$/MWh)	Valor Médio Atualizado (R\$/MWh)
1º Leilão Pernambuco ¹	dez/13	jun/15	228,63	237,81
6º LER ²	31/10/2014	01/10/2017	215,53	216,63

Fonte: (G1, 2014)¹. (CCCE, 2014)².

Legenda: LER: Leilão de Energia de Reserva.

A Tabela 5 apresenta o levantamento de alguns leilões para a geração de energia proveniente de pequena central hidrelétrica (PCH) e a Tabela 6 para a geração eólica. Diferentemente da geração solar, observa-se que essas tecnologias estão muito mais presentes nos leilões da CCEE.

Tabela 5 – Preço médio da energia negociada nos leilões para PCHs.

PCH				
Leilão	Realizado	Operação	Valor Médio (R\$/MWh)	Valor Médio Atualizado (R\$/MWh)
2º LEN	29/06/2006	01/01/2009	124,99	192,20
1º LFA	18/06/2007	01/01/2010	134,99	200,19
8º LEN	27/08/2009	01/01/2012	144,00	191,38
10º LEN	30/07/2010	01/01/2015	154,11	195,62
2º LFA	26/08/2010	01/01/2013	146,47	186,30
3º LER	26/08/2010	01/09/2013	131,59	167,38
16º LEN	29/08/2013	01/01/2018	127,15	135,09
18º LEN	13/12/2013	01/05/2018	137,30	142,46

Fonte: (CCCE, 2014).

Legenda: LFA: Leilão de Fontes Alternativas. LER: Leilão de Energia de Reserva. LEN: Leilão de Energia Nova.

Tabela 6 – Preço médio da energia negociada nos leilões para a fonte eólica.

EÓLICA				
Leilão	Realizado	Operação	Valor Médio (R\$/MWh)	Valor Médio Atualizado (R\$/MWh)
2º LER	14/12/2009	01/07/2012	148,33	194,59
2º LFA	26/08/2010	01/01/2013	134,46	171,02
3º LER	26/08/2010	01/09/2013	122,87	156,29

Leilão	Realizado	Operação	Valor Médio (R\$/MWh)	Valor Médio Atualizado (R\$/MWh)
12° LEN	17/08/2011	01/03/2014	99,38	117,89
4° LER	18/08/2011	01/07/2014	99,58	118,13
13° LEN	20/12/2011	01/01/2016	105,53	122,73
15° LEN	14/12/2012	01/01/2017	87,98	96,68
5° LER	23/08/2013	01/09/2015	110,42	117,31
17° LEN	18/11/2013	01/01/2016	124,45	125,13
18° LEN	13/12/2013	01/05/2018	119,08	123,56
19° LEN	06/06/2014	01/01/2017	130,05	130,06

Fonte: (CCCE, 2014).

Legenda: LFA: Leilão de Fontes Alternativas. LER: Leilão de Energia de Reserva. LEN: Leilão de Energia Nova.

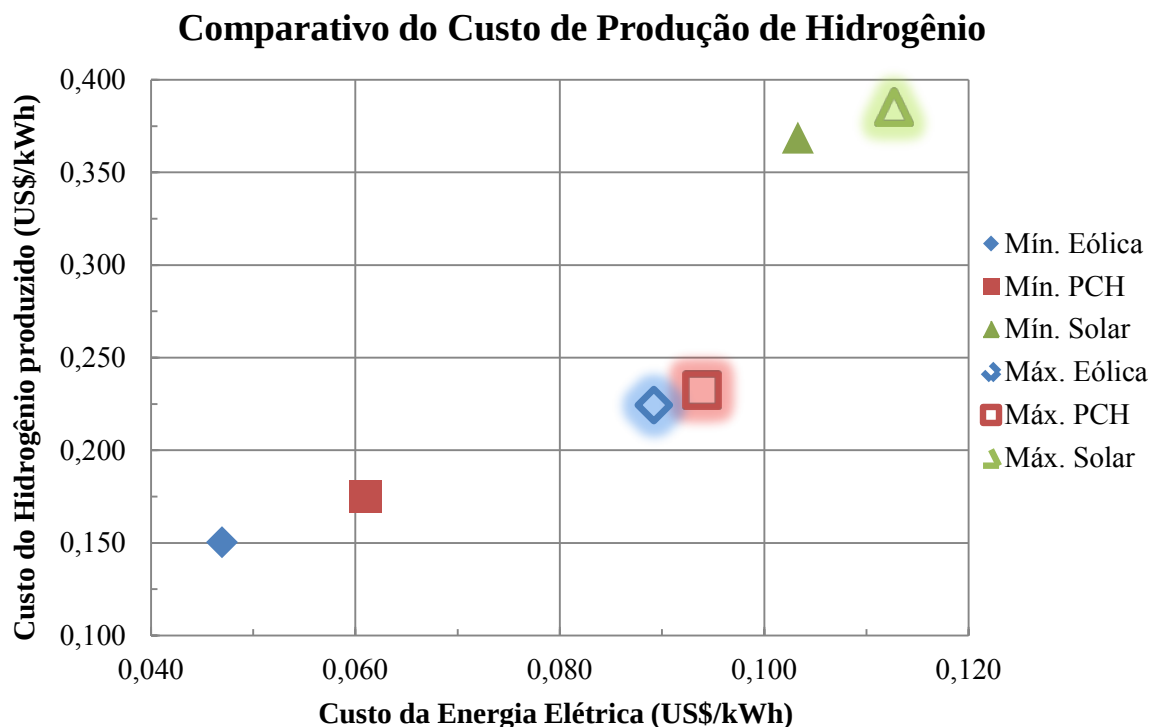
Observa-se que a média dos valores médios atualizados para a geração eólica é a menor dentre as três tecnologias, seguida pela PCH e pela geração solar.

4.3 Resultados obtidos

Calculou-se o custo de produção de hidrogênio em US\$/kWh com o objetivo de internacionalizar o estudo. Devido à volatilidade da cotação do dólar no Brasil, principalmente no ano de 2014, optou-se por realizar um levantamento da série histórica desde 02/01/2012 até 31/10/2014³, para realizar a conversão da moeda. Desse modo o valor adotado foi de R\$ 2,13 para cada dólar americano. O gráfico da Figura 10 apresenta o comparativo do custo de produção de hidrogênio eletrolítico produzido em relação ao custo da energia proveniente de fontes eólica, solar e PCH. Em uma primeira análise considerou-se que o eletrolisador opera 20 h/dia (7300 h/ano) para os casos eólico e PCH, e 7 h/dia (2555 h/ano) para o caso solar. De acordo com Ursúa, Gandía e Sanchis (2012) o fator de capacidade do eletrolisador é praticamente de 100%. Desse modo, vários estudos adotam períodos de produção de hidrogênio elevados, mesmo para fontes intermitentes, como em Genevieve Saur (2008). O caso solar é uma exceção, uma vez que a radiação solar não está disponível o dia todo e o valor de 7 h/dia é o valor típico para a região Nordeste do Brasil (TIBA, 2014). Adotou-se nessa análise, um *payback* de 8 anos e taxa anual de juros de 4% supondo incentivos e subsídios governamentais.

³ Série histórica disponível em: < <https://www3.bcb.gov.br/sgspub/pefi300/telaCdoSelecao.paint> >

Figura 10 – Custo de produção de hidrogênio eletrolítico renovável em US\$/kWh.



Fonte: Elaboração própria.

Da análise do gráfico observa-se que os hidrogênios eólico e de PCH apresentam custos muito próximos. Quando comparados os preços máximos médios dos leilões de energia para essas fontes, obtém-se 0,233 US\$/ kWh para o hidrogênio de PCH e 0,224 US\$/kWh para o eólico. Com relação aos preços mínimos médios essa diferença aumenta um pouco, obtendo-se 0,175 US\$/kWh e 0,150 US\$/kWh para as formas de PCH e eólica, respectivamente. No que concerne o hidrogênio solar, é nítido um maior distanciamento em relação às outras tecnologias, atingindo-se um custo de até 0,385 US\$/kWh.

Realizaram-se diversas outras análises para elaboração deste trabalho no propósito de entender quais os pontos críticos do processo. Analisaram-se, por exemplo, a variação do *payback*, da taxa de juros, do período de operação. De um modo geral, maiores *paybacks* e maiores períodos de operação reduzem os custos de produção de hidrogênio. Em contrapartida, maiores taxas de juros, representam custos maiores. Porém, indubitavelmente, o custo da eletricidade e o período de operação do eletrolisador são os fatores mais impactantes no custo de produção de hidrogênio.

5 ANÁLISE AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO

5.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Efetuuou-se o estudo da literatura disponível referente a ACV, de modo a identificar as etapas e processos de maior impacto para cada forma de geração de eletricidade, os quais se resumem na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais contribuintes para os impactos ambientais das fontes eólica, solar e hidrelétrica.

Fonte	Processo/Etapa	Contribuintes	Contribuição
Eólica	Fundação	Concreto / Metal	(34-51%) ¹
	Torre	Aço	(17-26%) ¹
Solar	Silício eletrônico	Eletro-intensivo	(76,5%) ²
	Montagem painel	Alumínio / Vidro	(9,7%) ²
Hidrelétrica	Reservatório	Metano	(69,2%) ³
	Construção	Concreto / Metal	(30,8%) ³

Fonte: ¹(DEMIR; TASKIN, 2013). ²(BATTISTI; CORRADO, 2013). ³(RIBEIRO, 2003).

No que diz respeito à energia eólica a fundação é a etapa mais impactante dada a grande quantidade de concreto e metal utilizados na fabricação da estrutura de suporte. Dentre os componentes do sistema de geração de energia, a torre apresenta-se como o mais crítico, uma vez que seu impacto está intrinsecamente relacionado com a grande quantidade de aço utilizado. Citam-se ainda as emissões associadas à fabricação das pás e do rotor. No caso das pás, elas ocorrem devido à utilização da fibra de vidro, já no rotor devido à obtenção do aço. Outros impactos ambientais são principalmente causados pela caixa de transmissão, o eixo principal (que une a caixa de transmissão à estrutura de acionamento das pás) e em menor medida, pelo gerador, todos constituintes da nacelle, dado o intenso uso de metais de processamento refinado (PEREG; LA HOZ, 2003).

