

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E SOCIEDADE**

**CAMILA SANZOVO BARBOSA DOS SANTOS**

**ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE EM UM PROCESSO DE PRODUÇÃO DE  
HIDROGÊNIO COM A REUTILIZAÇÃO DO ALUMÍNIO**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2018**

CAMILA SANZOVO BARBOSA DOS SANTOS

**ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE EM UM PROCESSO DE PRODUÇÃO DE  
HIDROGÊNIO COM A REUTILIZAÇÃO DO ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia e Sociedade, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Linha de pesquisa: tecnologia e desenvolvimento.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maclóvia Correa da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Marcos de Lira Faria

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

S237a Santos, Camila Sanzovo Barbosa dos  
2018 Aspectos de sustentabilidade de um processo de produção de hidrogênio com a reutilização do alumínio / Camila Sanzovo Barbosa dos Santos.--2018  
107 f. : il. ; 30 cm

Texto em português com resumo em inglês  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de pós-graduação em Tecnologia e Sociedade, Curitiba, 2018  
Bibliografia: f. 97-105

1. Hidrogênio – Produção. 2. Alumínio – Reaproveitamento. 3. Hidrólise. 4. Energia – Fontes alternativas. 5. Desenvolvimento sustentável. 6. Sustentabilidade. 7. Tecnologia – Dissertações. I. Silva, Maclovía Corrêa da. II. Faria, Luiz Marcos de Lira. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Sociedade. IV. Título.

---

CDD: Ed. 23 – 600

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Bibliotecário: Adriano Lopes CRB9/1429



## **TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 505**

A Dissertação de Mestrado intitulada **Aspectos de sustentabilidade em um processo de produção de hidrogênio com a reutilização do alumínio** defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Camila Sanzovo Barbosa dos Santos** no dia **15 de dezembro de 2017**, foi julgada aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Sociedade, Linha de Pesquisa – Tecnologia e Desenvolvimento, pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade.

Prof. Dr. Eloy Fassi Casagrande Junior - (UTFPR)

Prof. Dr. Miraldo Matuichuk - (UTFPR)

Prof. Dr. Alexandre Borges Fagundes - (UDESC)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maclovia Correa da Silva - (UTFPR) – *Orientadora*

Prof. Dr. Luiz Marcos de Lira Faria - (UTFPR) – *Coorientador*

**Curitiba, 15 de dezembro de 2017.**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Nanci Stancki da Luz  
Coordenadora do PPGTE  
UTFPR – PPGTE



## AGRADECIMENTOS

Ao finalizar esta dissertação, surgiram dois tipos de sentimentos: gratidão e vitória. Primeiramente gratidão pelo trabalho que realizei com a orientação e provimento daquele que é o Mestre dos mestres, Jesus Cristo. Em segundo pela jornada maravilhosa que o PPGTE me proporcionou, desde o teste seletivo, aulas, seminários, conferências até a conclusão desta dissertação.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maclovia Corrêa da Silva, não existem palavras para agradecer pela força, instrução, empatia e exemplo demonstrado. Sua sabedoria e conhecimento foi o que tornou possível a realização desta pesquisa, além de permitir o estudo do tema abordado.

Não poderia de deixar de prestigiar meu coorientador Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup> Luiz Marcos de Lira Faria, que aceitou corrigir e instruir esta pesquisa sob o ponto de vista químico. Sem os esforços dele não teria sido possível realizar o experimento e análise. Graças a ele pude conhecer a Prof. Dr. Roberta a qual auxiliou de bom grado neste trabalho.

Agradeço também aos professores que participaram da banca de defesa. Prof. Dr. Miraldo Matuichuk, que além de avaliar, contribuiu com ideias e materiais para este trabalho de forma motivacional; ao Prof. Dr. Eloy Fassi Casa Grande pela disponibilidade de tempo em inserir suas observações e posicionamentos, como também pelo interesse em meu trabalho na entrevista do processo pré-seletivo para o programa. Completando a banca temos o Prof. Dr. Alexandre Borges Fagundes, que veio de tão longe para avaliar este trabalho, desta forma, agradeço pelo seu tempo, deslocamento e por ter aceitado o convite.

Gostaria de agradecer a CAPES, a qual ofereceu uma bolsa auxílio durante o meu primeiro ano, período o qual meu marido permaneceu desempregado, permitindo a continuidade de meus estudos e atividades no PPGTE.

Aos meus familiares, amigos, colegas, professores pelo companheirismo e suporte. Mas principalmente a minha mãe, Marília Sanzovo, pois se antes não tivesse trabalhado o dia todo para poder pagar a sua faculdade realizada a noite, nossa família não teria o sustento necessário para que eu pudesse cursar meu bacharelado posteriormente.

Vitória a nós duas.

*“Prezada Camila,  
A conversa com a tecnologia  
é uma sinfonia inacabada.  
Com um abraço,*

*João Augusto Bastos”*

SANTOS, Camila Sanzovo Barbosa dos. **Aspectos de sustentabilidade em um processo de produção de hidrogênio com a reutilização do alumínio**. 2018. 107 f. Defesa da dissertação (Mestrado em Tecnologia e Sociedade). Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

## RESUMO

Levando em consideração medidas para diminuir os efeitos das mudanças climáticas e tecnologias que auxiliam na segurança energética, esta dissertação tem como tema central o estudo da geração de gás hidrogênio como energia alternativa. O gás hidrogênio é um vetor energético com reduzidas emissões de poluentes na atmosfera se comparados com as fontes tradicionais existentes de energia. No entanto, estudos e pesquisas sobre suas potencialidades e viabilidades, tanto técnicas quanto socioeconômicas e ambientais, precisam ser desenvolvidas para amadurecimento tecnológico. O objetivo desta dissertação é analisar a produção de hidrogênio por hidrólise alcalina, com a reutilização de alumínio, correlacionando-a aos aspectos da sustentabilidade. Parte-se de um processo já conhecido e bem difundido no meio científico o qual será analisado e discutido suas possibilidades como tecnologia alternativa para produção de energia. O método empregado para a análise foi bibliográfico junto com o levantamento de dados primários em laboratório de um processo com requerimento de patente, dando caráter de pesquisa exploratória e descritiva. Os principais resultados técnicos foram: vazão média  $77,53 \text{ ml.}(\text{min.g})^{-1}$  de  $\text{H}_2$ , com pureza de 84,20%. Em seguida, realizou-se uma análise econômica, em moeda nacional, real  $\text{R}\$/(\text{m}^3.\text{H}_2)$  e dólar norte-americano  $\text{US}\$/\text{kWh}$ , comparando com outros estudos que determinaram o custo de produção em processos de geração deste tipo do gás. Estruturou-se uma matriz de aspectos e impactos que ilustram os potenciais efeitos na geração de energia. Concluiu-se que a geração de gás hidrogênio por hidrólise alcalina com a reutilização de alumínio secundário contribui para a visão direcionada para a sustentabilidade do planeta, podendo ser uma alternativa energética descentralizada.

**Palavras-chave:** Hidrogênio, Hidrólise Alcalina, Tecnologia, Alumínio, Sustentabilidade, Reutilização.

SANTOS, Camila Sanzovo Barbosa dos. **Aspects of sustainability in a process of hydrogen production with the reuse of aluminum.** 2018. 107 f. Thesis (Masters of Technology) – Postgraduate Program in Technology and Society from Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2018.

### **ABSTRACT**

Taking into account measures to reduce the effects of climate change and technologies that help energy security, this dissertation focuses on the study of generation of hydrogen gas as alternative energy. Hydrogen gas is an energy vector with reduced emissions of pollutants into the atmosphere compared to existing traditional sources of energy. However, studies and research on their potentialities and viabilities, both technical and socioeconomic and environmental, need to be developed for technological maturation. The objective of this dissertation is to analyze the production of hydrogen by alkaline hydrolysis, with the reuse of aluminum, correlating it to the aspects of sustainability. It starts from a process already known and well diffused in the scientific environment which will be analyzed and discussed its possibilities as alternative technology for energy production. The method used for the analysis was bibliographic along with the collection of primary data in the laboratory of a process with patent application, giving character of exploratory and descriptive research. The main technical results were: average flow  $77.53 \text{ ml (min.g)}^{-1} \cdot \text{H}_2$ , with a purity of 84.20%. Then, an economic analysis was performed in national currency, real R \$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{H}_2$ ) and US\$ / kWh, comparing with other studies that determined the cost of production in this type of generation processes. gas. A matrix of aspects and impacts was drawn up illustrating the potential effects on energy generation. It was concluded that the generation of hydrogen gas by alkaline hydrolysis with the reuse of secondary aluminum contributes to the vision aimed at the sustainability of the planet, and can be a decentralized energy alternative.

**Key-Words:** Hydrogen, Alkaline Hydrolysis, Technology, Aluminum, Sustainability, Reuse.



## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 - Consumo Total Final por Setor Econômico.....	23
Figura 2 - Total de Fornecimento de Energia Primária por Fonte Energética .....	24
Figura 3 - Estimativas Percentuais Globais Antropogênicas de GEE .....	24
Figura 4 - Emissões Mundiais de CO <sub>2</sub> por Setor Econômico em 2014.....	25
Figura 5 - Fornecimento de energia primária em 2015 por tipo de fonte.....	26
Figura 6 - Oferta Interna de Energia em 2015.....	29
Figura 7 - Evolução da Oferta Interna no Brasil .....	29
Figura 8 - Transição Energética com Vetor Energético de Baixo Carbono .....	32
Figura 9 - Algumas alternativas de alimentação e processos de geração de H <sub>2</sub> .....	34
Figura 10 - Comparativo das eficiências energéticas por processos de produção de H <sub>2</sub> .....	36
Figura 11 - Comparativo Custo de Produção de Hidrogênio.....	37
Figura 12 - Fontes renováveis de produção de hidrogênio (a), fontes de energia sustentáveis (b), métodos (c) e formas sustentáveis de produção de hidrogênio (d).....	40
Figura 13 - Substituição energética mundial .....	43
Figura 14 - Sistema de Energia Atual e no Futuro .....	44
Figura 15 - Funcionamento de Veículo Movido a Hidrogênio.....	45
Figura 16 - Emissão de Poluentes por Tipo de Combustível - Califórnia .....	46
Figura 17 - Gases do Efeito Estufa (CO <sub>2</sub> ) .....	47
Figura 18 - Localização da Produção de Alumínio no Brasil .....	50
Figura 19 – Cadeia Produtiva da Indústria do Alumínio .....	52
Figura 20-Camada Óxido de Alumínio .....	62
Figura 21 - Fluxograma do processo de hidrólise alcalina. ....	65
Figura 22 - Amostra de Sucata de Alumínio Lixada .....	68
Figura 23 – Planta do Sistema Instrumental para Produção, Filtração e Medição .....	69
Figura 24 - Modelo Base da Matriz de Análise Socioambiental .....	74
Figura 25 - Aspecto do subproduto após 24h (a) latinha lixada, filtrada; (b) aspecto do fundo do bécker sem filtramento.....	81
Figura 26 - Aspecto Final da Reação após 48h .....	81
Figura 27 - Cadeia Produtiva da Geração de H <sub>2</sub> com a Reutilização da Sucata de Alumínio .....	89
Figura 28 - Matriz de Aspectos e Impactos para o processo de HAL para produção de H <sub>2</sub> .....	93

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Etapas da Pesquisa .....	20
Quadro 2 - Principais Usos de Energia em cada Setor de Consumo .....	22
Quadro 3 - Transição do Regime Energético .....	33
Quadro 4 - Processos de Produção de Hidrogênio .....	35
Quadro 5 - Matriz de Energia-Comunicações 1ª e 2ª Revolução Industrial .....	42
Quadro 6 - Comparativo entre veículos à hidrogênio disponíveis no mercado .....	46
Quadro 7 - Combinações de propriedades do alumínio .....	49
Quadro 9 - Misturas de água+ alumínio e outros materiais para produção de hidrogênio .....	62
Quadro 10 – Produção de Hidrogênio por Hidrólise.....	63

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação do Hidrogênio com Combustíveis Convencionais .....	31
Gráfico 2- Comparativo do consumo mundial de alumínio por segmento -2016.....	48
Gráfico 3 - Evolução do índice de ocorrência do serviço de coleta seletiva de RDO dos municípios participantes de 2013 a 2015, segundo situação quanto a existência – SNIS-RS.....	54
Gráfico 4 - Índice de Reciclagem de Latas de Alumínio (%) .....	55
Gráfico 5 - Produção de Hidrogênio por Hidrólise Alcalina para 1g de Alumínio/Corpo Lata .....	77
Gráfico 6 - Variação do Fator de Anuidade .....	83
Gráfico 7 - Evolução Custo de Produção do Hidrogênio por Hidrólise Alcalina Taxa Selic 9,5%.....	84
Gráfico 8 - Evolução Custo de Produção do Hidrogênio por Hidrólise Alcalina Taxa Selic 12,9%.....	85
Gráfico 9 - Custo Comparativo de Produção de Hidrogênio com Fontes Renováveis .....	86
Gráfico 10 - Comparativo de Produção do Hidrogênio por Processo.....	87
Gráfico 11 - Principais atores na cadeia de produção de H <sub>2</sub> a partir da sucata de alumínio .....	96

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 TEMA.....	13
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	15
1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	16
1.4 OBJETIVOS.....	17
1.4.1 Objetivo geral.....	17
1.4.2 Objetivos específicos .....	17
1.5 JUSTIFICATIVA.....	18
1.6 MÉTODOS E MATERIAIS .....	19
1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO .....	20
1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>22</b>
2.1 CONSUMO ENERGÉTICO MUNDIAL .....	22
2.1.1 Energias Renováveis .....	26
2.1.2 Matriz Energética Nacional.....	28
2.2 HIDROGÊNIO .....	30
2.2.1 Processos de Produção .....	33
2.2.2 Hidrogênio Sustentável .....	38
2.2.3 Aspectos Socioeconômicos e Ambientais .....	41
2.3 REUTILIZAÇÃO DO ALUMÍNIO PARA PRODUZIR HIDROGÊNIO ENQUANTO TECNOLOGIA ALTERNATIVA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA .....	48
2.3.1 Produção do Alumínio no Brasil .....	50
2.3.2 Coleta Seletiva e Reciclagem do Alumínio .....	53
2.3.3 Benefícios Socioambientais .....	57
2.3.4 Hidrólise Alcalina com Alumínio Secundário .....	60
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>66</b>

3.1 COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS .....	66
3.2 ENSAIO LABORATORIAL para PRODUÇÃO Do HIDROGÊNIO A PARTIR DE ALUMÍNIO SECUNDÁRIO .....	67
3.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE .....	70
3.3.1 Análise Econômica.....	70
3.3.2 Análise Socioambiental .....	73
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>77</b>
4.1 ENSAIO LABORATORIAL .....	77
4.2 ANÁLISE ECONÔMICA .....	82
4.3 ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL.....	88
4.3.1 Responsabilidade Social .....	94
<b>CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO A – EQUIPAMENTOS PLANTA GERADORA HIDROGÊNIO .....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO B – CERTIFICADO ENSAIO CROMATOGRAFIA .....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO C – GRÁFICO CROMATOGRAFIA TCD .....</b>	<b>109</b>

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Nesta parte introdutória, são apresentados o tema e as delimitações observadas, seguidos pela exposição do problema, com a pergunta de pesquisa e as premissas adotadas. Sequencialmente é exposto o objetivo geral e específico, bem como a justificativa da pesquisa e procedimentos metodológicos empregados, encerrados pelo embasamento teórico.

### 1.1 TEMA

Fontes de energia são essenciais para o funcionamento de uma sociedade moderna industrializada. Dentre as diversas fontes alternativas e renováveis de geração de energia, o uso do gás hidrogênio como fonte de energia é muito promissor devido duas principais características: possui entalpia de combustão muito elevada (poder calorífico  $120 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ; temperatura 298 K), e o produto de sua combustão é água (PORCIÚNCULA, 2013).

A mudança para um regime energético centralizado no hidrogênio traz sua importância na mitigação dos efeitos do aquecimento global na biosfera, pois contribuiria para diminuição de dependência do petróleo, diminuindo a emissão dos excessivos gases do efeito estufa, bem como, diversificando a matriz energética.

Uma das fundações da economia do hidrogênio é a instalação de microusinas de força junto ao consumidor final – a chamada “geração distributiva”, que somada com a internet e a noção de rede, marcaria no século XXI a terceira revolução industrial (RIKFIN, 2012 apud ABRAMOVAY, 2012).

A narrativa da terceira revolução industrial, exposta no livro de Jeremy Rifkin (2012) traz os preliminares da rede internacional de hidrogênio (*HEW – World Hydrogen Energy Web*) que acarretariam na reorganização na cultura, nos modos de vida e nas formas de se fazer negócio, proporcionando a criação de redes descentralizadas de energia de hidrogênio. Esta conectividade interligando os usuários finais possibilitaria o estabelecimento de uma sociedade mais sustentável com os recursos locais e regionais do ambiente.

A conversão do hidrogênio na energia de maior equidade social e econômica depende, em larga escala, do modo como ele será processado nas fases iniciais de seu desenvolvimento. Para que isso ocorra é necessário que especificidades locais sejam consideradas, além de questões como recursos humanos e naturais disponíveis permitam atender uma determinada região (DARROW; PAM, 1981; SCHUMACHER, 1973).

Atualmente, as tecnologias disponíveis para produção de hidrogênio em grande escala e que possam contribuir com o início desta revolução não estão tecnicamente consolidadas, devido a diversas problemáticas que deverão ser suplantadas, tais como: a própria produção do gás, questões técnicas, econômicas, logísticas e sistêmicas. De acordo com o Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE, 2010), existe uma estimativa de que até 2025 ocorra a diminuição significativa dos custos de produção por ganhos de escala e amadurecimento tecnológico para a inserção competitiva no mercado.

Dentre as possíveis rotas para obtenção do hidrogênio como vetor energético, há atualmente uma requerente de patente, Hidrogás Ltda (2016), que reivindica o processo denominado hidrólise alcalina, o qual reutiliza o alumínio para produção de energia. O referido invento utiliza uma reação química completa para quebra da molécula de água, sem consumo de energia elétrica para alimentação da reação, que possibilita especificadamente uma produção de gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) em escala industrial para cogeração de energia, além de se ter como subprodutos desta tecnologia uma solução eletrolítica alcalina e um composto iônico alcalino não corrosivo, que possuem diversas aplicabilidades comerciais (EVOLUÇÕES HIDROGÁS, 2016).

Partindo dos estudos de Figueiredo (1989) de que o uso de novas tecnologias pode dar origem a condições de emancipação e de transformação de sujeitos, é notório o estudo dos elementos condicionadores das relações sociais que este novo processo possivelmente venha ocasionar, ou mesmo, seu papel no contexto de contribuição para a rede internacional do hidrogênio, amadurecimento tecnológico e efeitos na sociedade.

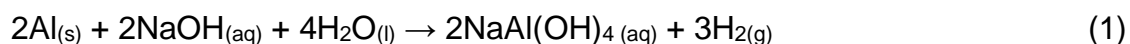
Inserido neste contexto introdutório, esta pesquisa pretende abordar os temas referentes à produção de hidrogênio enquanto energia alternativa, trazendo como objeto de estudo o processo de hidrólise alcalina da empresa Hidrogás Ltda (2016).

Esta técnica de produção de energia precisa ser divulgada e os benefícios serem destacados. Analisar os aspectos socioambientais, econômicos e técnicos é um modo de expor se esta tecnologia contribui com a sustentabilidade.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

São amplamente conhecidos os processos para obtenção de hidrogênio que utilizam pelo menos um metal em uma reação de hidrólise (DINCER; ZAMFIRESCU, 2012). Um dos métodos mais usados na obtenção de hidrogênio em laboratório é a reação de um álcali com alumínio, pelo seu caráter anfótero, ou seja, substância que pode se comportar como um ácido ou como uma base dependendo do reagente (DUDOLADOV et al., 2016).

Ao entrar em contato com a solução aquosa de NaOH, o alumínio se dissolve e libera hidrogênio, formando um aluminato. Essa é uma das fontes normalmente usada em balões meteorológicos (ROSA, 2015). A reação é representada na Equação 1 segundo Lee (1999):



O processo químico proposto pela empresa Hidrogás Ltda (2016) acrescenta aos demais componentes a adição de um ácido, o qual estabiliza a temperatura da reação química e conseqüentemente a obtenção mais efetiva e prolongada de hidrogênio, possibilitando o fornecimento de um fluxo com pressão suficiente para uso direto, sem a necessidade de armazenar o gás sob pressão para uso posterior.

Outro resultado adicional da reação seria a formação de um precipitado que constitui um composto iônico de caráter anfótero, não corrosivo. Tais características conferem propriedades a esse composto iônico que possibilitam a sua aplicação como componente em diversos produtos industriais (EVOLUÇÕES HIDROGÁS, 2016).

Sendo assim, delimita-se para esta pesquisa o processo de produção de hidrogênio por hidrólise alcalina com a reutilização do alumínio secundário (HIDROGÁS LTDA, 2016). Os objetos específicos são as próprias matérias-primas utilizadas no processo, consistindo-se no alumínio (Al) de latinhas coletadas no lixo

dos refeitórios da própria universidade, água de torneira ( $H_2O$ ), ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e hidróxido de sódio ( $NaOH$ ).

O conceito de desenvolvimento sustentável retomado desde 1987 pelo Relatório de Brundtlandt, o qual reforça o “desafio de uma responsabilidade tanto entre gerações quanto entre os integradores da sociedade dos nossos tempos” (JACOBI, 1999) é bastante amplo, o qual implica em ações em todas as áreas da atividade humana (SILVA, 2014). Neste estudo procura-se conhecer a efetividade de produção do gás hidrogênio explorando a integração de seus aspectos técnicos, econômicos e socioambientais.

Além disto, destaca-se que esta investigação não tem propósito de esgotar, bem como se aprofundar em questões teóricas químicas tanto da reação quanto de seus subprodutos. Vale ressaltar que a empresa retentora dos direitos do processo autorizou à autora para uso em estudos e divulgações dos resultados levantados nesta pesquisa.

### 1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

Considerando as mudanças climáticas ocasionadas pelo aumento de teor de gás carbônico  $CO_2$ , sendo boa parte desse gás emitido na atmosfera em razão da queima de combustíveis fósseis, tem-se, portanto, a necessidade da descarbonização nos grandes polos do sistema energético mundial (COUNCIL, 2017; SILVA, 2014).

Diante deste contexto, é notório se levantar questões se o processo de geração de hidrogênio divulgado pela empresa Evoluções Hidrogás (2016) possui potencial significativo de viabilizar esta transição energética com baixas emissões de carbono, se enquadrando nos critérios da sustentabilidade. Sendo assim, se formulam a seguinte indagação norteadora da pesquisa:

**O processo de geração de hidrogênio por hidrólise alcalina, com a reutilização do alumínio, pode contribuir para a produção de energia e sustentabilidade desta técnica?**

Repousa sobre esta pergunta a premissa inicial de que os critérios de sustentabilidade selecionados devem ser utilizados para melhor avaliar este projeto



de desenvolvimento tecnológico. Observando os pontos quantitativos e qualitativos da exploração dos recursos e sua vitalidade produtiva compondo a eficiência econômica, como também outros aspectos relacionados a prudência ecológica e justiça social, formando as dimensões social e ambiental.

## 1.4 OBJETIVOS

Nesta seção está traçada a finalidade geral deste estudo, bem como, suas intenções específicas, que orientam as atividades empreendidas para elaboração desta pesquisa.

### 1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é analisar a produção de hidrogênio por hidrólise alcalina, com a reutilização de alumínio, correlacionando-a aos aspectos da sustentabilidade.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Diante deste contexto são traçados inicialmente os seguintes objetivos específicos:

- I. Identificar trabalhos que tratam de temas sobre a produção de hidrogênio, reutilização do alumínio, a sustentabilidade e matriz energética;
- II. Reproduzir o experimento de produção de hidrogênio por hidrólise alcalina com reutilização do alumínio na forma de sucata em escala laboratorial;

- III. Correlacionar as leituras feitas e resultados dos experimentos aos aspectos da sustentabilidade.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Os pressupostos que motivam a realização desta pesquisa são a difusão de estudos na utilização de inovação tecnológica que permite a diminuição de impactos ambientais negativos e maior equidade social e econômica (KRUGER, 2000; RIFKIN, 2003).

Conjuntamente almeja-se a possibilidade de contínua redução da dependência externa de combustíveis fósseis, diversificação da matriz energética brasileira, bem como, amadurecimento da base tecnológica para auferir confiabilidade aos consumidores brasileiros.