Para o caso solar, o processo começa com a extração do silício da areia (quartzo) seguida de etapas de purificação (eletro-intensivas), até se obter o silício de grau eletrônico. As etapas posteriores correspondem à manufatura das células solares, culminando na montagem do painel, a qual agregam ainda elementos externos ao processo principal como os

cabos de energia, estruturas de apoio e banco de baterias (FTHENAKIS et al., 2011). Observar-se que a transformação do silício até o grau adequado para aplicação nos painéis é a etapa de maior gasto de energia, seguida pela montagem dos módulos, a qual inclui a laminação do alumínio, o vidro de proteção, que são processos eletro-intensivos. No que tange as emissões, é possível notar que elas seguem a proporção do gasto energético, revelando uma relação intrínseca entre consumo energético e emissões (BATTISTI; CORRADO, 2013).

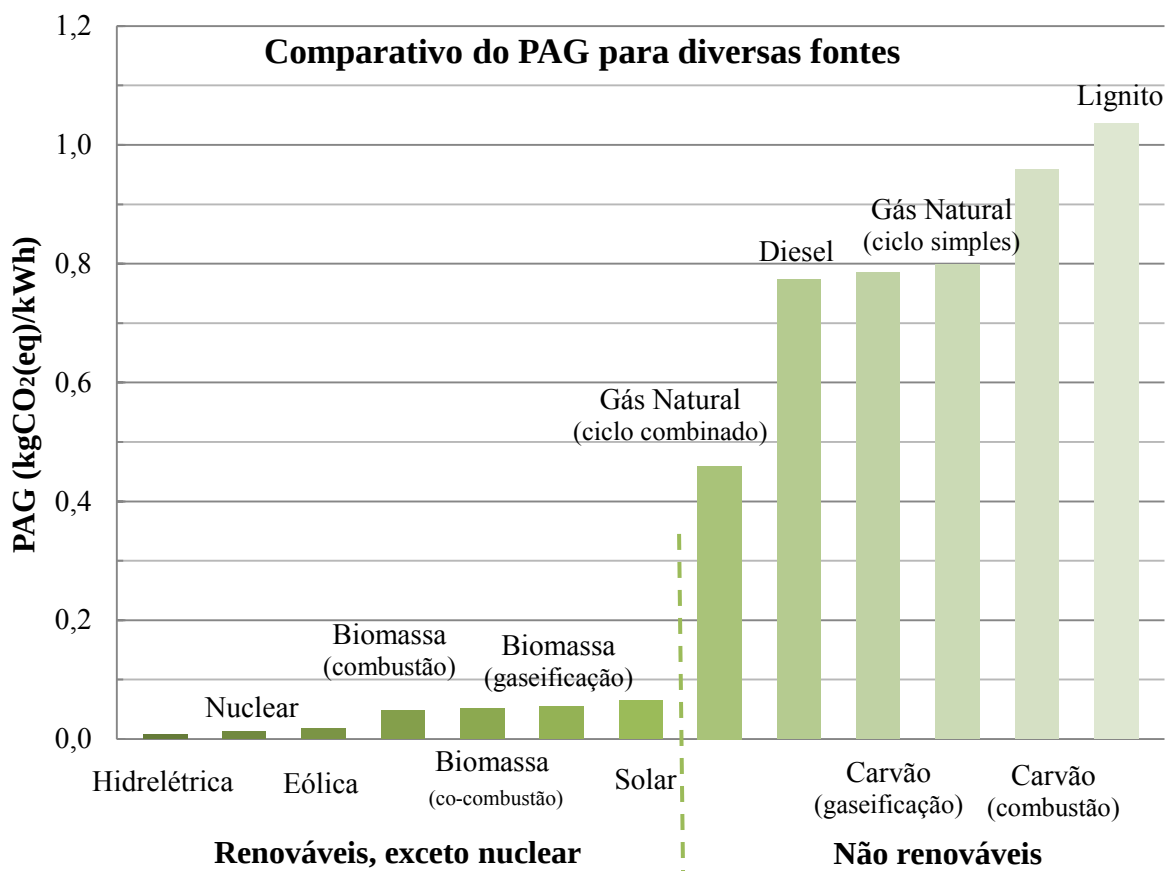
Finalmente, os estudos da ACV para a geração hidrelétrica foram bastante oportunos, uma vez que o aproveitamento do potencial hidráulico para geração de energia é a alternativa renovável mais difundida no Brasil. O cimento e as britas são os materiais mais utilizados na construção das hidrelétricas. Eles estão presentes nas barragens, galerias, túneis, edificações auxiliares e de controle etc. Logo em seguida aparece o aço, empregado nas tubulações, geradores, transformadores, turbinas, além de reforçar as estruturas das obras civis. Apesar de não constar no modelo simplificado acima, os explosivos também merecem destaque uma vez que seu consumo é quase proporcional à quantidade de terra escavada (FLURY; FRISCHKNECHT, 2012).

É muito importante ressaltar que na ACV muitas vezes não se contabilizam as emissões provenientes do reservatório da usina, uma vez que a decomposição da biomassa depende de fatores como a área e a profundidade do reservatório, do clima, do tipo e da densidade da biomassa local etc (GAGNON; BÉLANGER; UCHIYAMA, 2002, RIBEIRO, 2003). Ribeiro (2003) destaca ainda que devido à complexidade da análise que tem de ser feita, a qual exige também a adoção de hipóteses simplificadoras, o modelo adequado está longe de ser um consenso. De qualquer modo, é nítida a grande contribuição para as emissões dos reservatórios nos estudos que a consideram.

5.2 Potencial de Aquecimento Global (PAG)

Dentre os diversos indicadores ambientais que compõem a ACV, o PAG – que representa quanto determinada quantidade de gases do efeito estufa contribui para o aquecimento global – tem sido amplamente utilizado para comparar os diferentes processos de geração de eletricidade. A Figura 11 ilustra um gráfico do PAG para diferentes formas de geração de energia, construído a partir dos dados obtidos em um levantamento da literatura existente por Turconi, Boldrin, Astrup (2013).

Figura 11 – Comparativo do PAG de diversas formas de geração de eletricidade.



Fonte: Dados disponíveis em Turconi, Boldrin, Astrup (2013).

Turconi, Boldrin, Astrup (2013) realizaram o levantamento para treze tecnologias: hidrelétrica, nuclear, eólica, combustão da biomassa, co-combustão da biomassa (combustão da biomassa associada a um combustível fóssil), gaseificação da biomassa, solar, gás natural (ciclo combinado), óleo (óleo pesado de petróleo, leve de petróleo, diesel), gaseificação do carvão, gás natural (ciclo simples), combustão do carvão e combustão do carvão lignito (carvão com alto teor de carbono).

Nota-se uma grande diferença na magnitude do PAG entre as tecnologias consideradas renováveis e as não renováveis. Ressalta-se o caso da energia nuclear que apresenta um PAG muito pequeno, porém esse indicador não leva em consideração os potenciais riscos da manipulação de combustíveis radioativos.

A Tabela 8 mostra um comparativo entre o PAG das diversas formas de geração de eletricidade, de modo a quantificar quão menos impactante é cada tecnologia em relação à combustão do carvão lignito, a fonte de maior impacto.

Tabela 8 – Eficiência relativa das diversas tecnologias ante ao PAG do lignito.

Tipo de Geração	Eficiência relativa ao lignito [%]	Tipo de fonte
Hidrelétrica	99,2	Renováveis, exceto nuclear
Nuclear	98,8	
Eólica	98,3	
Biomassa (combustão)	95,4	
Biomassa (co-combustão)	95,0	
Biomassa (gaseificação)	94,7	
Solar	93,7	Não renováveis
Gás Natural (ciclo combinado)	55,6	
Óleo	25,3	
Carvão (gaseificação)	24,3	
Gás Natural (ciclo simples)	23,0	
Carvão (combustão)	7,50	
Lignito	0,00	

Fonte: Elaboração própria.

De modo a calcular o PAG para a produção de hidrogênio eletrolítico (em $kgCO_{2(eq)}/kgH_2$) foi calculado primeiramente um valor médio do PAG (em $kgCO_{2(eq)}/kWh$). Ao analisar os valores disponíveis na literatura é possível observar que os mesmos não apresentam uniformidade e muitas vezes são discrepantes entre si. Tal fato decorre principalmente das fronteiras utilizadas por cada autor, bem como da localização do estudo da base de dados consultada. Dessa forma, utilizaram-se os seguintes passos para garantir uma estimativa de maior confiabilidade:

- Construiu-se uma tabela para cada fonte contendo os valores encontrados no levantamento bibliográfico;
- Uma análise de sensibilidade foi efetuada de modo a excluir valores muito discrepantes da média;
- Como as fontes solar e eólica possuíam um número maior que trinta valores, eliminaram-se um desvio padrão acima e um abaixo da média;

Sabendo-se que para produzir 1 kg de hidrogênio são necessário aproximadamente 59 kWh e que a contribuição do eletrolisador representa 5 % (SPATH; MANN, 2004) do PAG global, encontram-se os resultados descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – PAG média para a produção de hidrogênio eletrolítico por diversas fontes.

Fonte de Geração de Energia Elétrica	PAG médio ($kgCO_{2(eq)}/kgH_2$)	Quantidade de Dados
PCH	0,439	12
Hidrelétrica	0,527	12
Nuclear	0,647	10
Eólica	0,612	31
Biomassa (co-combustão)	2,3	11
Biomassa (combustão)	2,6	8
Biomassa (gaseificação)	3,0	6
Solar	2,7	43
Gás Natural (ciclo combinado)	28,4	18
Gás Natural (ciclo simples)	49,1	5
Óleo	47,6	10
Carvão (gaseificação)	48,2	7
Carvão (combustão)	59,7	29
Lignito	63,7	7

Fonte: Elaboração própria.

A aplicação da análise de sensibilidade pode ser exemplificada no levantamento de dados para a fonte biomassa co-combustão. Nesse caso, a média com todos os valores levantados foi de $51,4 \text{ } kgCO_{2(eq)}/MWh$. Porém três referências possuíam valores nitidamente distantes do restante da literatura. Retirando-se as três referências, encontrou-se uma nova média, $38,1 \text{ } kgCO_{2(eq)}/MWh$. Destaca-se que para a fonte solar não houve diferenciação entre as diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos, pois os níveis de emissão são bastante similares. No que se refere a PCH, sua classificação varia de país para país, e os reservatórios são desconsiderados. Em geral, a maior parte dos estudos de ACV encontrados analisam as situações de países europeus e dos Estados Unidos, implicando na consideração das particularidades desses países.

5.3 Eficiência Ecológica

Cardu e Baica (1997;1999) propõem uma metodologia para o cálculo de um indicador denominado “eficiência ecológica-energética” (*energy ecologic efficiency*) para plantas termelétricas. Nesse estudo, uma adaptação do indicador de eficiência ecológica-energética é

apresentada, de forma a enquadrar-se na análise da produção de hidrogênio por eletrólise com energia proveniente de fontes renováveis (eólica, hidrelétrica e solar). Com o propósito de simplificar a leitura desse texto, adotar-se-á apenas a denominação eficiência ecológica daqui em frente.