É importante destacar que diante das tendências e necessidades de mudanças do regime energético em todo o mundo, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010) propôs recomendações para o incentivo e desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio, apresentando ações para o estabelecimento de uma agenda tecnológica, tais como: pesquisa e desenvolvimento científico e tecnológico, e incentivo ao desenvolvimento industrial.

Evidenciada a autenticidade desta pesquisa, trazem-se os dados obtidos com a busca de palavras-chave no portal de periódicos da fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) vinculada ao Ministério da Educação (MEC). (ver Tabela 1).

Partindo do pressuposto que a fragilidade social é alcançada com a falta de planejamento de tecnologias que são elementos de um sistema tecnológico, associadamente se dá a relevância deste projeto para o programa de Tecnologia e Sociedade, especificadamente para a linha de tecnologia e desenvolvimento (HUGHES, 2008; SCHUMACHER, 1973). É sublime tal pesquisa uma vez que esta tecnologia inovadora carece de fatores de construção social e dinâmicas de territorialidade, portanto, se prevê nesta pesquisa o levantamento de aspectos

apoiados no tripé da sustentabilidade (social, econômico e ambiental) para o desenvolvimento contínuo e durável do território brasileiro (PPGTE, 2018; SANTOS; SOUZA; SILVEIRA, 1994).

**Tabela 1 - Busca de publicações com palavras-chave da pesquisa – 2016**

Palavras-Chaves (08/09/2016)	Publicações		Ano
	Internacional	Nacional	
<i>Hydrogen generation AND Aluminium Hydrolysis</i> <i>Geração/Produção Hidrogênio AND Hidrólise Alumínio</i>	195	0	A partir de 2012
<i>Hydrogen generation AND Alkaline Hydrolysis</i> <i>Geração/Produção Hidrogênio AND Hidrólise Alcalina</i>	201	0	A partir de 2012
<i>Hydrogen generation AND Alkaline Hydrolysis AND Aluminium</i> <i>Geração/Produção Hidrogênio AND Hidrólise Alcalina AND Alumínio</i>	5	0	A partir de 2012
<i>Hydrogen generation AND Alkaline Hydrolysis AND Aluminium AND acid sulfuric</i> <i>Geração/Produção Hidrogênio AND Hidrólise Alcalina AND Alumínio AND Ácido Sulfúrico</i>	0	0	A partir de 2012

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

## 1.6 MÉTODOS E MATERIAIS

De acordo com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) a classificação desta pesquisa quanto à área do conhecimento é considerada multidisciplinar com especialidade em engenharia química, tecnologia, gestão e sociologia. Quanto à natureza e a utilização dos resultados, a pesquisa é aplicada (OECD, 2009, p.43).

Seguindo o critério de classificação com base nos objetivos, é possível delimitar esta pesquisa como explicativa e descritiva, dada a preocupação central em identificar os fatores que contribuem para a ocorrência do fenômeno de geração de hidrogênio, bem como, estabelecer a relação entre variáveis de sustentabilidade e as inovações do experimento em questão (GIL, 2010).

Segundo Marconi e Lakatos (2010) toda pesquisa implica o levantamento de dados de variadas fontes, quaisquer que sejam os métodos ou técnicas empregadas. Observando os critérios para classificação das técnicas de pesquisa pode-se

constatar que esta se categoriza como pesquisa bibliográfica e documentação direta, uma vez que utiliza fontes secundárias, se estendendo aos métodos mistos. As etapas que constituem esta dissertação, bem como o seu respectivo detalhamento podem ser observadas pelo Quadro 1

**Quadro 1 - Etapas da Pesquisa**

ETAPAS	DETALHAMENTO
Pesquisa bibliográfica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapeamento dos conceitos: desenvolvimento sustentável, inovação tecnológica, geração de energia descentralizada, hidrólise alcalina;</li> <li>- Examinar processos de geração de hidrogênio semelhantes ao de hidrólise alcalina;</li> <li>- Definição de categorias de análise econômica e socioambiental.</li> </ul>
Análise do material bibliográfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estabelecimento de categorias de análises correlacionadas com os aspectos de sustentabilidade e inovação no processo de produção de hidrogênio por hidrólise alcalina;</li> </ul>
Seleção de Materiais e Métodos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definição do procedimento metodológico para levantamento de dados primários em laboratório;</li> <li>- Definição de metodologia para avaliação econômica e socioambiental;</li> </ul>
Análise e interpretação de material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elaboração de planejamento para análise e interpretação das categorias selecionadas;</li> <li>- Inclusão do hidrogênio na produção de energia com a reutilização de materiais.</li> </ul>
Considerações finais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redação do texto da fundamentação teórica, materiais e métodos, resultados, conclusão e sugestões para estudos futuros</li> </ul>

Fonte: Elaborada pela autora, baseada em Gil (2010).

## 1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Analisar a tecnologia da produção de energia no viés da sustentabilidade e inovação em um contexto específico sob o ponto de vista socioambiental e econômico torna-se mais relevante quando nela se reutiliza o alumínio, um material de alto valor energético, bem como custos de extração, custos industriais, energia, água, tratamento, disposição no ambiente dos resíduos.

Para fundamentar como os sistemas tecnológicos são influenciados pelas relações sociais se destacam os autores Hughes (2008), Darrow e Pam (1981). Mais especificadamente, em relação a uma economia baseada em hidrogênio de forma

descentralizada, ressalta-se o economista norte-americano, especialista em novas tecnologias, Jeremy Rifkin (2003; 2012).

O conceito de tecnologia do economista E.F. Schumacher (1973) na obra “*Small is Beautiful*” se correlaciona com a ideia de sustentabilidade associada com inovação tecnológica, baseada na análise e evidenciação de Barbieri et al. (2010), que destaca a necessidade de planejar a inovação contextualizada.

Encerrando a parte do embasamento teórico, se tem a necessidade de compreensão do processo de hidrólise alcalina, o qual se baseia primeiramente no processo requerido pela empresa Hidrogás Ltda (2016), sendo a fundamentação técnica com os artigos publicados da revista *Internacional Journal of Hydrogen Energy – Elsevier*.

## 1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em cinco partes, distribuídas em capítulos específicos, porém interligados. A ordem destes capítulos e os conteúdos inseridos estão divididos em introdução, referencial teórico, materiais e métodos, análise do experimento e conclusão. No primeiro capítulo são apresentados os objetivos, a metodologia e se introduz o referencial teórico. No segundo, o explorados os temas da geração de energia mundial, convencionais e renováveis, o gás hidrogênio e seus processos produtivos, dando destaque àquele realizado por hidrólise alcalina e a viabilidade de reutilização de materiais na técnica utilizada. Já no capítulo 3, concentram-se as ideias de materiais e métodos que fazem parte do experimento laboratorial analisado. O quarto capítulo faz as correlações com os resultados do experimento e aspectos da sustentabilidade. E por fim, o último capítulo conclui o trabalho, trazendo algumas observações pontuais da pesquisadora e sugestões para dar continuidade a este estudo.

## CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CONSUMO ENERGÉTICO MUNDIAL

A sociedade moderna demanda muitos tipos de serviços a fim de manter um bom padrão de vida: alimento, eletricidade, água e espaços aquecidos, ar-condicionado, combustíveis, remédios, entre várias outras substâncias químicas e materiais, etc. De fato nossa civilização está baseada na obtenção e uso eficiente de energia, pois qualquer movimento requer energia (HALLIDAY et al., 2016). De acordo com a análise de Ennio P. da Silva (2014), as principais formas de comércio e consumo de energia pode ser reunida em dois grupos de energéticos: eletricidade e combustíveis em geral. No Quadro 2 é possível identificar os principais processos e usos em que esses grupos energéticos são empregados, e na Figura 1, a seguir, o consumo final de energia mundial.

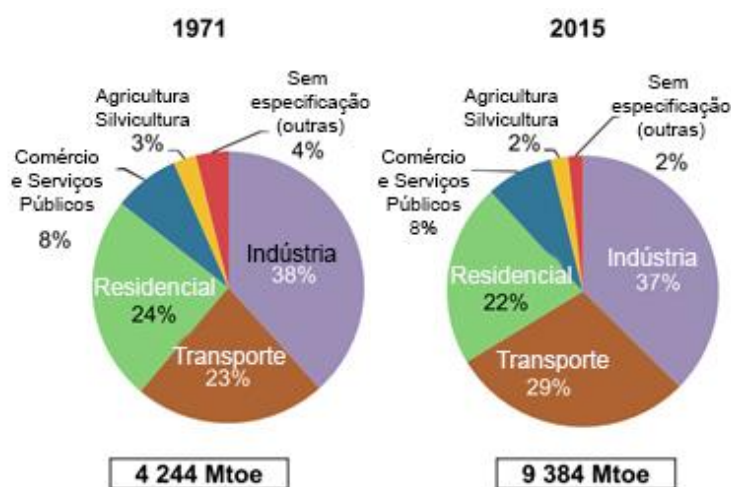
**Quadro 2 - Principais Usos de Energia em cada Setor de Consumo**

Setor	Eletricidade	Combustíveis
Residencial	chuveiros elétricos Iluminação eletrodomésticos e eletroeletrônicos aquecimento e refrigeração	Cocção (GLP, gás natural) Pequenos geradores Aquecimento
Industrial	Máquina e motores Aquecimento Refrigeração Iluminação Processos eletroquímicos	Insumos químicos Motores geradores Aquecimento (caldeiras, etc.)
Comercial	Motores Iluminação Aquecimento e refrigeração	Cocção (GLP, gás natural) Geradores (emergência) Aquecimento
Transportes	Trens e metrô Trólebus	Veículos terrestres Navios Aviões
Público	Iluminação Transporte Máquinas e motores	Transporte Motores geradores Aquecimento
Rural	Bombas (irrigação) Máquinas e motores Iluminação	Cocção (madeira, GLP) Aquecimento Motores geradores, iluminação

Fonte: SILVA (2014).

Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2017), entre os anos de 1971 a 2015, o consumo de energia cresceu mais que o dobro, no entanto, o que mudou significativamente foi o aumento da parcela por parte do setor de transportes, passando de 23% em 1971 para 29% em 2015. Nota-se ainda, que a indústria continua liderando o percentual consumidor, com apenas 1% menor que na década de 80. O terceiro lugar é ocupado pelo setor residencial com 22% (2015).

**Figura 1 - Consumo Total Final por Setor Econômico**

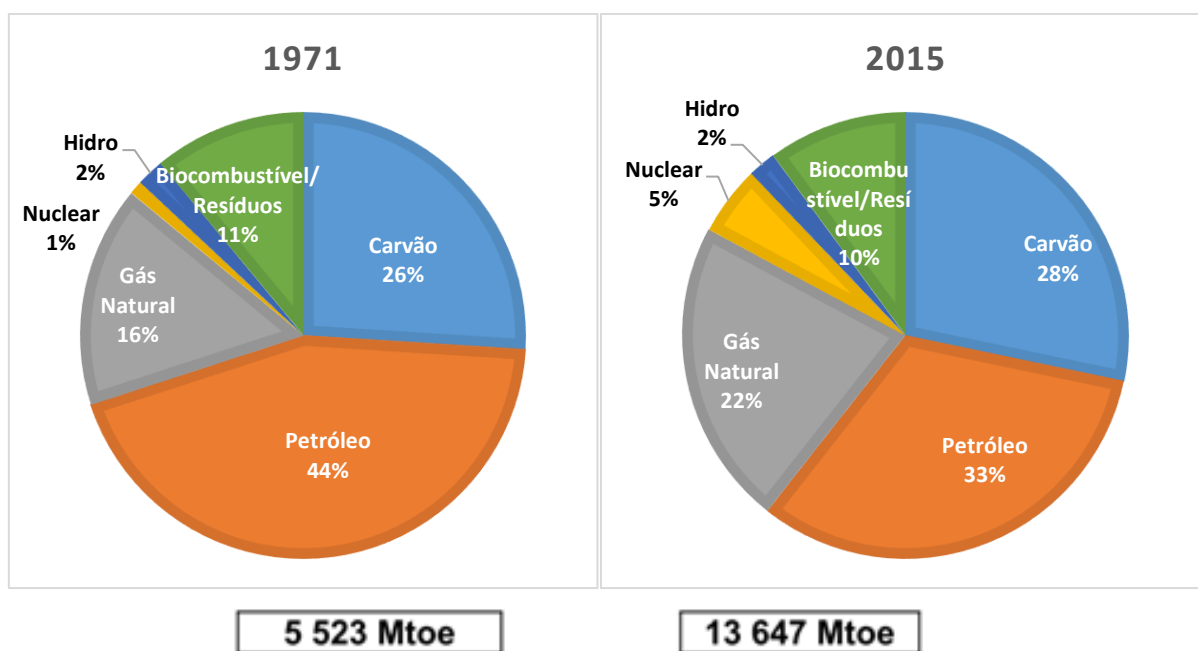


Fonte: Adaptado de Internacional Energy Agency (2017,p. 7).