A metodologia proposta por Cardu e Baica (1999) assume que a eficiência ecológica (ε) é calculada pela equação (15).

$$\varepsilon = [c \cdot \varphi(\eta, \pi_g) \cdot \psi(\pi_g)]^n \quad (15)$$

Onde:

ε – eficiência ecológica [-];

c – constante a ser determinada [-];

η – eficiência do processo de produção de hidrogênio [-];

π_g – indicador de poluição [kg/MJ];

n – expoente a ser determinado [-];

O indicador de poluição utilizado por Cardu e Baica (1999) foi substituído pelo PAG ($kgCO_{2(eq)}/kgH_2$). Na metodologia original a análise baseava-se na razão entre o dióxido de carbono equivalente do combustível e seu PCI ($kgCO_{2(eq)}/MJ$), certamente o análogo ao conceito do PAG. Tais modificações representam as principais alterações na metodologia original de Cardu e Baica (1999), resultando na equação (16).

$$\varepsilon = [c \cdot \varphi(\eta, PAG) \cdot \psi(PAG)]^n \quad (16)$$

Onde:

ε – eficiência ecológica [-];

c – constante a ser determinada [-];

η – eficiência do processo de produção de hidrogênio [-];

PAG – Potencial de Aquecimento Global [$kgCO_{2(eq)}/kgH_2$];

n – expoente a ser determinado [-];

A eficiência global do processo é calculada conforme apresenta a equação (17).

$$\eta = \eta_{fonte} \cdot \eta_{elet} \quad (17)$$

Onde:

η_{fonte} – eficiência de geração de energia elétrica [-];

η_{elet} – eficiência do eletrolisador [-];

Assumindo-se que $\varphi(\eta, PAG)$ tenha a forma dada pela equação (18) (CARDU; BAICA, 1999).

$$\varphi = \frac{\eta}{(\eta + PAG)} \quad (18)$$

Observa-se que $\varphi(\eta, PAG)$ considera tanto a eficiência energética do processo (η) como também a eficiência ecológica, com a inclusão do PAG.

Assumindo-se que $\psi(PAG)$ tenha a forma dada pela equação (19) (CARDU; BAICA, 1999).

$$\psi = \ln(K - PAG) \quad (19)$$

Onde:

K – constante a ser determinada [$kgCO_{2(eq)}/kgH_2$];

Desse modo a equação da eficiência ecológica pode ser expressa conforme mostra a equação (20) (CARDU; BAICA, 1999).

$$\varepsilon = \left[c \cdot \frac{\eta}{(\eta + PAG)} \cdot \ln(K - PAG) \right]^n \quad (20)$$

As constantes “c” e “n”, são encontradas através da definição de condições de contorno, essenciais para uma correta modelagem e equacionamento. A fim de encontrar uma forma de análise que melhor se adeque ao escopo desse trabalho foram elaboradas novas condições de contorno que serão explicitadas em uma análise para dois cenários.

5.3.1 Cenário I

No cenário I estabeleceram-se as seguintes hipóteses como condições de contorno:

- 1- Se $PAG = 0 \text{ kgCO}_{2(eq)}/\text{kgH}_2$, $\varepsilon = 1$, para qualquer η ;
- 2- Se $PAG = 70 \text{ kgCO}_{2(eq)}/\text{kgH}_2$ (10% acima do lignito) $\varepsilon = 0$, para qualquer η ;
- 3- Se $PAG = 28 \text{ kgCO}_{2(eq)}/\text{kgH}_2$ (gás natural – ciclo combinado) e $\eta = 0,405$ (produto da eficiência da planta de gás natural de 54% pela eficiência do eletrolisador de 75%), $\varepsilon = 0,55 - 0,65$.

A condição 1 impõe que se não houver potencial de aquecimento global o processo será 100% eficiente, não importando a capacidade de conversão de energia da planta. Essa condição expressa o limite superior para a eficiência ecológica, considerada o caso ideal.

A condição 2 estabelece que o processo será totalmente ineficiente se o PAG da fonte utilizada para geração de energia que alimentará o eletrolisador for 10% superior ao do carvão lignito. Esse combustível apresenta o maior PAG como mostra a Tabela 9 e seu uso para geração de energia representa 4,2% da geração de eletricidade mundial (TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013). Segundo Euracoal (2014) o lignito representou, em 2012, 18% da geração de eletricidade da Hungria, 26% da Alemanha e 45% da República Tcheca, perfazendo um total de 10% em toda a Europa. Dessa forma, um PAG pouco acima do pior caso real será considerado o limite de ineficiência, não importando a capacidade de conversão de energia que o processo possa alcançar. Então, a condição 2 afirma que é inviável possuir eficiência elétrica em detrimento do impacto ambiental.

As condições 1 e 2 expressam claramente a intenção do indicador de eficiência ecológica que é a de priorizar o aspecto ambiental da questão energética, pois em ambos os casos esse é o fator preponderante.

Finalmente a condição 3 estabelece um patamar intermediário para a eficiência ecológica ao estabelecer que a energia oriunda do gás natural queimado em térmicas de ciclo

combinado estaria entre 55% – 65%. Essa faixa de eficiência se justifica tanto pelo nível do PAG dessa fonte que é um pouco menor que a metade do PAG do lignito (conforme mostra a Tabela 9), quanto pelo fato de o gás natural ser a tecnologia de transição entre as fontes renováveis e os combustíveis fósseis (é o fóssil de menor emissão, porém essa emissão é consideravelmente maior que a das fontes renováveis).

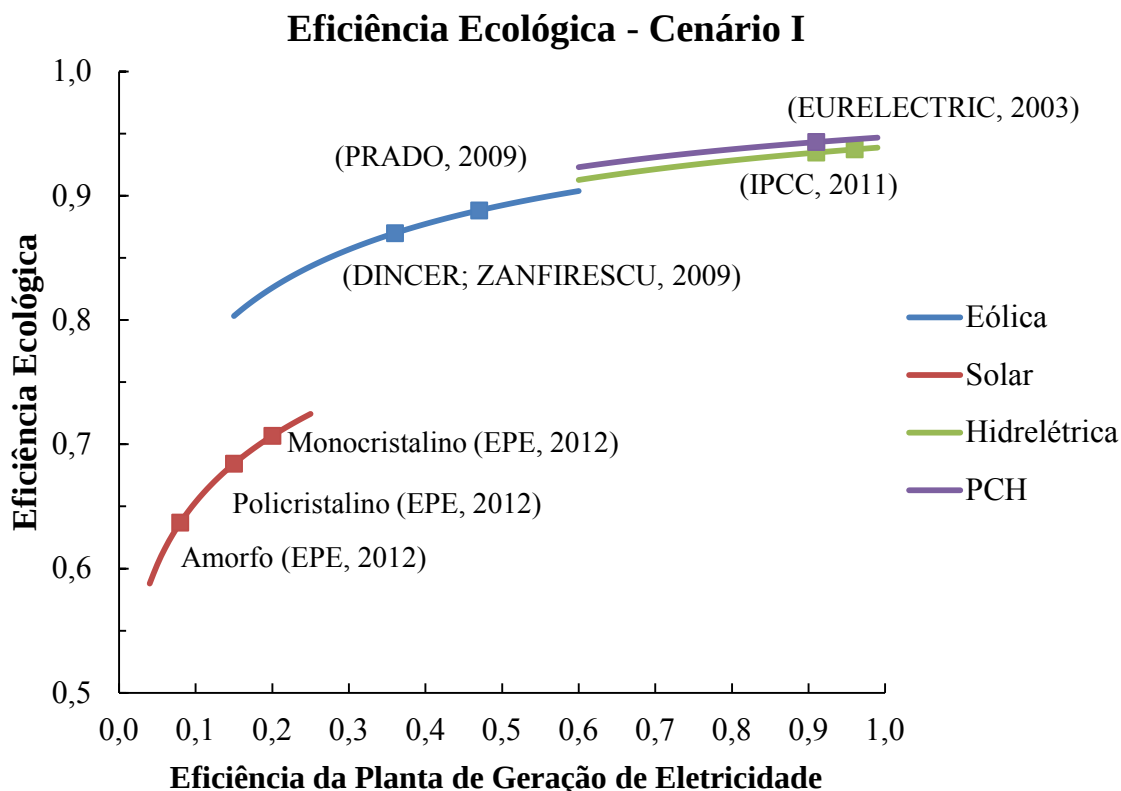
A eficiência do processo de produção de hidrogênio de 40,5%, é obtida multiplicando-se a eficiência de uma usina termelétrica à gás natural em ciclo combinado (54%) (VILLELA, 2007) e o valor da eficiência adotado para o eletrolisador (75%) (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012).

Com as condições de contorno definidas, resta agora descobrir os valores de “ K ”, “ c ” e “ n ”. Utilizando-se a condição de fronteira 2, para que $\varepsilon = 0$, $\ln(K - PAG) = 0$, então $K = 71 \text{ kgCO}_{2(eq)}/\text{kgH}_2$. A partir da condição 1, se $PAG = 0 \text{ kgCO}_{2(eq)}/\text{kgH}_2$, então $c = \frac{1}{\ln(71)} = 0,234$. Finalmente, através da condição 3, substituindo as constantes “ K ” e “ c ” na equação (20) para os valores limites “ ε ” adotados, obtém-se que $n = 0,137 - 0,0984$. Adotando-se o valor médio $n = 0,117$, obtém-se a função para determinação da eficiência ecológica conforme mostra a equação (21).

$$\varepsilon = \left[0,234 \cdot \frac{\eta}{(\eta + PAG)} \cdot \ln(71 - PAG) \right]^{0,117} \quad (21)$$

A Figura 12 ilustra um gráfico comparativo entre as fontes eólica, hidrelétrica e solar, considerando a eficiência do eletrolisador de 75% para todos os casos. A abscissa corresponde à eficiência na geração de energia elétrica que alimentará o eletrolisador. É considerada a eficiência da turbina eólica, da hidrelétrica e do painel fotovoltaico apenas, excluindo-se as possíveis perdas na transmissão e distribuição da eletricidade. O eixo das ordenadas indica a eficiência ecológica. Os pontos em destaque visam particularizar a análise para os valores da eficiência na geração elétrica adotados na literatura, ressaltando os respectivos valores da eficiência ecológica.

Figura 12 – Eficiência ecológica da produção de hidrogênio para o cenário I.



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a eficiência ecológica do hidrogênio com energia proveniente de hidrelétricas e de PCHs é bastante semelhante. Segundo Eurelectric (2003), a eficiência de grandes centrais hidrelétricas atinge até 95%, correspondendo a uma $\varepsilon = 0,945$. Ainda de acordo com Eurelectric (2003), as PCHs alcançam eficiência elétrica de até 90%, o que equivale a $\varepsilon = 0,943$.

O hidrogênio eólico acompanharia de perto o desempenho da eficiência ecológica da fonte hidrelétrica não fosse sua menor eficiência elétrica. Na melhor das hipóteses, a eficiência de um aerogerador atinge 47%, destaca Prado (2009), entretanto a mesma costuma ser em torno de 36%, resultando em $\varepsilon = 0,870$.

Por fim, a eficiência ecológica do hidrogênio solar apresentou um maior distanciamento mesmo para os painéis com melhor eficiência. A tecnologia monocristalina obtém eficiência elétrica da ordem de 19% (EPE, 2009), o que de fato é pouco em relação às outras fontes, culminando em $\varepsilon = 71\%$.

5.3.2 Cenário II

No cenário II estabeleceram-se as seguintes hipóteses como condições de contorno:

- 1- Se $PAG = 0 \text{ kgCO}_{2(eq)}/\text{kgH}_2$ $\varepsilon = 1$, para qualquer η ;
- 2- Se $PAG = 70 \text{ kgCO}_{2(eq)}/\text{kgH}_2$ (10% acima do lignito), $\varepsilon = 0$, para qualquer η ;
- 3- Se $PAG = 0,438 \text{ kgCO}_{2(eq)}/\text{kgH}_2$ (PCH) e $\eta = 0,638$ (produto da eficiência da PCH de 85% pela eficiência do eletrolisador de 75%), $\varepsilon = 0,95 - 0,99$.

As condições 1 e 2 são idênticas ao cenário I, o que não ocorre com a condição 3. É possível verificar, por meio da Tabela 9, que a PCH apresenta o menor PAG dentre todas as fontes. Assim, é pertinente adotar essa tecnologia como referência de ótimo desempenho e estudar como se comportarão as outras fontes ante a adoção desse desempenho como uma fronteira no equacionamento da eficiência ecológica.

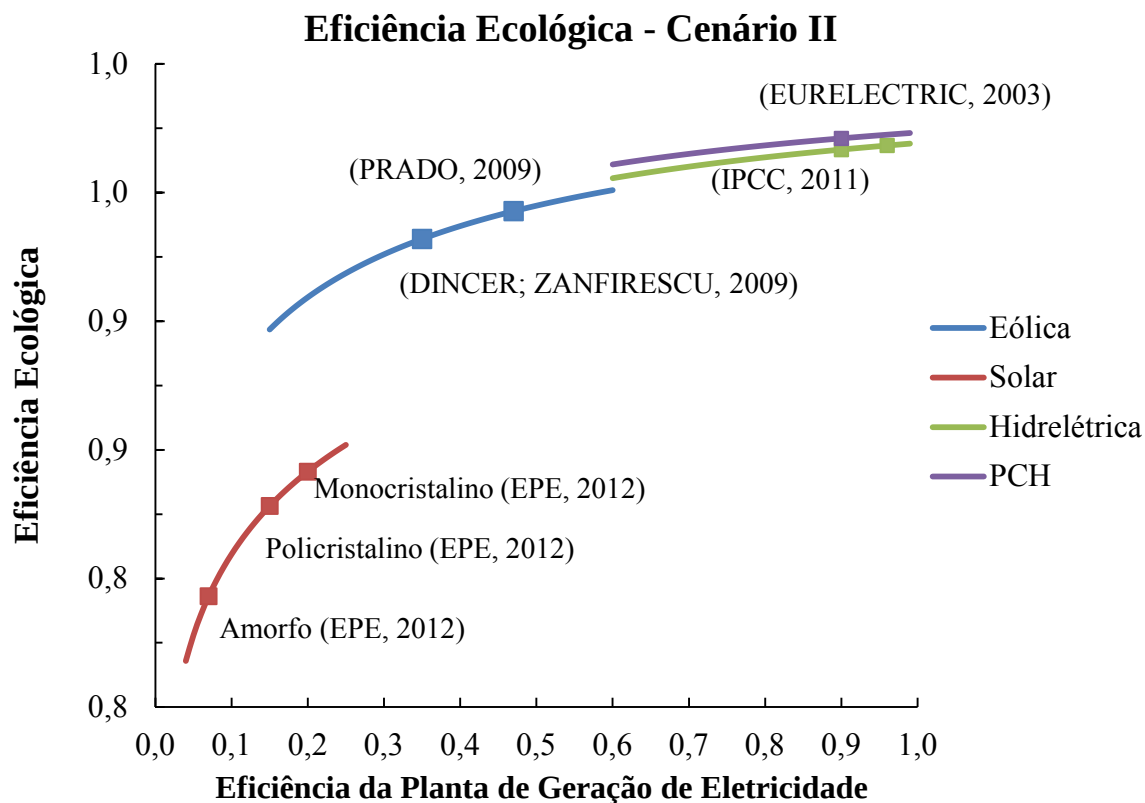
Seguiram-se os mesmos procedimentos adotados no cenário I para obterem-se as constantes necessárias, a fim de determinar a nova equação para o novo cenário. Dessa forma, a partir da condição 1, $c = 0,234$, e pela condição 3, $n = 0,0977 - 0,0191$. Adotando-se $n = 0,0584$.

Assim, obtém-se a equação (22).

$$\varepsilon = \left[0,234 \cdot \frac{\eta}{(\eta + PAG)} \cdot \ln(71 - PAG) \right]^{0,0584} \quad (22)$$

Novamente um gráfico comparativo entre as fontes eólica, hidrelétrica e solar, considerando a eficiência do eletrolisador de 75% para todos os casos foi elaborado como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Eficiência Ecológica da produção de hidrogênio para o cenário II.



Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que os resultados para o cenário II representam um deslocamento da curva do cenário I para cima, aumentando os valores da eficiência ecológica para todas as formas de produção de hidrogênio. A eficiência ecológica de grandes centrais hidrelétricas ficou em 0,972 e a de PCH 0,971, considerando-se as mesmas referências para a eficiência da geração elétrica adotadas para o cenário I. Novamente, a eficiência ecológica para ambas as tecnologias, é muito próxima.

O hidrogênio eólico, por sua vez, obteve $\varepsilon = 0,931$ para uma eficiência elétrica de 36% e o hidrogênio solar obteve $\varepsilon = 0,840$, considerando-se a eficiência dos painéis de silício monocristalino (19%).

A Tabela 10 resume os valores obtidos pelos dois cenários para diversos tipos de geração de eletricidade utilizados para produção de hidrogênio eletrolítico. De modo geral, a energia disponível na rede elétrica é uma mistura dessas alternativas em proporções características de cada país.

Tabela 10 – Comparativo da eficiência ecológica entre diversas fontes de energia considerando a produção de hidrogênio eletrolítico.

Fonte de Geração de Energia	Eficiência	Referências	ε	ε
Elétrica	Elétrica		Cenário I	Cenário II
PCH	85,0%	(EURELECTRIC, 2003)	0,940	0,970
Hidrelétrica	90,0%	(IPCC, 2011)	0,934	0,967
Nuclear	45,0%	(OZBILEN; DINCER; ROSEN, 2013)	0,882	0,939
Eólica	35,0%	(DINCER; ZAMFIRESCU, 2012)	0,868	0,932
Biomassa (co-combustão)	33,0%	(HELLER et al., 2003)	0,758	0,871
Biomassa (combustão)	33,0%	(HELLER et al., 2003)	0,751	0,867
Biomassa (gaseificação)	36,0%	(HELLER et al., 2003)	0,746	0,864
Solar	14,0%	(EPE, 2009)	0,679	0,825
Gás Natural (ciclo combinado)	54,0%	(VILLELA, 2007)	0,597	0,774
Gás Natural (ciclo simples)	30,0%	(TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013)	0,511	0,716
Óleo	44,0%	(VILLELA, 2007)	0,538	0,735
Carvão (gaseificação)	52,0%	(BRIEM et al., 2004)	0,547	0,741
Carvão (combustão)	44,0%	(VILLELA, 2007)	0,508	0,714
Lignito	44,0%	(VILLELA, 2007)	0,492	0,703

Fonte: Elaboração própria.

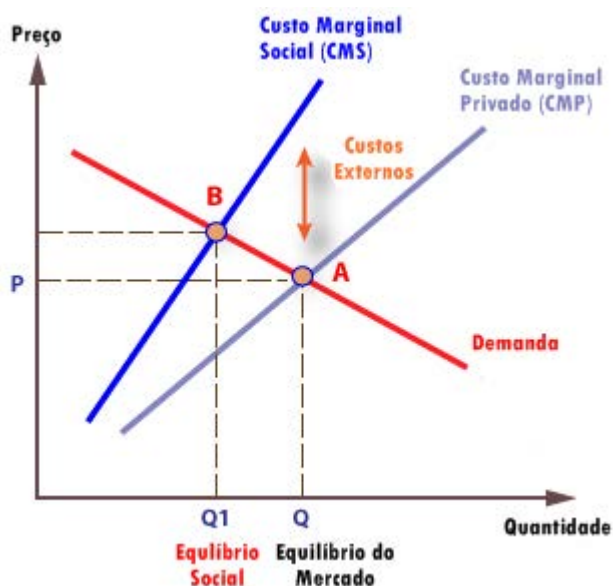
Assim como em outros cenários experimentados durante a elaboração deste trabalho, a fonte hidrelétrica destaca-se sempre como a de maior eficiência ecológica. Merece atenção especial a análise dos resultados referentes à energia nuclear, pois uma vez que o indicador que baliza os cálculos de eficiência ecológica é o PAG e o mesmo não leva em consideração os potenciais riscos associados a possíveis acidentes nucleares, as interpretações podem ser precipitadas.

Outro ponto a destacar é uma limitação da metodologia. Apesar de a função $\psi = \ln(K - PAG)$ escalonar a eficiência ecológica em um grande intervalo, o indicador, em sua forma geral, perde um pouco sua sensibilidade à medida que o PAG torna-se muito grande. Desse modo, ressalta-se uma eficiência crítica (CARDU; BAICA, 1999), abaixo da qual o processo perde viabilidade. No caso da produção de hidrogênio eletrolítico, esse patamar se encontra na transição para os combustíveis fósseis.