A população mundial e a demanda por estes serviços e comodidades rapidamente cresce, o que consecutivamente aumenta o uso dos combustíveis fósseis, que por sua vez possuem um maior impacto nas mudanças climáticas, além de ser manifestamente insustentáveis nos requisitos econômicos, ambientais e sociais (NATERER et al.,2013). A quantificação mais atual do suprimento energético mundial por fonte está exibida na Figura 2, que compara o fornecimento dos anos de 1971 e 2015.

A maioria das atividades humanas produzem gases do efeito estufa (GEE) e sem uma ação decisiva as “emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas com o uso de energia serão mais do que duplicadas até 2050 e o aumento pela procura de energia fóssil ocasionará inseguranças ao seu fornecimento” (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016a). Tal preocupação é por conta que o setor de fornecimento energético é o maior emissor destes gases (Figura 3).

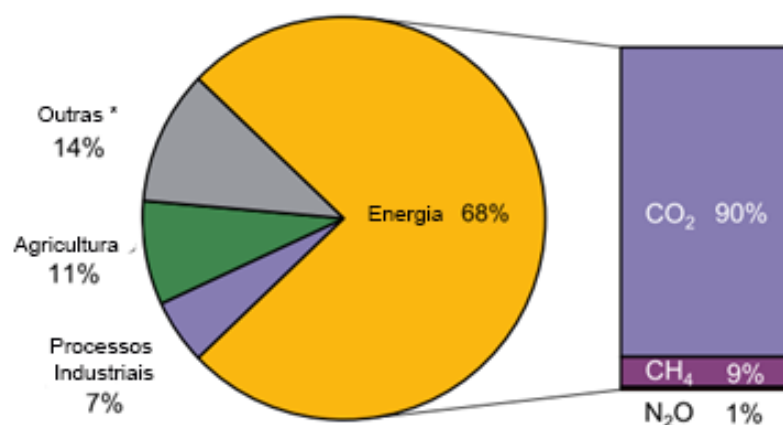
**Figura 2 - Total de Fornecimento de Energia Primária por Fonte Energética**



\* Neste gráfico turfa e xisto betuminoso são agregados ao carvão

Fonte: Adaptado de Internacional Energy Agency (2017b).

**Figura 3 - Estimativas Percentuais Globais Antropogênicas de GEE**



\*outros incluem queima de biomassa em larga escala, decaimento pós-queima, decaimento de turfa, emissões indiretas de N<sub>2</sub>O provenientes de emissões não agrícolas de NO<sub>x</sub> e NH<sub>3</sub>, resíduos e uso de solventes.

Fonte: Adaptado de Internacional Energy Agency (2016a).

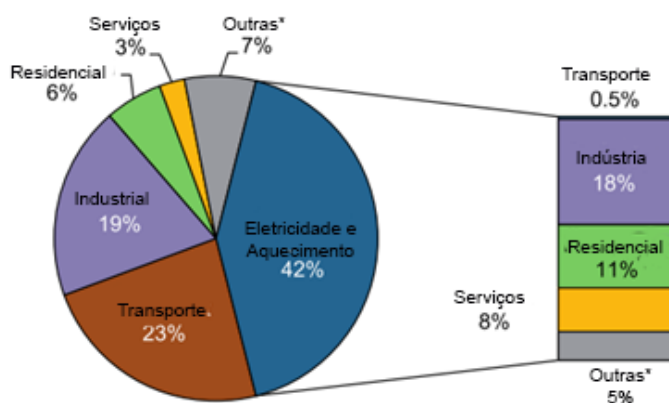
Conforme a ilustração acima (Figura 3) o uso da energia representa de longe maior emissor de GEE, cerca de três quartos das emissões totais, seguida pela soma



de 14% da queima de biomassa em grande escala e emissões indiretas de atividades não-agrícolas. As ações terciárias correspondem à agricultura, que produz principalmente CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O de atividades pecuárias e cultivo de arroz. Por último as atividades industriais não relacionadas à energia, emitindo gases fluorados e N<sub>2</sub>O.

Na classificação enquanto aos setores da economia, quase dois terços das emissões globais de dióxido de carbono provenientes da combustão de combustíveis fósseis foi da geração de eletricidade e calor em 2014, representando 42%, enquanto o setor de transporte representou 23% (Figura 4).

**Figura 4 - Emissões Mundiais de CO2 por Setor Econômico em 2014**



\*Nota: também mostra a alocação de eletricidade e calor para os setores de uso final

Fonte: Adaptado de Internacional Energy Agency (2016b).

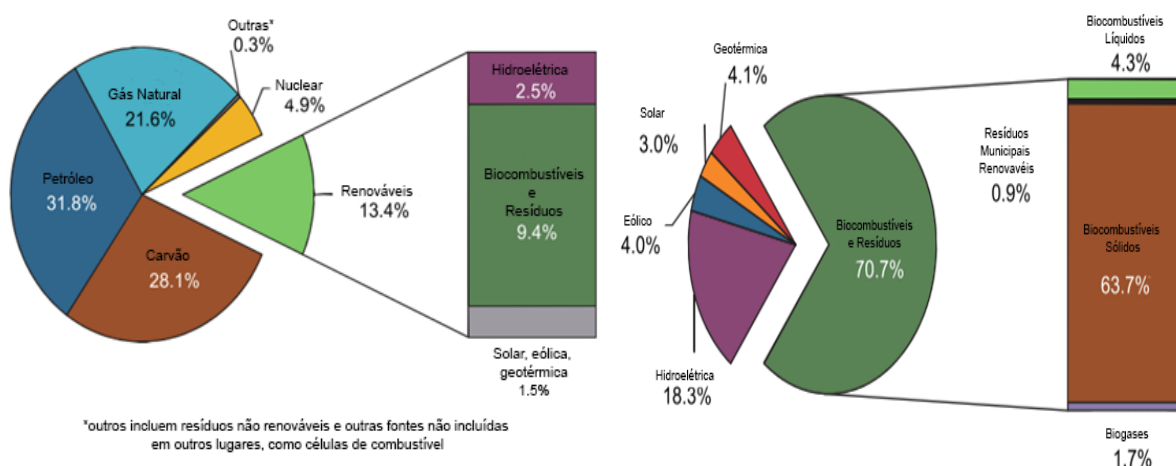
Em resposta a estes dados, em dezembro de 2016, 116 dos 196 países participantes ratificaram o acordo de Paris da COP21 e comprometeram-se a tomar medidas para manter o aquecimento global abaixo de 2°C (BRANDON; KURBAN, 2017).

Este acordo reajustou a ambição coletiva em relação as mudanças climáticas a partir da aspiração de atingir este objetivo, reduzindo 85% das emissões anuais globais de gases de efeito até 2050, implicando novas mudanças no conjunto da produção e uso de energia, da indústria e do transporte, por meio da implementação de energias renováveis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016a).

## 2.1.1 Energias Renováveis

De fato, o acordo de Paris representa um marco para a transição de sistemas energéticos com baixa emissão de carbono. O aumento de interesse desta missão climática foi possível, em parte, por meio das melhorias das tecnologias energéticas renováveis, tanto em relação ao custo quanto as possíveis rotas da redução dos gases do efeito estufa (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016a). Em 2015, o total de fornecimento de energia primária foi de 13,647 Mtep (Milão de tonelada equivalente de petróleo), dos quais 13,4% ou 1,823 Mtep foi de fontes renováveis, conforme mostra a Figura 5.

**Figura 5 - Fornecimento de energia primária em 2015 por tipo de fonte**



Fonte: Adaptado de Internacional Energy Agency(2017c).

Os biocombustíveis sólidos/carvão vegetal continuam sendo a maior fonte de energia renovável, representando 63,7% do fornecimento global, devido ao seu uso residencial para aquecimento e cozimento geralmente em países em desenvolvimento. Ocupando o segundo lugar, têm-se a energia hidrelétrica, que representa 2,5% em relação ao fornecimento mundial e 18,3% da oferta total de energia renovável. Os biocombustíveis geotérmicos, líquidos biológicos, biogás, energia solar, vento e maré possuem uma parcela menor que compõe o resto do suprimento energético.

Segundo a visão geral do relatório de renováveis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017c) desde 1990 a 2015, ocorreu um crescimento médio anual de 2% das fontes renováveis, em comparação a 1,8% dos combustíveis fósseis. Este aumento positivo ocorreu devido, especialmente, à energia solar fotovoltaica e eólica, que cresceram respectivamente taxas médias anuais de 45,5% e 24,0%. Os biogás apresentou a terceira maior taxa de crescimento em 12,8%, seguida de energia Termal Solar (11,4%) e biocombustíveis líquidos (10,1%).

Embora as energias renováveis sejam abundantes e limpas, e permitem a sociedade viver em um mundo mais sustentável, elas são na maior parte intermitentes e não possuem um estoque fixo, pois “o sol nem sempre brilha e o vento nem sempre sopra” (RIFKIN, 2012, p.69). Como exemplo deste fato, têm-se os níveis de água baixos nas hidrelétricas, por consequência das secas induzidas pelas mudanças climáticas.

Na maioria dos casos, as fontes renováveis de energia fornecem apenas eletricidade, obtendo-se combustíveis somente por meio da biomassa, demandando processos de conversão de eletricidade em combustíveis:

Além disso, a maioria das fontes renováveis produz energia de forma irregular, em razão da sazonalidade, o que exige o uso de sistemas complementares para garantir o suprimento. Quando os sistemas de produção de energia elétrica dessas fontes estão conectados às redes de transmissão e distribuição, em que grande quantidade de outros sistemas de natureza diversa está presente, as flutuações produzidas são compensadas entre si e/ou corrigidas por manobras na operação das usinas. (...) No entanto, quando os sistemas de fontes sazonais estão em grande quantidade e/ou a capacidade das fontes controladas não é suficiente para corrigir as variações, a rede atinge um nível de distorção inaceitável (SILVA, 2014, p.290-291).

Evidentemente, uma solução para esse problema é o armazenamento da energia produzida nos momentos ou períodos de maior geração. Existem várias tecnologias de armazenamento promissoras, no entanto o hidrogênio se destaca por ser um vetor de energia limpa, o qual pode ser produzido com base em praticamente todas as fontes de energia, renováveis ou não, com baixo ou zero carbono (ex. nuclear, água, biomassa, solar). Consequentemente hidrogênio pode ser convertido em eletricidade, em células sintéticas, em calor ou mesmo ser elemento fundamental na produção de combustíveis sintéticos (NATERER et al., 2013; SILVA, 2014).

Todas essas propriedades levaram muitos especialistas à conclusão de que o hidrogênio pode ser empregado como vetor energético de suma importância para o aproveitamento em larga escala de inúmeras fontes renováveis de energia (SILVA, 2014).

### 2.1.2 Matriz Energética Nacional

*“O Brasil é a Arábia Saudita da energia renovável, e tem de longe mais potencial por metro quadrado que qualquer outro país” (RIFKIN, 2012,p.21).*

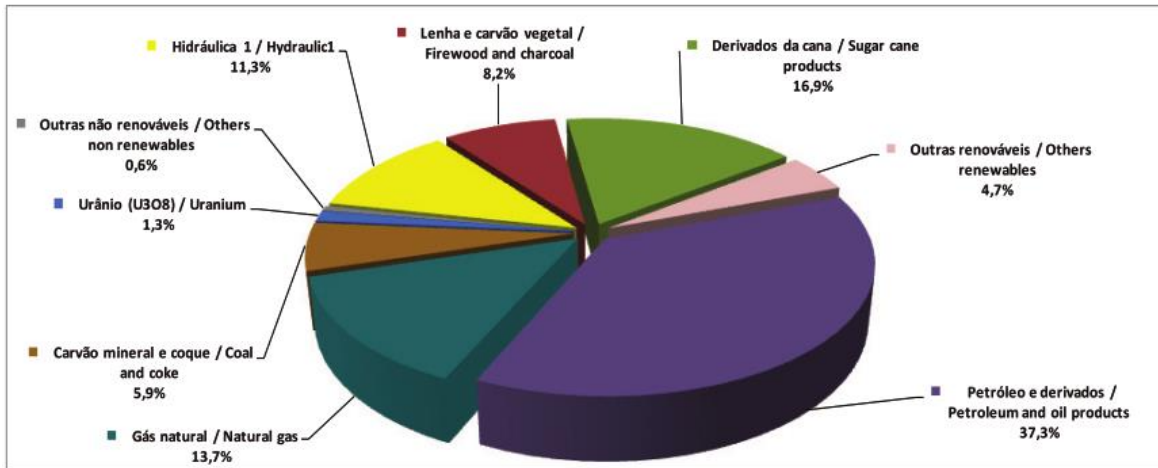
De acordo com Lima (2016), a matriz energética é o conjunto de recursos utilizados por um país para fornecimento da energia necessária para realização de seus processos produtivos. Apresentando uma base de dados para a análise de uma situação energética real, uma vez que apresenta toda a oferta de energia interna (perdas + consumo final) quantificada (LUCKEMEYER, 2010). Sendo um excelente indicador para o país, pois considera todas as destinações dos setores da economia (LIMA, 2016).