6 AVALIAÇÃO DAS EXTERNALIDADES

Em economia, a externalidade “está presente sempre que o bem-estar econômico de um agente (utilidade ou lucro) inclui variáveis cujos valores são escolhidos por outros agentes sem atenção particular sobre os efeitos no bem-estar dos agentes que eles afetam” (COSTA, 2011). Uma vez que normalmente não se agregam ou incorporam os custos das emissões de poluentes oriundos dos processos de conversão de energia, deve-se incluí-los segundo o conceito de externalidade ambiental (ZHANG, 2012), conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Curva de custos para uma externalidade negativa na produção.



Fonte: Adaptado de Economics on line (2014).

Em um mercado que não considera as externalidades, o custo marginal privado é o próprio custo de produção. Porém, se os impactos ambientais forem incorporados aos custos de produção como custos externos, o novo valor, denominado custo marginal social, será a medida mais exata do real valor do custo de produção para a sociedade. Desse modo, o ponto de equilíbrio do mercado também é deslocado para um ponto de equilíbrio socialmente ótimo. Referindo-se ainda a Figura 14, para qualquer quantidade de produção, o preço do bem que inclui os custos externos é maior. Uma vez que as fontes não renováveis apresentam maiores impactos ambientais e, portanto, custos externos maiores, incorporá-los no preço da energia ampliaria a competitividade das fontes renováveis. Assim, se o mercado não atribuir valor econômico ao recurso ambiental através de preços que reflitam a realidade, o valor da energia elétrica produzida em uma planta geradora não será o real.

Entende-se como valor econômico do recurso ambiental (VERA), o somatório de dois valores: “o de uso” e o “de não uso”, definidos e exemplificados na Figura 15.

Figura 15 – Categorias de classificação do valor econômico dos recursos ambientais.

Valor Econômico do Recurso Ambiental				
Valor de Uso				Valor de Não-Uso
	Valor de Uso Direto	Valor de Uso Indireto	Valor de Opção	Valor de Existência
Descrição	Bens e serviços ambientais apropriados diretamente da exploração do recurso e consumidos hoje	Bens e serviços ambientais que são gerados de funções ecossistêmicas e apropriados e consumidos indiretamente hoje	Bens e serviços ambientais de usos diretos e indiretos a serem apropriados e consumidos no futuro	Valor não associado ao uso atual ou ao futuro e que reflete questões morais, éticas ou altruísticas
Exemplo	Extração da madeira	Carbono retido nas florestas tropicais	Fármacos desenvolvidos com propriedades medicinais ainda não descobertas de plantas de florestas tropicais	Salvamento de baleias

Fonte: (MOTTA, 1997).

Realiza-se o cálculo do valor ambiental a partir de um extenso número de metodologias. De acordo com Eletrobrás (2000) a precisão do valor ambiental depende da metodologia utilizada, das externalidades consideradas, das hipóteses adotadas com relação ao comportamento do consumidor etc. Explicitar a metodologia e seus limites de aplicação também garantirá maior credibilidade ao estudo. O estudo mais aprofundado das metodologias disponíveis foge ao escopo deste trabalho e encontra-se em Motta (1997), Eletrobrás (2000) e Carvalho (2005).

Needs (2009) apresenta uma metodologia denominada *impact pathway* (via de impacto), cujo objetivo é a modelagem da cadeia causal das emissões de poluentes de acordo com as interações, por meio de transporte e conversão química na atmosfera, com os receptores – seres humanos, plantações, ecossistemas etc, agregando-se valor a perda do bem-estar oriunda desse impacto. Assim, para diversos poluentes, calcula-se o custo de dano como exemplifica a Tabela 11 para alguns casos.

Tabela 11 – Custo unitário do dano por poluente para cada categoria de impacto.

Poluente	Categoria de Impacto				
	Saúde (€/t)	Biodiversidade (€/t)	Produção Agrícola (€/t)	Danos Materiais (€/t)	Aquecimento Global (€/t)
COVNM	941,00	-70	189,00	-	-
NO_x	5.722,00	942	328,00	71,00	-
MP_{CO} ⁴	1.327,00	-	-	-	-
MP_{2,5} ⁵	24.570,00	-	-	-	-
SO₂	6.348,00	184	-39,00	249,00	-
CO₂	-	-	-	-	7,0
CH₄	-	-	-	-	310,0
N₂O	-	-	-	-	12.014,00
Pb	278.284,00	-	-	-	-
Hg	8.000.000,00	-	-	-	-

Fonte: (NEEDS, 2009).

A partir da ACV obtém-se as quantidades de poluentes emitidas em relação a energia gerada. A Tabela 12 apresenta esses valores para quatro combustíveis fósseis e a Tabela 13 para quatro fontes renováveis.

Tabela 12 – Emissões de poluentes para fontes não-renováveis.

Poluente	Escala	Forma de Geração de Energia			
		Lignito (kg/kWh)	Carvão (kg/kWh)	Gás Natural (kg/kWh)	Diesel (kg/kWh)
COVNM	10 ⁻⁵	2,36	5,94	10,10	3,45
NO_x	10 ⁻⁴	7,38	8,07	3,09	63,40
SO₂	10 ⁻⁴	1,69	6,18	1,47	6,16
CO₂	10 ⁻¹	9,21	7,76	3,98	6,74

Fonte: Adaptado de (RENTIZELAS; GEORGAKELLOS, 2013).

⁴ Tamanho do material particulado: 2,5-10 µm

⁵ Tamanho do material particulado: < 2,5 µm.

Tabela 13 – Emissões de poluentes para fontes renováveis.

Poluente	Escala	Forma de Geração de Energia			
		Biomassa (kg/kWh)	Hidrelétrica (kg/kWh)	Solar (kg/kWh)	Eólica (kg/kWh)
CO_{VNM}	10 ⁻⁶	222,00	1,17	70,90	8,05
NO_x	10 ⁻⁵	176,00	2,36	13,60	3,86
SO₂	10 ⁻⁵	53,10	0,90	23,30	3,83
CO₂	10 ⁻²	1,80	25,10	5,52	9,56

Fonte: Adaptado de (RENTIZELAS; GEORGAKELLOS, 2013).

Para incorporar os custos dos danos ambientais, deve-se multiplicar o custo unitário gerado por cada poluente, de acordo com a Tabela 11, pela quantidade emitida pelo mesmo, conforme consta nas Tabelas 12 e 13 (NEEDS, 2009). O resultado é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Custo da parcela de dano ambiental considerando as diversas formas de geração de eletricidade.

Fonte	Categoria de Impacto					
	Saúde (10 ⁻³ €/kWh)	Biodiversidade (10 ⁻⁴ €/kWh)	Produção Agrícola (10 ⁻⁴ €/kWh)	Danos Materiais (10 ⁻⁵ €/kWh)	Aquecimento Global (10 ⁻³ €/kWh)	Total (10 ⁻² €/kWh)
Lignito	7,01	7,25	2,04	9,62	6,45	1,45
Carvão	10,00	8,70	2,52	21,70	5,43	1,68
Gás Natural	3,01	3,11	1,15	60,00	2,79	0,63
Diesel	40,30	60,80	20,60	60,90	4,72	5,38
Biomassa	14,80	17,40	5,99	26,20	0,13	1,75
Hidrelétrica	0,19	0,24	0,08	0,40	0,02	0,02
Solar	2,97	1,66	0,49	7,00	0,39	0,36
Eólica	0,49	0,43	0,13	1,27	0,07	0,06

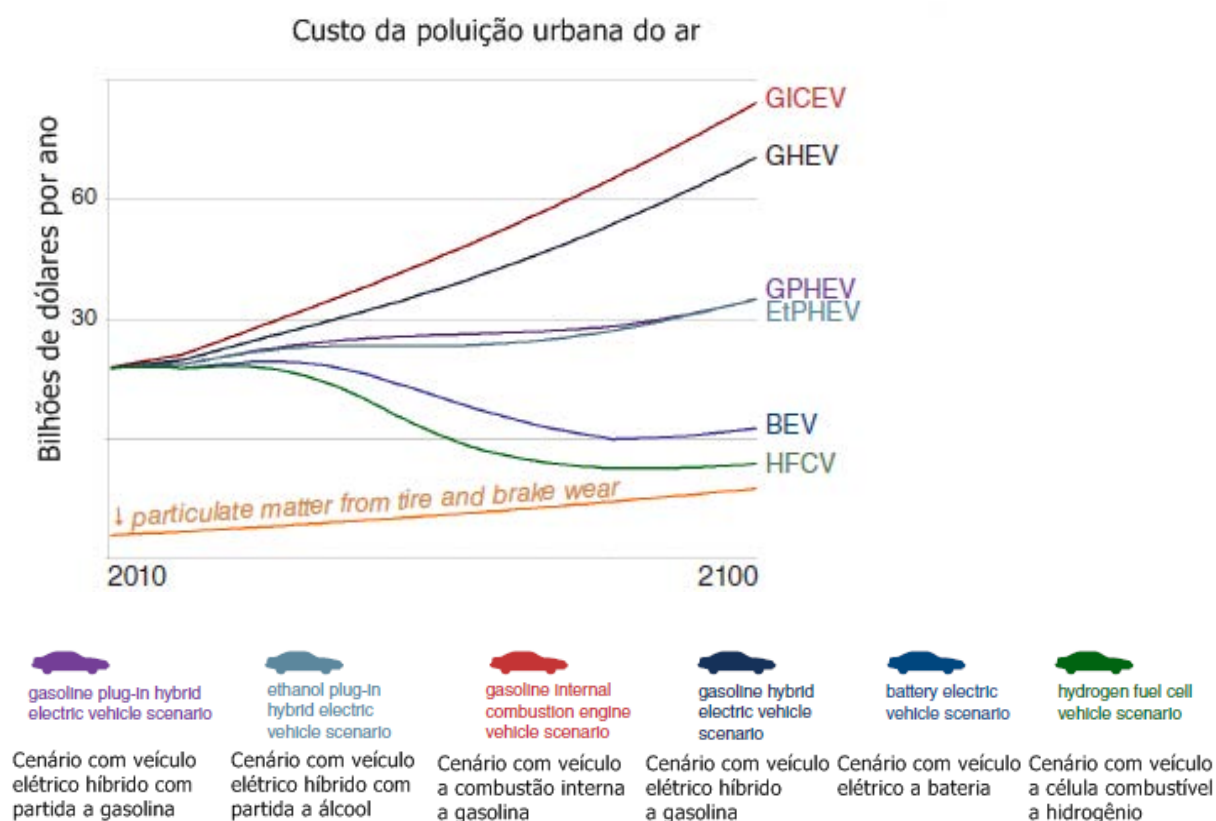
Fonte: Adaptado de (RENTIZELAS; GEORGAKELLOS, 2013).

Observa-se que as fontes de geração de eletricidade consideradas renováveis apresentaram custos a se incorporar bastante reduzidos, com destaque para as fontes hidrelétrica, eólica e solar.