O Brasil dispõe de uma matriz energética bastante diversificada, sendo composta por 41,2% de fontes renováveis, com destaque para derivados da lenha e carvão vegetal em 8,2%, seguido da geração hidráulica que responde a 11,3%. Ao passo que os combustíveis fósseis e não-renováveis representam ainda 58,8% deste quadro (ver figura 6).

O processo de diversificação da matriz, como forma de manter a segurança e autossuficiência energética de um país, tornou-se mais evidente nos últimos anos. Até 1970, apenas duas fontes, lenha e petróleo, eram responsáveis por 78% de toda a demanda brasileira. Em 2005, o cenário já apresentava uma maior pluralidade e os produtos da cana de açúcar e a hidroeletricidade passaram a figurar como fontes energéticas de destaque, em conjunto com o petróleo e a lenha (ver figura 7). Estas quatro representavam 80,3% do consumo energético total em 2005 (LIMA, 2016). Em 2015, a geração distribuída atingiu 34,9 Gigawatt-hora (GWh) com uma potência instalada de 16,5 Megawatt (MW), com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com

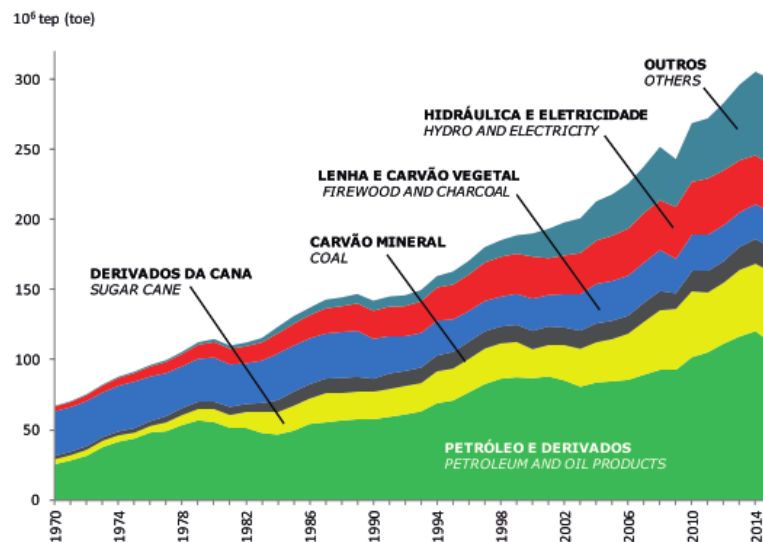
20GWh e 13,3 MW de geração e potência instalada respectivamente (BRASIL, 2016b).

**Figura 6 - Oferta Interna de Energia em 2015**



Fonte: Brasil (2016).

**Figura 7 - Evolução da Oferta Interna no Brasil**



Fonte: (BRASIL, 2016b).

Sendo assim, o Brasil possui recursos naturais renováveis abundantes e cujo desenvolvimento de tecnologias para a economia do hidrogênio contribuirá positivamente para o uso mais eficiente dessas fontes energéticas. Desta forma, o engajamento do país na corrida para implementação desta tecnologia alternativa é

altamente benéfica nos pontos de vista econômicos, tecnológicos e socioambientais (MOREIRA et al., 2013).

## 2.2 HIDROGÊNIO

“Um vetor potencialmente emergente para a transição e diversificação da matriz energética e dos sistemas de transportes é o hidrogênio (VERAS et al., 2017)”.

Em pleno setembro de 2017 ao seguir os passos do autor Aldo V. da Rosa (2015) digitando *hydrogen use* no Google, são encontrados cerca de 31.400.000 ocorrências, em contrapartida aos 3.730.000 de resultados ao final de 2011. Isto atesta uma evolução de dados e interesses neste elemento a uma proporção próxima de 8,5 maior. A lógica seria mesmo explorar cada vez mais o gás que é o elemento mais simples, mais leve e mais abundante do vasto universo, estima-se que seus átomos representam cerca de três quartos de sua massa elementar (ACAR;DINCER, 2013).

O hidrogênio também é encontrado em grande parte da Terra, mas raramente circula livremente na natureza em seu estado elementar. Por ser quimicamente ativo se combina com outros elementos como o oxigênio, formando água e outros compostos orgânicos, sendo o oceano o seu maior reservatório (CAMPANHOTO, 2016, p.34).

Embora muito abundante, o hidrogênio, diferente dos combustíveis fósseis, não é considerado uma fonte energética devido a sua maior parte existente estar justamente ligada a outros compostos (ROSA, 2015, p.377). Desta forma é necessário extraí-lo de outras fontes de energia para utilizá-lo, como o carvão, o petróleo, o gás natural, entre outros, consumindo assim algum tipo de energia primária para sua produção (GODOY, 2013; MOYA, 2016; RIFKIN, 2012, p.70). Portanto, é classificado como um promissor e excelente vetor de energia<sup>1</sup> para:

---

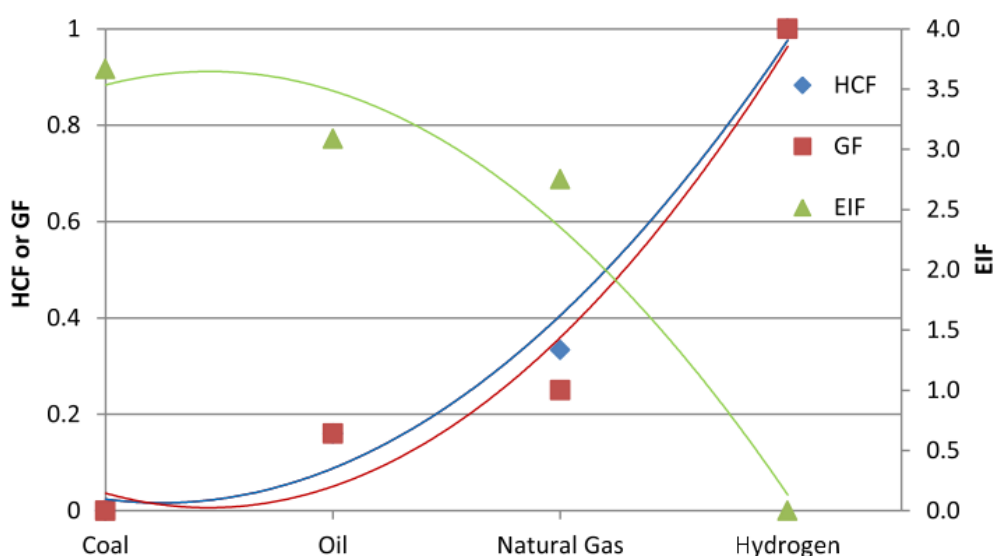
<sup>1</sup> **Vetor energético:** carreador de energia, uma outra denominação para fonte de energia secundária (ROSA, 2015).

- I. Combustível de veículos terrestres e aquáticos, com o uso de células a combustível de alta eficiência;
- II. Combustível para aeronaves de grande porte e naves espaciais devido à alta razão energia/peso quando na forma criogênica;
- III. Combustível doméstico e industrial para geração de calor e eletricidade;
- IV. Um meio de transportar grande quantidade de energia em longas distâncias.

Junto com os itens de alta eficiência este vetor é muito pesquisado pela comunidade mundial devido a possibilidade de reduzir os impactos ambientais, uma vez que sua queima é de forma limpa, gerando apenas água (GREENPEACE, 2016).

Entre as pesquisas realizadas por Dincer e Acar (2015), os autores trazem em suas mais recentes publicações uma comparação do hidrogênio com outros combustíveis convencionais, em termos de Fator Impacto Ambiental (EIF) baseado na quantificação de CO<sub>2</sub> (kg) durante a reação de combustão; Fator *Greenization* (GF) obtido pela diferença e razão do EIF; Fator Conteúdo de Hidrogênio (HCF), se referindo ao teor de H<sub>2</sub> (kg) no combustível em razão da massa total – Gráfico 1.

**Gráfico 1 - Comparação do Hidrogênio com Combustíveis Convencionais**



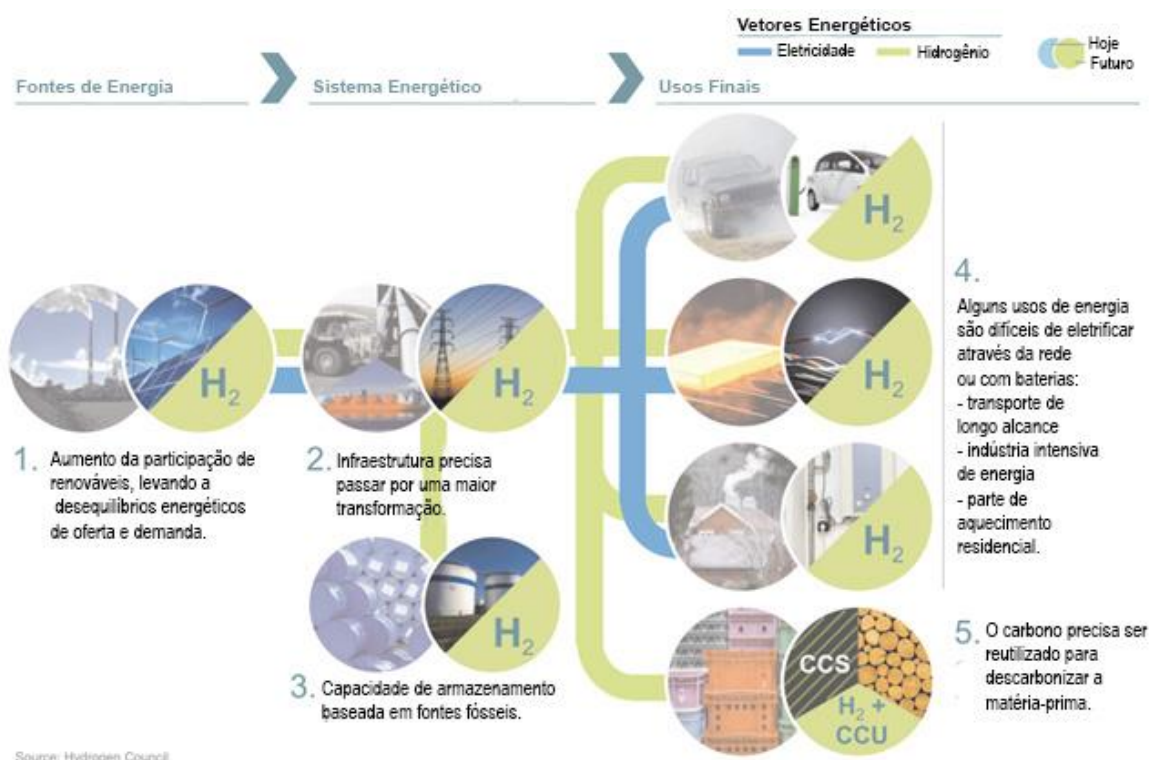
Fonte: (DINCER; ACAR, 2015).

Como se pode observar existe a vantagem na descarbonização, pois o aumento da concentração de hidrogênio no combustível proporciona uma fonte de energia mais verde uma vez que seu fator de impacto ambiental é reduzido.

Além disto, outra propriedade importante é que este pode ser produzido com base em praticamente todas as fontes de energia, renováveis ou não, e ser associado em larga escala a fontes renováveis de energia, como sistemas de aproveitamento de energia solar, principalmente fotovoltaica, eólica e dos oceanos, tanto para produção de combustível quanto para estocagem de energia (SILVA, 2014).

Tendo a transição de energias renováveis o centro das atenções de políticas globais ambientais, o hidrogênio é considerado um grande candidato para auxiliar na economia de baixo carbono do atual regime energético baseado em combustíveis fósseis. E para isso é necessária uma grande mudança de paradigma em cinco grandes áreas de investimentos, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Transição Energética com Vetor Energético de Baixo Carbono



Fonte: Adaptado de Council (2017, p.8)



Conforme está esquematizado pelo Conselho do Hidrogênio os cinco desafios principais da economia podem ser muito bem desempenhados por este vetor energético conforme explica o Quadro 3 a seguir.

**Quadro 3 - Transição do Regime Energético**

<b>Otimização Sistema Energias Renováveis</b>	Pode ser produzido com o excesso de energia em períodos de alta produção, possuindo a aplicação tanto para valorização nos setores de transporte, indústria ou calor residencial quanto para reserva futura em períodos sazonais, a exemplo o inverno europeu, em que a oferta de ER é baixa e a demanda é alta. Potencializando assim os futuros mercados globais de energia (DINCER; ACAR, 2015)
<b>Transformação Infraestrutura</b>	Hoje 30% da economia global é comercializado entre fronteiras. Nova combinação de fornecimento de energia centralizada e descentralizada a nível nacional e local, reduzindo a dependência de petróleo (SILVA, 2014).
<b>Reserva</b>	O carregamento do sistema de energia com uma reserva de 15 % da demanda anual total de energia do mundo é uma forma estratégica de antecipar desequilíbrios de oferta e demanda, pois possui diferentes formas de armazenamento, por exemplo: gasosa, líquida ou em conjunto com hidretos metálicos (SILVA, 2014).
<b>Uso Final em Setores</b>	Em setores de transporte e transformação, onde obstáculos tecnológicos e econômicos impedem a eletrificação direta, o hidrogênio oferece uma solução viável, permitindo o transporte de longa distância.
<b>Descarbonização</b>	As emissões de queima ao final do ciclo de vida de produtos a base de combustíveis fósseis podem ser descarbonizados combinando o hidrogênio com a captura de carbono e armazenamento (CCS) elencando com sua utilização (CCU).

Fonte: Adaptado de Council (2017, p.9).

### 2.2.1 Processos de Produção

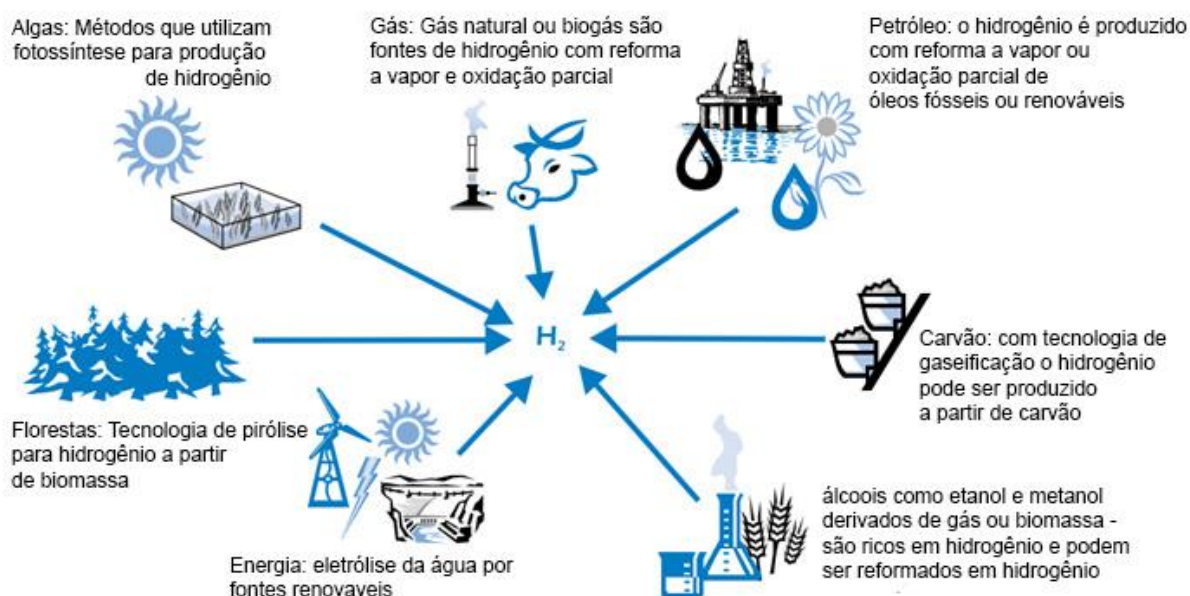
Conforme citado o hidrogênio é uma promissora fonte de energia e pode ser produzido por diversas fontes. As alternativas incluem recursos não-renováveis como combustíveis fósseis, a exemplo o petróleo, gás natural e carvão, bem como recursos

renováveis, como a biomassa, água, luz solar, vento, oceano ou energia hidráulica (SILVA, 2014). Pode ser utilizada uma variedade de tecnologias de processo, incluindo produtos químicos, biológicos, eletrolíticos, fotolíticos e termoquímicos (CHAUBEY et al., 2013). Pode se encaixar em categorias de grande, média e pequena escala, como também para uso de geração de eletricidade residencial e aquecimento da água de forma compacta ou local (ROSA, 2015).

A escolha de várias opções para produção do hidrogênio depende de fatores como: disponibilidade local de matérias-primas, maturidade da tecnologia, aplicações de mercado, demanda, questões políticas e custos (IEA, 2006). Uma visão geral das várias matérias-primas e tecnologias dos processos de produção do hidrogênio é apresentada na Figura 9 além de uma breve descrição de cada tipo de processo sintetizado no Quadro 4.

Na contemporaneidade, 96% da produção de hidrogênio estão baseadas em tecnologias que se utilizam de combustíveis fósseis como fonte de energia, sendo que 48% de toda a produção obtida pela reforma a vapor do gás natural; 30% por oxidação de hidrocarbonetos e 18% por oxidação do carvão (BRAGA, 2015; ROSA, 2015). A Figura 9 apresenta alternativas de processos de geração de H<sub>2</sub>.

**Figura 9 – Algumas alternativas de alimentação e processos de geração de H<sub>2</sub>**



Fonte: Adaptado de IEA (2006).

A produção de gás hidrogênio no Brasil está voltada ao uso industrial, sendo inexistente o seu uso para fins energéticos até as primeiras décadas do século XXI. O hidrogênio é insumo químico de grande aplicação em diversos setores industriais, como petroquímico, siderúrgico, metalúrgico, fertilizantes, alimentícia e muitos outros (SILVA, 2014, p.294).

Adicionalmente, ele é um importante químico constituinte de muito materiais usados na indústria e na sociedade: plásticos, comidas, fármacos, fertilizantes, materiais metálicos e de construção, etc. (NATERER et al.,2013). “Estima-se que em 2004 a produção de hidrogênio tenha superado a 425 mil toneladas, sendo que apenas a Petrobras tenha produzido 180 mil toneladas” (PETROBRAS, 2007 apud NICODEMOS; LIMA; ASSIS, 2011).

**Quadro 4 – Processos de Produção de Hidrogênio**

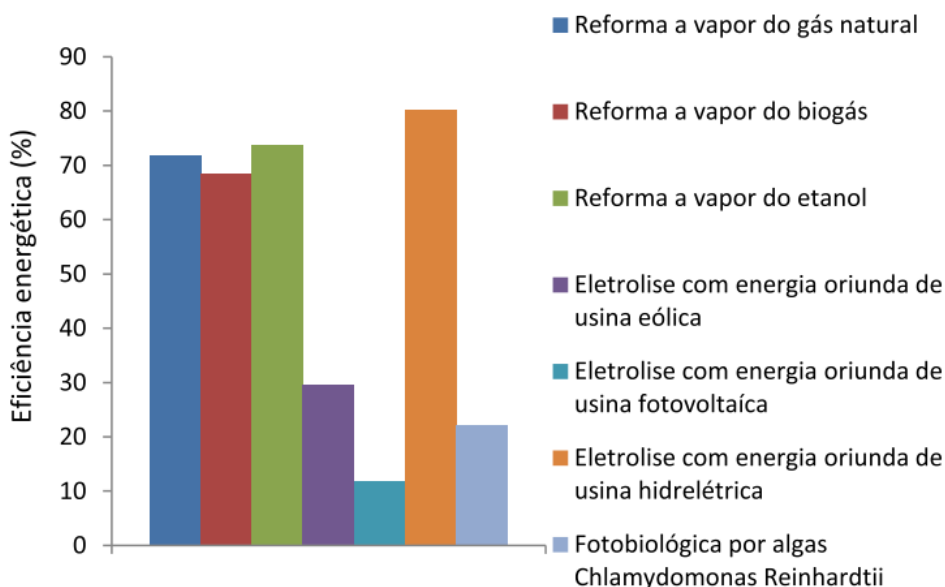
<b>Continua...</b>			
<b>Processos</b>	<b>Descrição</b>	<b>Métodos</b>	<b>Fontes</b>
<b>Químicos</b> (ROSA, 2015, p.382-394)	Utilização de matéria prima fóssil ou renovável, como hidrocarbonetos e álcoois, para promover as reações químicas que promovem hidrogênio. Produção de subprodutos CO, CO <sub>2</sub> e SO <sub>2</sub> , sendo necessário etapas de purificação.	Hidrólise (água-metal); Oxidação parcial; Reforma a vapor; Decomposição térmica;	Recursos Naturais Catalisadores Combustíveis Fósseis (Petróleo, Gás Natural, Nafta)
<b>Eletrolítico</b> (BRAGA, 2015; IEA, 2006)	Utilização de energia elétrica para promover a reação química de decomposição da molécula de água em hidrogênio e oxigênio.	Eletrólise da água (processo convencional); Células a Combustível (Alcalinas, PEM, Óxido Sólido).	Eletricidade; Soluções químicas; Energia eólica, hidráulica, solar, geotérmica..
<b>Termolítico</b> (IEA, 2006; ROSA, 2015)	Com o aquecimento da molécula da água em temperaturas elevadas, é possível dissociá-la em H <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> .	Dissociação direta com vapor água	Energia Térmica Produtos Intermediários

			<b>Conclui.</b>
<b>Fotolítico</b> (ROSA, 2015)	Utilização da energia dos fótons, provindos da energia solar para dissociar a água.	Células fotoeletrolíticas	Catalisadores; Energia Solar.
<b>Biológicos</b> (DUTTA, 2014; ROSA, 2015)	Utilização de algas, que usam CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O sob condições anaeróbicas, durante a conversão de resíduos orgânicos em ácidos orgânicos tendo como subproduto o hidrogênio.	Biofotólise de algas verdes ou cianobactérias.	Resíduos de biomassa ricas em carboidratos.

Fonte: Elaborado pela autora.

Em seu trabalho de tese, Lúcia Bollini Braga (2015) realizou estudos técnicos, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio, sendo eles: reforma a vapor de etanol, gás natural e biogás, algas e via eletrólise da água por fontes renováveis (eólica, fotovoltaica e hidrelétrica). As relações comparativas das eficiências energéticas dos processos de produção de hidrogênio são mostradas na Figura 10.

**Figura 10 - Comparativo das eficiências energéticas por processos de produção de H<sub>2</sub>**

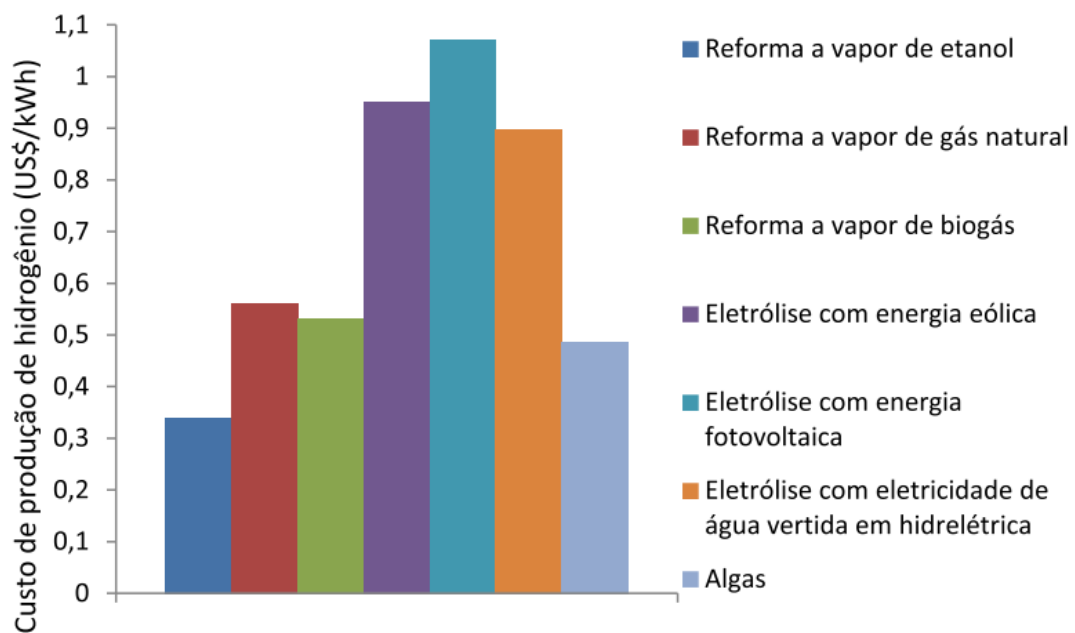


Fonte: Braga (2015, p.87).