Os estudos de agregação de custos externos para a produção de hidrogênio abordam principalmente sua aplicação no setor de transporte, especificamente em células a combustível. Nesse caso, consideram-se as emissões decorrentes de todo o ciclo de vida do hidrogênio e também do automóvel (SUN; OGDEN; DELUCCHI, 2010). De acordo com Jacobson, Colella e Golden (2005) uma mudança para veículos com célula a combustível a hidrogênio (proveniente de fonte eólica e gás natural) nos EUA pode representar uma redução nos gastos com saúde e clima entre US\$ 33 a 283 bilhões por ano.

A Figura 16 mostra para seis diferentes tecnologias, os níveis de custos de poluição urbana, para o setor automobilístico. Considera-se que cada alternativa torna-se predominante sobre as outras ao longo do século XXI, objetivando o estudo do comportamento dos custos da poluição, à medida que a tecnologia é inserida ou consolidada no mercado.

Figura 16 – Comparativo do custo da poluição urbana das tecnologias avaliadas.



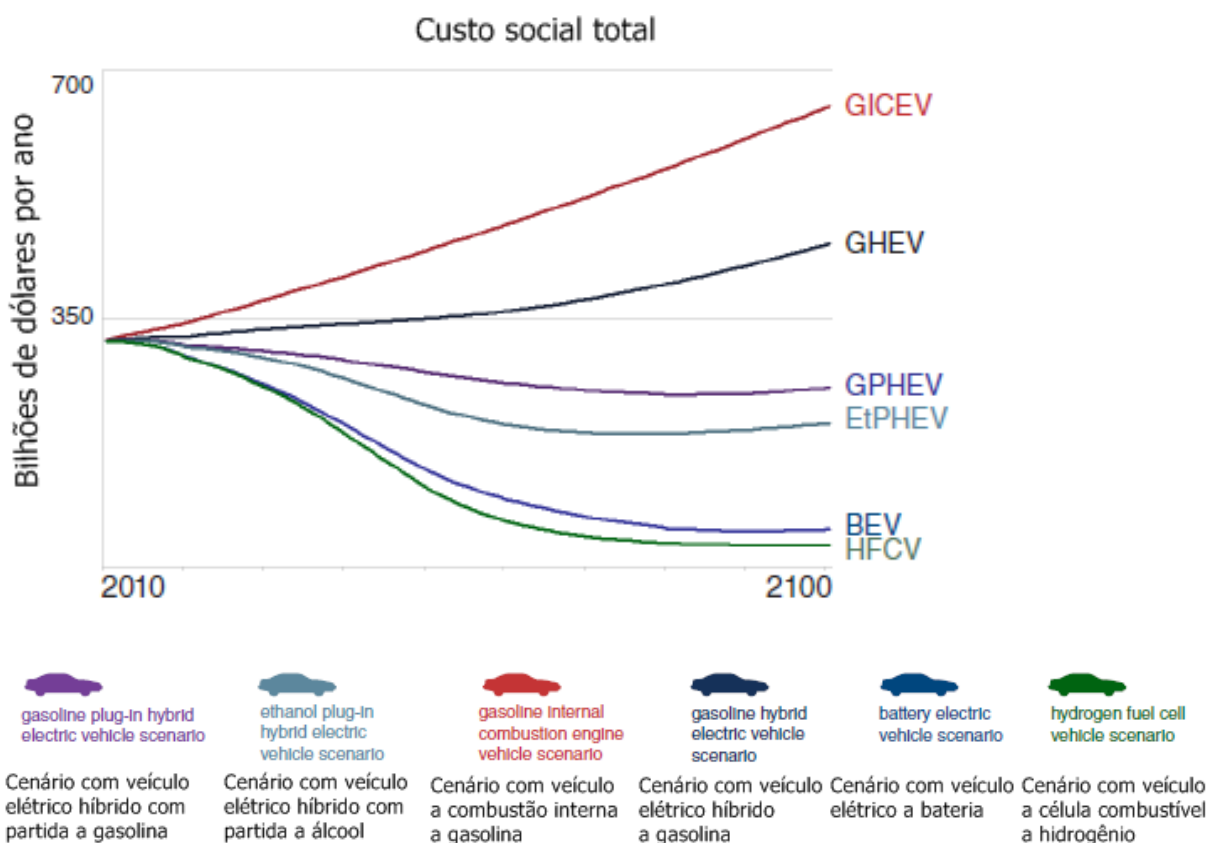
Fonte: (THE NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION, 2009).

Da análise da Figura 16 percebe-se que as tecnologias híbridas – menos dependentes de motores a combustão – os veículos puramente elétrico e a hidrogênio, atingem os menores

custos de poluição urbana, revelando-se as soluções ideais para mitigar os gastos com saúde e melhorar a qualidade de vida da população nas cidades.

A Figura 17 mostra o comparativo entre as tecnologias, agora considerando os custos sociais, que compreendem os custos resultantes das emissões de poluentes para o ar, da emissão de gases do efeito estufa e da insegurança no fornecimento de petróleo.

Figura 17 – Comparativo do custo social das tecnologias avaliadas.

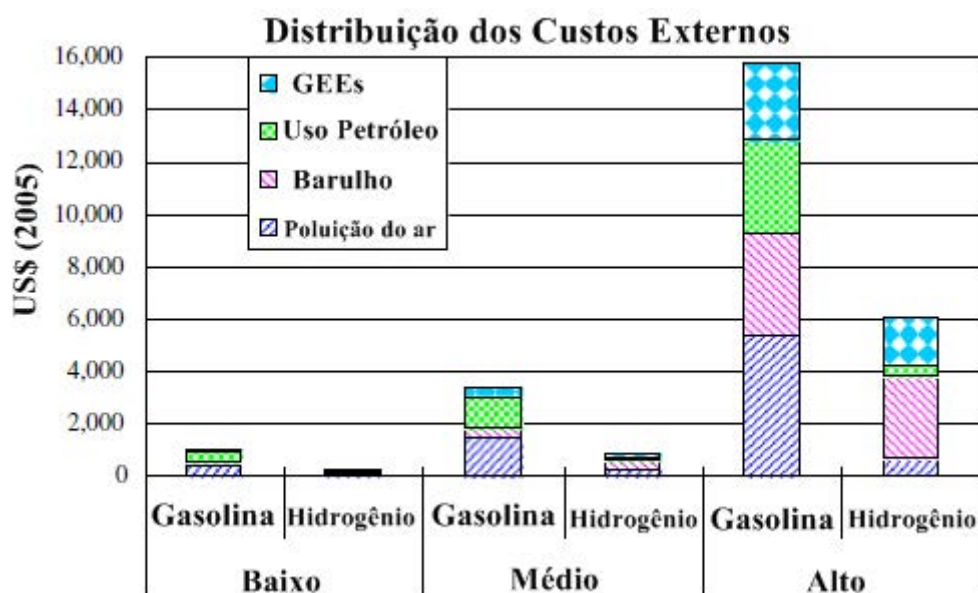


Fonte: (THE NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION, 2009).

Nota-se que a introdução de veículos com célula combustível a hidrogênio representa uma drástica redução nos custos sociais. A diferença entre essa tecnologia e o veículo convencional a gasolina é enorme, corroborando o grande potencial de aplicação do hidrogênio no setor de transportes.

Sun, Ogden e Delucchi (2010) destacaram quatro impactos principais presentes no setor de transportes (emissão de gases do efeito estufa, consumo de petróleo, barulho e poluição do ar) indicando a distribuição dos custos externos para cada um desses danos, considerando veículos a gasolina e a célula a combustível de hidrogênio. Elaboraram-se três cenários, estimando pequeno, médio e alto custo externo, como apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Distribuição dos custos externos no setor automobilístico.



Fonte: (SUN; OGDEN; DELUCCHI, 2010).

Analogamente às situações já ilustradas, o hidrogênio permanece revelando menores custos externos. No cenário que considera os custos externos como baixos, a diferença a favor do hidrogênio é de menos de US\$ 1.000,00. À medida que se consideram custos externos maiores, essa diferença tende a aumentar, sendo que para o cenário médio a diferença é maior que US\$ 2.000,00 e para o cenário alto acima de US\$ 9.000,00 (SUN; OGDEN; DELUCCHI, 2010). Vale ressaltar que o estudo considera que se produz o hidrogênio por eletrólise com energia da rede, além da reforma a vapor do gás natural, gaseificação do carvão e biomassa.

A determinação dos custos ambientais requer uma análise criteriosa a fim de estabelecer comparações justas e valorar corretamente cada dano ambiental. Porém, em todos os exemplos citados neste trabalho, observa-se que os custos das fontes não renováveis aumentariam em proporção muito maior que as renováveis, havendo espaço para a expansão dessas últimas.

7 CONCLUSÕES

O estudo das diferentes tecnologias de eletrolisadores mostrou que o eletrolisador alcalino é a tecnologia desenvolvida e disponível comercialmente, operando com capacidades de 1 a 500 Nm³/h e eficiência típica em torno de 75%. Os modelos PEM também estão disponíveis, mas apresentam custos mais elevados e menores capacidades de produção, variando entre 0,29 a 30 Nm³/h, sendo utilizados principalmente para a produção de hidrogênio com energia proveniente de painéis fotovoltaicos. Já os eletrolisadores SOE objetivam aumentar a eficiência da eletrólise com o aumento da temperatura de operação, porém encontram-se em fase de pesquisa e desenvolvimento e acredita-se que também estarão disponíveis comercialmente à médio e longo prazo.

Da análise técnica concluiu-se ainda que o potencial eólico, solar e hidrelétrico brasileiro é favorável para a disseminação da eletrólise com eletricidade proveniente dessas fontes. Destaca-se a região Nordeste que possui grande potencial eólico e solar, esse último comparado as melhores regiões do mundo. A geração hidrelétrica é predominante no país e a utilização da energia excedente que seria vertida, é uma importante alternativa a se considerar.

Da análise econômica, observou-se que algumas variáveis interferem profundamente nos custos de produção de hidrogênio, entre as quais: o investimento no eletrolisador, o período de operação e o custo de produção da eletricidade. Apesar de o eletrolisador alcalino ser uma tecnologia comercial, seu custo ainda é elevado e foi estimado em US\$ 546.900,29, para uma capacidade de 60 Nm³/h. Observa-se a influencia do período de operação do eletrolisador principalmente considerando a produção do hidrogênio solar. A diferença entre o custo de produção do hidrogênio solar foi de 0,152 e 0,161 US\$/kWh para os hidrogênios de PCH e eólico respectivamente, considerando os valores máximos dos leilões de energia elétrica no Brasil.