Segundo este levantamento, os processos de produção de hidrogênio que apresentam maiores eficiências são os sistemas reforma a vapor (gás natural, biogás e etanol) e eletrólise com energia oriunda de hidrelétrica. Sob o ponto de vista energético, a reforma a vapor por etanol possui uma eficiência de 79,05% devido a sua menor temperatura de operação (400°C) quando comparado com os outros processos da categoria e sua alta taxa de conversão de energia em eletricidade.

Outro destaque para o processo de reforma a vapor via etanol é seu baixo custo em relação aos demais ao passo que o maior custo cabe a eletrólise a partir de energia fotovoltaica conforme comparativo apresentado na Figura 11.

**Figura 11 - Comparativo Custo de Produção de Hidrogênio**



Fonte: Braga (2015, p.104).

Segundo a autora os custos de investimentos influenciam de forma crucial no custo inicial e final de hidrogênio produzido, sendo diminuídos conforme o período de amortização do capital e aumento do período equivalente de uso. E enfim, são exibidos os resultados de eficiência ecológica destes processos, sendo a produção fotobiológica por algas e a reforma a vapor do biogás o que alcançaram o melhor desempenho de 100% em virtude de emissões evitadas para o meio ambiente. A Tabela 2 apresenta os dados comparativos da eficiência ecológica do processo.

**Tabela 2 - Comparativo Eficiência Ecológica por Processo de Produção de H2**

Processos	(CO <sub>2</sub> )e [kgCO <sub>2(e)</sub> /kg comb]	Indicador [kgCO <sub>2(e)</sub> /kgH <sub>2</sub> ]	ε [%]
Reforma a vapor do etanol	3,56	39	90
Reforma a vapor do etanol*	2,03	21	92,13
Reforma a vapor do gás natural**	7,52	25,05	91,63
Reforma a vapor do biogás	3,14	16,87	92,54
Reforma a vapor do biogás***	-	-	100
Eletrólise com energia de Usina eólica	-	0,60	94,9
Eletrólise com energia de Usina fotovoltaica	-	2,05	93,46
Eletrólise com energia de hidrelétrica com reservatório	-	0,34	99
Algas	-	-	100

\*considerando o ciclo do carbono

\*\* considerando a sua obtenção

\*\*\*considerando o metano que deixa de ser emitido

Fonte: Braga (2015, p.118).

### 2.2.2 Hidrogênio Sustentável

Para aproveitar ao máximo a economia do hidrogênio esta precisa ser produzida a partir de fontes renováveis ou com baixo custo. Na literatura, existem vários estudos enfocando como hidrogênio pode ser uma solução mais eficaz desempenhando um papel de contribuição para a sustentabilidade (DINCER, 2012, 2013; ANDREWS; SHABANI, 2014; DINCER e ACAR, 2015; MANSOURI; CALAY, 2012; NATERER et al., 2013; PAULISTA, 2015; VOLDSUND et al., 2016).

Dentre os possíveis métodos de produção de hidrogênio estudados na literatura, o processo de reformulação a vapor de gás natural é o processo mais comumente utilizado, resultando em emissões de GEE consideráveis. Cerca de 50% da procura global de hidrogênio é satisfeita com a reforma a vapor do gás natural, 30% provêm da reforma do petróleo, 18% da gaseificação do carvão, 3,9% da eletrólise da água e 0,1% de outras fontes (DINCER; BALTA, 2011).

Ainda, segundo Ngho e Njomo (2012, *apud* Braga 2015) a média de dióxido de carbono emitido para a atmosfera pelo processo de reforma a vapor está na ordem

de 9 kg CO<sub>2</sub>/kg de hidrogênio produzido. Ou seja, o hidrogênio apenas pode ser considerado com um combustível livre de emissões atmosféricas poluentes se produzido a partir de fontes sustentáveis.

Para eliminar os efeitos adversos da utilização de combustíveis fósseis na saúde humana e no meio ambiente, o hidrogênio deve ser produzido a partir de fontes limpas e abundantes com métodos ambientalmente benignos, tal conceito é denominado produção de hidrogênio verde (DINCER e ACAR, 2015).

Entre os vários autores que previamente estudaram a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, especificamente com água, Lodhi (1987) é considerado um pioneiro em análise da dissociação a alta temperatura, separação termoquímica, eletrólise e fotólise da água. Mais tarde, Lodhi (2004) classificou a energia solar, mar/oceano, hidro, eólica e nuclear como fontes primárias verdes para produção de hidrogênio. Ainda, listou materiais verdes para sua geração como água do mar, sulfeto de hidrogênio e biomassa. Desta forma, os métodos para produção de hidrogênio podem ser denominados *verdes* com base na sua fonte de energia primária e/ou do material de extração (MILTNER et al., 2010).

Nos estudos de Dincer e Zamfirescu (2012) os pesquisadores identificaram cinco possíveis maneiras de produzir hidrogênio de forma sustentável. Como indicado pela Figura 12 elas são: hidrólise, descarbonização de hidrocarbonetos fósseis, decomposição de sulfetos de hidrogênio, conversão de biomassa para hidrogênio e extração de hidrogênio de resíduos resultantes da atividade antropogênica. Cada caminho corresponde a um recurso natural (incluindo o lixo antropogênico) a partir do qual o hidrogênio pode ser extraído. Para qualquer uma das vias, é possível o uso de uma combinação específica de energia sustentável (ver Figura 12, item b) e método de produção de hidrogênio (ver Figura 12, item c).

**Figura 12 - Fontes renováveis de produção de hidrogênio (a), fontes de energia sustentáveis (b), métodos (c) e formas sustentáveis de produção de hidrogênio (d).**



Fonte: Adaptado de Dincer;Zamfirescu(2012).

É importante destacar que apesar dos critérios de energia renovável para classificação em hidrogênio sustentável, existem impactos ambientais intrínsecos ao processo de geração de energia por meio de fontes como eólica, solar, hidráulica, entre outras fontes renováveis, 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. Objetivamente esta metodologia 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 (VIOLA, 2015).

Outros métodos de avaliar os impactos ambientais e socioeconômicos são as matrizes de interações, que consistem em uma listagem de controle bidimensional que dispõem em seus eixos, os fatores ambientais afetados versus as ações indutoras de impactos, classificando tais elementos em efeitos prováveis ao meio externo. Sendo eficientes tanto para identificação de impactos diretos quanto relacionar as interações entre os fatores ambientais e os componentes de um projeto (CREMONEZ et al., 2014). Tal método será melhor abordado mais adiante no item 3.2.2 deste estudo.

### 2.2.3 Aspectos Socioeconômicos e Ambientais

“As formas de energia definem a natureza das civilizações – como elas são organizadas, como os frutos do comércio e transações comerciais são distribuídos, como o poder político é exercido e as relações sociais são conduzidas (RIFKIN, 2012,p.129)”.

Foi apresentada a afirmação que a diversificação de energia primária do futuro está dependente dos impactos ambientais e das possibilidades de encontrar novas fontes de energia. No entanto, a matriz energética depende de um importante componente de gestão de fontes energéticas que é chamado de “economia”. Pode-se entender a economia de uma fonte energética como sendo a mensuração de sua viabilidade e aceitabilidade social (PAHWA; PAHWA, 2014).

Em 1970 originou-se o conceito de “Economia do Hidrogênio” em resposta à primeira crise do petróleo. É uma expressão que se refere a um sistema de energia baseado no hidrogênio. Seis anos mais tarde foi realizada a primeira Conferência Mundial do Hidrogênio identificando o elemento como um vetor energético limpo para o futuro e como opção de mudança do regime energético dominante (ROHRICH, 2008, p.35).

Em seu rigor intelectual com prosa animada e envolvente o economista Rifkin (2003,2012,2016) argumenta intensivamente que as grandes revoluções econômicas da história ocorreram quando novas tecnologias de comunicação convergiram com

novos sistemas tecnológicos. O Quadro 8 resume esta curva de evolução relacionando infraestrutura de comunicação e energia.

**Quadro 5 - Matriz de Energia-Comunicações 1ª e 2ª Revolução Industrial**

PRIMEIRA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	SEGUNDA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL
Invenção da máquina a vapor e sua aplicação na produção têxtil	Aparecimento simultâneo do fornecimento centralizado de energia elétrica, da era do petróleo e do automóvel.
Combustível: Carvão	Combustível: Petróleo
Comunicação: Telégrafos, jornais.	Comunicação: Telefone, televisão, rádio, internet (anos 90)

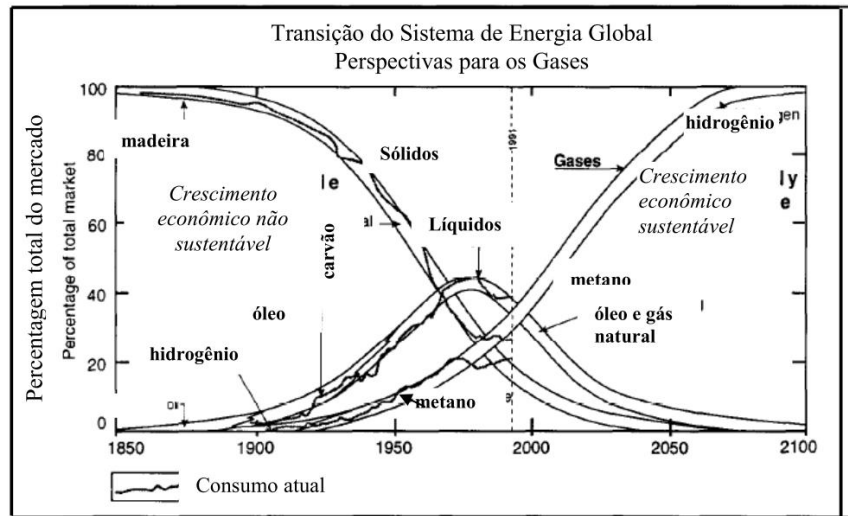
Fonte: (RIFKIN, 2003).

Em menos de um século, a madeira dera lugar ao carvão, e o carvão dera lugar ao petróleo e, mais recentemente, parte do mercado do petróleo pelo gás natural. A “descarbonização” da energia, termo empregado para referir-se à proporção variável entre átomos de carbono e de hidrogênio conforme as fontes de energia se sucedem, se traduz na diminuição de emissão de CO<sub>2</sub> a cada fonte sucessiva (ROHRICH, 2008). Jesse Ausubel apud Rifkin (2003) resume a relevância histórica da trilha energética que o mundo percorreu:

O fato mais importante (...) a emergir dos estudos de energia é que por 200 anos o mundo favoreceu progressivamente os átomos de hidrogênio em detrimento dos de carbono. (...) A tendência à “descarbonização” é essencial para que se compreenda a evolução do sistema de energia.

Considerando as possibilidades de mudanças até o ano de 2100, Hefner III (1995) apud Rohrich (2008) mostra a transição dos combustíveis sólidos para os combustíveis líquidos, e de acordo com a Figura 13, o autor mostra que a sociedade estaria no momento da substituição dos combustíveis líquidos pelos gasosos, que gradativamente alcançaria o hidrogênio.