O custo da eletricidade foi extensamente analisado durante o trabalho, baseando-se nos leilões de energia. O custo médio da energia eólica é de 134,00 R\$/MWh e para a PCH é de 176 R\$/MWh, conforme os levantamentos efetuados. Já para a energia solar ainda há poucos empreendimentos, corroborando uma média de 227 R\$/MWh, o que também contribui para o maior custo do hidrogênio solar. De modo geral, os custos dos hidrogênios eólico e de PCH são muito próximos, sendo a maior diferença de 0,025 US\$/kWh, no cenário que considera os valores mínimos dos leilões.

Com relação à análise do ciclo de vida, conclui-se que para a energia eólica a fabricação do rotor e da torre representam as etapas mais críticas. Já para a energia solar, a

obtenção das pastilhas de silício em grau eletrônico é a etapa mais impactante. Finalmente, para a energia hidrelétrica, considera-se que o reservatório é a variável de maior impacto. No caso de PCHs a construção da barragem é a etapa mais crítica, uma vez que os reservatórios nesse tipo de hidrelétrica são desconsiderados.

O indicador de eficiência ecológica estabeleceu uma escala comparativa entre os hidrogênios, no que se refere ao impacto ambiental. Em qualquer cenário elaborado, o hidrogênio como energia proveniente da geração solar é menos eficiente, atingindo uma eficiência de 0,825 no cenário II. O hidrogênio de PCH possui o melhor desempenho, seguido de perto pelo eólico, alcançando 0,970 e 0,932 respectivamente, ambos no cenário II. Mesmo com níveis de PAG muito próximos, o fato de os painéis fotovoltaicos possuírem uma eficiência de conversão de energia muito baixa, é a principal justificativa para o distanciamento do hidrogênio solar em relação ao de PCH e eólico.

No que tange a avaliação das externalidades, ficou evidente que a incorporação dos custos externos pode acelerar a introdução do hidrogênio na matriz energética e consolidar as fontes renováveis. Mostrou-se que para o diesel os custos externos seriam de 5,38 c€/kWh, enquanto que para a energia hidrelétrica esse valor seria de apenas 0,02 c€/kWh, conforme a Tabela 14.

Finalmente, pode-se concluir que os processos eletrolíticos para produção de hidrogênio renovável representam uma alternativa de destaque para a produção desse combustível. Uma vez que o setor energético é parte indissociável da vida humana, refletindo questões sociais, políticas, ambientais, o estudo dos aspectos técnicos, econômicos, ambientais e das externalidades, contribui para uma visão global da cadeia energética, num mundo que necessita e busca continuamente novas soluções.

Sugere-se para futuros trabalhos como continuidade ao estudo realizado aqui:

- Avaliação minuciosa do período de operação do eletrolisador considerando o fator de capacidade de cada fonte de geração de eletricidade.
- Com relação ao indicador de eficiência ecológica, sugere-se considerar o PAG do carvão (*hard coal*) como limite de ineficiência, uma vez que o carvão é mais empregado que o lignito nas termelétricas ao redor do mundo.
- Efetuar análise exérgica dos processos de produção de hidrogênio renovável.

REFERÊNCIAS

ALSEMA E. A. Energy payback time and CO₂ emissions of PV systems. **Progress in Photovoltaics Research and Applications**, New Jersey, 2000;8:17–25.

ALSEMA, EA, WILD-SCHOLTEN, MJ, FTHENAKIS, VM. Environmental impacts of PV electricity generation— a critical comparison of energy supply options. In: **Proceedings of 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference**. Dresden, Germany, 4–8 September 2006.

ALSEMA, EA, WILD-SCHOLTEN, MJ. The real environmental impacts of crystal- line silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufacture data. In: **Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference**. Barcelona, 6–10 June, 2005.

AMARANTE, Odilon A Camargo do; SÁ, Antonio Leite de; ZACK, John; BROWER, Michel. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: CEPEL, 2001. 44 p.

ANEEL (Org.) **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. 3ed. Brasília. ANEEL, 2008. 236 p.

BATTISTI, Riccardo; CORRADO, Annalisa. Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology. **Energy**, Amsterdam, p. 952-967. 23 ago. 2013.

BERRY, J. E. et al. **Power Generation and the Environment – A UK Perspective**. 1998. <http://externe.jrc.es/reports.html> Acesso 10 mar. 2014.

BICKEL, Peter; FRIEDRICH, Rainer (Ed.). **ExternE Externalities of Energy: Methodology 2005 Update**. Luxemburgo: European Communities, 2005.

BIEGLER, Tom. **The Hidden Costs of Electricity: Externalities of Power Generation in Australia**. Parkville: The Australian Academy Of Technological Sciences And Engineering, 2009.

BOEHM, R. F. **Design analysis of thermal systems**. New York: John Wiley & Sons, 1987. 266p.

BRAGA, L. B. **Análise Econômica do uso de célula a combustível para acionamento de ônibus urbano**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Unesp, Guaratinguetá, 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. (Org.). **Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil**. 2. ed. (Versão Beta): Ministério das Minas e Energia, 2005. 115 p.

BROWN, Theodore L et al. Eletroquímica. In: BROWN, Theodore L et al. **Química: A ciência central**. 9. ed. New York: Pearson Prentice Hall, 2005. Cap. 20. p. 754-756

CARDU, Mircea; BAICA, Malvina. Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of thermopower plants. **Energy Conversion & Management**. Amsterdam, p. 71-87. 19 jul. 1997.

CARDU, Mircea; BAICA, Malvina. Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants. **Energy Conversion & Management**. Amsterdam, p. 1569-1575. 22 jan. 1999.

CARNIELETTO, R. **Aproveitamento de energia vertida turbinável para produção de hidrogênio e geração distribuída**. 2011. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CARVALHO, Cláudio Elias. **Desenvolvimento de Procedimentos e Métodos Para Mensuração e Incorporação das Externalidades em Projetos de Energia Elétrica: Uma Aplicação às Linhas de Transmissão Aéreas**. 2005. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CCEE (org.) **Resultados consolidados agosto 2014**. Disponíveis em: <<http://www.ccee.org.br/>> Acesso em: 13 set. 2014.

COSTA, Carlos Eugênio da. **Notas de Economia do Setor Público: Aula 3: Externalidades**. 2011. Disponível em: <<http://epge.fgv.br/we/Graduacao/FinancasPublicas/2011?action=AttachFile&do=get&target=Notas3.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

DEMIR, Nesrin; TASKIN, Akif. Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbası-Kayseri. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, p. 253-263. 23 abr. 2013.

DINCER, Ibrahim; ZAMFIRESCU, Calin. Sustainable hydrogen production options and the role of IAHE. **International Journal Of Hydrogen Energy**, Amsterdam, v. 37, p.16266-16286, 05 abr. 2012.

DOE (org.). **2007 DOE Hydrogen Program Review: Test of High Temperature Electrolysis ILS Half Module**. Disponível em: <http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review07/pdp_26_hartvigsen.pdf> Acesso em: 09 nov. 2014.

ECONOMICS ON LINE. **Showing negative production externalities**. Disponível em: <http://www.economics online. co.uk / Market_failures/Externalities.html>. Acesso em 10 out. 2014

ELETROBRÁS (Org.). **Metodologia de Valoração das Externalidades Ambientais da Geração Hidrelétrica e Termelétrica com Vistas à sua Incorporação no Planejamento de Longo Prazo do Setor Elétrico**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000. 202 p.

EMTU (São Paulo) (Org.). Órgão institucionais patrocinadores. In: CONSÓRCIO DO PROJETO ÔNIBUS BRASILEIRO MOVIDO A HIDROGÊNIO (Brasil). **Ônibus Brasileiro a Hidrogênio: Tecnologias Renováveis para o Transporte Urbano no Brasil**.: Consórcio do Projeto Ônibus Brasileiro Movido A Hidrogênio, [2009]. p. 40-66. Disponível em:<<http://www.emtu.sp.gov.br/emtu/projetos/projetos-de-desenvolvimento-tecnologico/onibus-a-hidrogenio/onibus-a-hidrogenio-apresentacoes.fss>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

EPD. **Climate declaration for electricity from hydropower 2005**. Disponível em: <<http://www.environdec.com/>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

EPD. **Climate declaration for electricity from hydropower 2011**. Disponível em: <<http://www.environdec.com/>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

EPE (Org.) **Balanco Energético Nacional: ano base 2013**.Rio de Janeiro. Empresa de Pesquisa Energética, 2014. 288 p.

EPE (Org.). **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2012. 58p.

EURACOAL. **The role of coal in EU power generation 2012**.Disponível em: [http://www.euracoal.org/ pages/medien.php?idpage=1517](http://www.euracoal.org/pages/medien.php?idpage=1517)Acesso em: 17 nov. 2014

EURELECTRIC (Org.). **Efficiency in Electricity Generation**. Brussels: Union Of The Electricity Industry – Eurelectric, VGB, 2003. 30 p.

External Costs of Electricity Generation in Greece. 1997. Disponível em: <<http://externe.jrc.es/reports.htm>>l. Acesso 10 mar. 2014.

EXTERNE (Org.). **National Implementation: Alemanha**. 1997. Disponível em: <<http://externe.jrc.es/reports.html>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

EXTERNE (Org.). **National Implementation: Dinamarca**. 1997. Disponível em: <<http://externe.jrc.es/reports.html>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

FATSIKOSTAS, Athanasios N.; KONDARIDES, Dimitris I.; E.VERYKIOS, Xenophon. Production of hydrogen for fuel cells by reformation of biomass derived ethanol. **Catalysis Today**, Amsterdam, p. 145-155. 3 jul. 2002.

FLURY, Karin; FRISCHKNECHT, Rolf. **Life Cycle Inventories of Hydroelectric Power Generation**. Kanzlei Str: Esu-services Ltd., 2012. 51 p.

FTHENAKIS, V. et al., 2011, **Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems**. International Energy Agency, New York, out. 2011.

G1. **Pernambuco faz 1º leilão do Brasil de energia solar e contrata 5 empresas**. Disponível em: <http://g1.globo.com/pernambuco/noticia/2013/12/pernambuco-faz-1-leilao-do-brasil-de-energia-solar-e-contrata-5-empresas.html>> Acesso em: 25 jul. 2014.

GAGNON, Luc; BÉLANGER, Camille; UCHIYAMA, Yohji. Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. **Energy Policy**. Amsterdam, p. 1267-1278. 12 ago. 2002.

GAGNON, Luc; BÉLANGER, Camille; UCHIYAMA, Yohji. Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. **Energy Policy**. [s.l], p. 1267-1278. 12 ago. 2002.

GAZEY, R.; SALMAN, S.K.; AKLIL-D'HALLUIN, D.D. A field application experience of integrating hydrogen technology with wind power in a remote island location. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, p. 841-847. 18 jan. 2006.

GENEVIEVE SAUR (Estados Unidos). NREL. **Wind-to-hydrogen project: electrolyser capital cost study**. Colorado: NREL, 2008. 41 p.

GIBSON, Thomas L.; KELLY, Nelson A. Predicting efficiency of solar powered hydrogen generation. **International Journal Of Hydrogen Energy**, Amsterdam, p. 900-911. 07 dez. 2009.

GUEZURAGA, B., ZAUNER, R., POLZ, W., 2012. Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. **Renewable Energy** 37, 37- 44.

HELLER, Martin C. et al. Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. **Renewable Energy**. Amsterdam, p. 1023-1042. 26 nov. 2003.

H-TEC. **Hydrogen production with PEM electrolyser**. Disponível em: <http://www.h-tec.com/de/systems/startseite/>. Acesso em 5 fev. 2014

HYDROGENICS. **OnSite Hydrogen Generation. HyLYZER® PEM Electrolysis Technology.** Disponível em : <<http://www.hydrogenics.com/docs/default-source/pdf/2-1-1-1-hyalyzer-1-223F620871645.pdf?sfvrsn=2>> Acesso em: 08 nov. 2014a.

HYDROGENICS. **Hydrogenics Advanced Hydrogen Solutions:** Hystat Hydrogen Generators. Disponível em: <http://www.hydrogenics.com/docs/default-source/pdf/2-1-1-industrial-brochure_english.pdf?sfvrsn=2>. Acesso em: 12 nov. 2014b.

IPCC (Org.) **Hydropower. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011. 60 p.

Ito M, Kato K, Komoto K, Kichimi T, Kurokava K. A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MWvery large-scale (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si CdTe and CIS modules. **Progress in Photovoltaics Research and Applications** 2008;16:17–30.

ITO M, KATO K, SUGIHARA H, KICHIMI T, SONG J, KUROKAVA K. A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 2003;75:507–17.

ITO M, KOMOTO K, KUROKAWA K. Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules. **Current Applied Physics** 2010;10:S271–3.

JACOBSON, M Z; COLELLA, W G; GOLDEN, D M. **Cleaning the Air and Improving Health With Hydrogen Fuel Cell Vehicles.** 2005. Disponível em: <<https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/1109157FinaSupInfo.pdf>>. Acesso em: 01 jul. 2014.

JINQING; LU, Lin; YANG, Hongxing. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, p. 255-274. 11 dez. 2012.

KATO K ,MURATA A ,SAKUTA K. Energy payback time and life cycle CO2 emission of residential PV power system with silicon PV module . **Progress in photovoltaics Research and Applications** 1998 ;6:105–15.

MEIER, P. J. **Life Cycle Assessment of Electricity Generation Systems and Applications for Climate Change Policy Analysis.** University of Wisconsin: Madison, WI, USA. 2002. <http://fti.neep.wisc.edu/FTI/pdf/fdm1181.pdf>

MOTTA, Ronaldo Seroa da. **Manual para Valoração Econômica de Recursos Ambientais**. Rio de Janeiro: IPEA/MMA/PNUD /CNPq, 1997. 242 p.

NEEDS (Org.). **External costs from emerging electricity generation technologies.**: European Commission, 2009. 64 p.

NEEDS (Org.). **Generation, of the energy carrier hydrogen In context with electricity buffering generation through fuel cells**: Icelandic New Energy, 2008. 47 p.

OEBELS, Kerstin B.; PACCA, Sergio. Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil. **Renewable Energy**, Amsterdam, p. 60-70. 05 dez. 2012.

OEBELS, Kerstin B.; PACCA, Sergio. Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil. **Renewable Energy**, Amsterdam, p. 60-70. 05 dez. 2012.

ONS (Brasília) (Org.). **Boletim Mensal de Geração Eólica**. 2014. Disponível em: <http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_mensal_geracao_eolica/index.aspx>. Acesso em: 19 dez. 2014.

OZBILEN, Ahmet; DINCER, Ibrahim; ROSEN, Marc A. Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods. **Environmental Impact Assessment Review**. [s.l], p. 1-9. 18 abr. 2013.

PACCA S, HORVATH A. Greenhouse gas emissions from building and operating electric power plants in the Upper Colorado River Basin. **Environmental Science and Technology** 2002;36:3194e200.

PACCA S, SIVARAMAN D, KEOLEIAN GA. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. **Energy Policy** 2007;35: 3316–26.

PACCA S, SIVARAMAN D, KEOLEIAN GA. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. **Energy Policy** 2007;35: 3316–26.

PADILHA, Janine C. et al. 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**, Amsterdam, p. 7898-7902. 15 ago. 2009.

PEREG, José Ramón Muro; LA HOZ, Javier Fernandez de. **Life cycle assessment of 1 kWh generated by a wind farm Gamesa G90-2.0MW Onshore**. [s.l]: Gamesa, 2003. Disponível

em: <<http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/rsc/compromisos/clientes/certificaciones-ohsas-y-i/informe-analisis-ciclo-de-vida-g90-english.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2013.

PRADO, P. O. **Projeto de um parque eólico com a utilização de um sistema de informação geográfica**. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2009.

PROTON ON SITE. **Hogen H Series Technical specifications**. Disponível em: <http://protononsite.com/> Acesso em: 5 fev. 2014

RAUGEI M, BARGIGLI S, ULGIATI S. Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. **Energy** 2007;32:1310–8.

RENTIZELAS, Athanasios; GEORGAKELLOS, Dimitrios. Incorporating life cycle external cost in optimization of the electricity generation mix. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 65, p.134-149, 28 out. 2013.

RIBEIRO, Flávio de Miranda. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil- Usina de Itaipu: primeira aproximação**. 2003. 456 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Departamento de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

RIBEIRO, Flávio de Miranda; da SILVA, Gil Anderi; Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**. [s.l], p. 44-54. 208 set. 2009.

ROBERTO, Turconi; BOLDRIN, Alessio; ASTRUP, Thomas. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. Amsterdam, p. 555-565. 03 set. 2013.

RULE, Bridget M; WORTH, Zeb J; A BOYLE, Carol. Comparison of Life Cycle Carbon Dioxide Emissions and Embodied Energy in Four Renewable Electricity Generation Technologies in New Zealand. **Environmental Science Technology**. [s.l], p. 6406-6413. 24 jun. 2009.

SABESP. **Comunicado 07-13**. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/uploads/file/clientes_servicos/comunicado_07_2013.pdf>. Acesso em: 03 set. 2014.

SAIDUR, R. et al. Environmental impact of wind energy. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s.l], p. 2423-2430. jun. 2011.

SALIBA, Aloysio Portugal Maia. **A análise de viabilidade das pequenas centrais hidrelétricas e o conceito de envoltórias de vazão: uma abordagem estocástica dos recursos hídricos**. 2000. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

SEQUEIRA, César A. C.; MATTOS, Diogo M. F.. Hydrogen Production. **Ciência & Tecnologia Dos Materiais**, v. 22, n. 3/4, p.76-86, 2010.

SILVEIRA, J. L. **Uma contribuição para a modelagem termoeconômica: otimização da operação e do projeto de sistemas energéticos**. 1998. 60 f. Tese (Livre Docência) - Universidade Estadual Paulista-Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 1998.

SØRENSEN, B. **Hydrogen and Fuel Cell: emerging technologies and applications**. Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press, 2005. 450 p.

SPATH, Pamela L.; MANN, Margaret K.. **Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen Production via Wind/Electrolysis: Milestone Completion Report**. Colorado: Nrel, 2004.

STOPPATO, A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Energy*. [s.l], p. 224-232. 11 dez. 2006.

SUN, Yongling; OGDEN, Joan; DELUCCHI, Mark. Societal lifetime cost of hydrogen fuel cell vehicles. **International Journal Of Hydrogen Energy**, Amsterdam, v. 35, p.11932-11946, 15 set. 2010.

THE NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION (Estados Unidos) (Org.). **The energy evolution: an analysis of alternative vehicles and fuels to 2100**. 2009. 40 p. Disponível em: <<http://www.ovcr.ucla.edu/uploads/file/evolutionReport.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2013.

TIBA, Chigueru et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.111 p.

TIBA, Chigueru. Novos coeficientes de angstrom para a estimação da radiação solar no Nordeste do Brasil.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedingsonline...** Availablefrom:<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MS_C0000000022002000200030&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 31 jan. 2014.

TSOUTSOS, Theocharis; FRANTZESKAKI, Niki; GEKAS, Vassilis. Environmental impacts from the solar energy technologies. **Energy Policy**. [s.l], p. 289-296. 03 fev. 2005.

TURCONI, Roberto; BOLDRIN, Alessio; ASTRUP, Thomas. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. Amsterdam, p. 555-565. 03 set. 2013.

TURKULAINEN, T. **Life Cycle Assessment of a Wind Turbine System**. Lappeenranta University of Technology. Diploma thesis. 1998. 72 p. +App. 8 p. [InFinnish].

URSÚA, Alfredo; GANDÍA, Luis M.; SANCHIS, Pablo. Hydrogem production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings Of The IEEE**, New York, p. 410-426. fev. 2012.

VATTENFALL AB NORDIC GENERATION'S (Suécia). **Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower**. Estocolmo: Vattenfall Ab, 2005. 39 p.

VATTENFALL AB NORDIC GENERATION'S (Suécia). **Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower**. Estocolmo: Vattenfall Ab, 2005. 39 p.

Vattenfall Generation's Certified Environmental **Product Declaration of Electricity from Ringhals AB**. Vattenfall. 2002. <http://www.environdec.com/> Acesso 10 mar. 2014.

VILLELA, Iraídes Aparecida de Castro. **Desenvolvimento de um modelo termoeconômico que considera os impactos ambientais**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

WILD-SCHOLTEN, MJ. Energy payback times of PV modules and systems. In: **Workshop Photovoltaik-Modulechnik**. Köln, 26–27 November 2009.

ZENG, Kai; ZHANG, Dongke. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress In Energy And Combustion Science**, Amsterdam, p. 307-326. 01 dez. 2009.

ZHANG, Yun. Analysis on Environmental Cost Internalization Effect: A Study Based on CO2 Emission. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND ELECTRONICS ENGINEERING, 1º., 2012, Shanghai. **Proceedings...** Shanghai: IEEE, 2012. v. 3, p. 3 - 5.

ZOULIAS, Emmanuel et al. **A review on water electrolysis**. 2004. Disponível em: <<http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/jornal/docs/zoulias.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2014.