**Figura 13 - Substituição energética mundial**

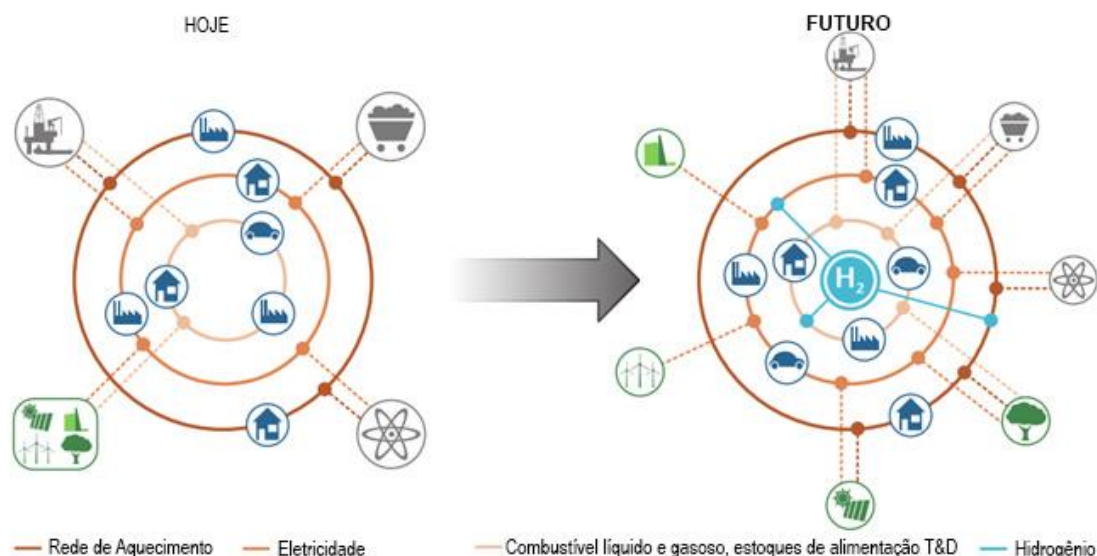


Fonte: Hefner apud Rohrich (2008).

Tal ilustração evidencia que desde o século XIX, até as perspectivas para o final do século XXI, a população mundial teve significativa elevação nos padrões econômicos e melhoria na qualidade de vida. Com o tempo, o uso de energia pela civilização se tornou cada vez mais essencial, pois a energia representa todas as atividades econômicas. A figura mostra, para a década atual e para todo o século XXI, a diminuição no uso dos combustíveis líquidos concomitantemente ao aumento na adoção dos combustíveis gasosos, os quais poderão atender à demanda energética e também contribuir para que o crescimento econômico se torne mais sustentável.

O hidrogênio completa esta jornada da descarbonização. Uma representação esquemática do sistema energético atual e um potencial sistema energético de baixo carbono do futuro são exibidos na Figura 14. A diferença chave reside em diferentes vetores energéticos utilizados para o transporte, construção e indústria, e em particular, a tecnologia e desenvolvimento (T&D) da eletricidade. O sistema energético atual é fortemente centralizado e dependente dos combustíveis fósseis, além de existir poucas conexões entre os diferentes sistemas de T&D. Em um sistema futuro, o hidrogênio poderia desempenhar um papel fundamental conectando diferentes camadas de infraestrutura por meio da descentralização em um meio de baixo carbono, segundo hipóteses demonstradas na figura a seguir (IEA, 2015).

**Figura 14 - Sistema de Energia Atual e no Futuro**



Fonte: Adaptado de IEA (2015).

Convergindo com a comunicação WEB cria uma nova e poderosa infraestrutura para uma Terceira Revolução Industrial (TRI) que mudaria o mundo. Nos anos que se aproximam, prevê-se que centenas de milhões de pessoas produzirão a própria energia verde em suas casas, escritórios e fábricas, e a compartilharão entre si em uma “internet de energia”, assim como as pessoas criam e compartilham informação on-line. A democratização da energia trará consigo uma reorganização das relações humanas, influenciando na condução dos negócios, na administração pública, educação dos filhos e engajamento na vida cívica (RIFKIN, 2012, p. 24).

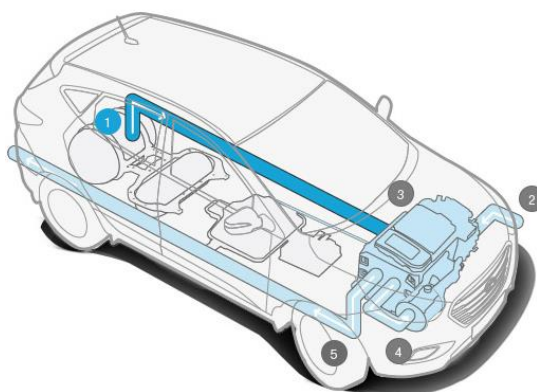
Seguramente, este estilo de vida necessita um planejamento estratégico para superar as diferenças e a transformação da “economia baseada fortemente em combustíveis fósseis”. Portanto, a estratégia de introdução deve ser planejada não em termos de confronto com os outros vetores de energia, mas em termos de busca de convergências e sinergias (SUELVES et al., 2016).

Como exemplo significativo da necessidade de mudanças na produção e uso de energias, têm-se o setor de transporte. Conforme visto, esta parcela da economia representa quase um quarto das emissões globais de CO<sub>2</sub>. Além disso, os veículos com combustíveis tradicionais são responsáveis por uma quantidade significativa de poluição do ar nas megacidades do mundo, o qual estima-se a causa de 6,5 milhões de óbitos prematuros em 2012 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016a).

Na revisão bibliográfica de Brandon e Kurban (2017) são apresentadas os processos e oportunidades de produção e uso do hidrogênio para as grandes áreas da economia, inclusive para o setor de transporte. Em relação aos veículos de transporte doméstico, o lançamento de células a combustível (CC) alimentados com hidrogênio foi iniciado em 2015 pelas companhias Toyota, Honda e Hyundai com as estreia no mercado do Toyota Mirai, Honda Clarity e Hyundai Tucson.

Ambas as tecnologias utilizam o gás hidrogênio comprimido como combustível, o qual está direcionado por meio de cabos de fibra de carbono reforçado ao tanque de suprimento – Figura 15. Após isto o ar externo é inflado para a CC e juntamente com o  $H_2$  por meio de reações químicas é gerado eletricidade a fim de suprir o motor e a bateria do veículo. Ao final, o único produto destas reações é água que sai por meio do tubo de escape, sendo assim, zero emissões veiculares (HONDA, 2017; HYUNDAI, 2017; TOYOTA, 2017).




**Figura 15 - Funcionamento de Veículo Movido a Hidrogênio**



Fonte: (HYUNDAI, 2017)

Um comparativo entre os modelos atualmente disponíveis no mercado é exibido no Quadro 9. Os custos destes veículos são bastante elevados, mas está previsto a dissipação destes veículos para todas as classes sociais, já que as companhias automobilísticas se beneficiam da aprendizagem e transição da economia (BRANDON; KURBAN, 2017).

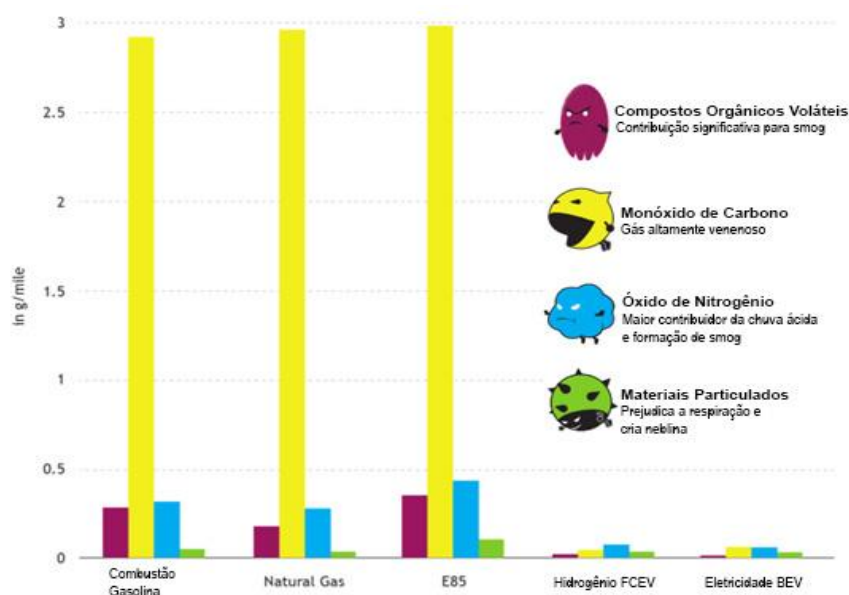
**Quadro 6 - Comparativo entre veículos à hidrogênio disponíveis no mercado**

Veículo	Honda Clarity	Toyota Mirai	Hyundai Tucson
			
Célula	Proton Exchange Fuel Cell (PEMFC)	Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell	Proton Exchange Fuel Cell (PEMFC)
Armazenamento Tanque	5,46 kg	Aprox. 5 kg	140 litros
Escala de Condução	589 km	502km	426km
Tempo de Abastecimento	3 – 5 min	Aprox. 5 min	Menos de 10 min
Preço <i>Sem impostos e taxas</i>	\$ 16.152,00	\$15.063,00	\$20.963,00

Fonte: Elaborado pela autora (HONDA, 2017; HYUNDAI, 2017; TOYOTA, 2017).

Em ambos os veículos é notória a condição de emissão de poluentes atmosféricos a quase zero. No parecer da *Partnership California Fuel Cell (2016)* é mostrado o resultado do relatório de emissões de gases do efeito estufa, emissões reguladas e o uso de energia no modelo de transporte – GREET. Na Figura 16 apresenta-se um comparativo de emissões de poluentes por tipo de combustível veicular assumindo modelos circulados na Califórnia.

**Figura 16 - Emissão de Poluentes por Tipo de Combustível - Califórnia**

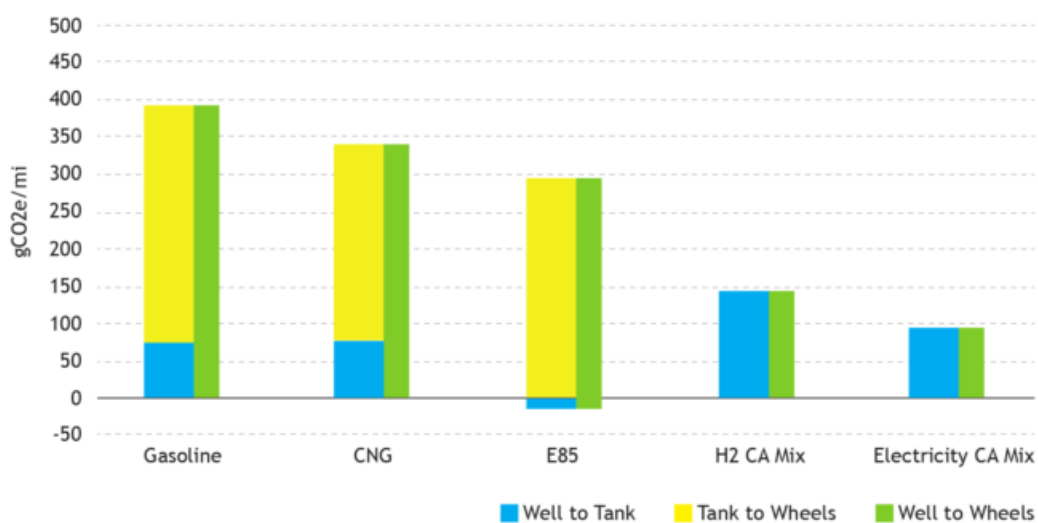


Fonte: GREET apud Partnership California Fuel Cell (2016).

Segundo Hall apud *Partnership California Fuel Cell* (2016) que estudou a relação direta entre saúde e qualidade do ar, “Ar sujo é como um balão de chumbo de \$28 bilhões em nossa economia”. Em somatória, na tese de simulação da rodovia do hidrogênio Brasil - Paraguai a análise ambiental de Godoy (2013) considerou as emissões evitadas de carbono com a substituição de óleo Diesel por hidrogênio eletrolítico em toda a frota de veículos, chegando a uma estimativa de redução na ordem de 2.098 toneladas de CO<sub>2</sub>/ano.

Desta forma é possível perceber a contribuição positiva para a população mundial tanto socialmente quanto economicamente quando existirem mais rodovias do hidrogênio além das atuais localizadas na Califórnia e Eslováquia e as previstas no Japão e Europa (GODOY, 2013). Na Figura 17 está retratada a quantificação de emissões de gás carbônico.

**Figura 17 - Gases do Efeito Estufa (CO<sub>2</sub>)**



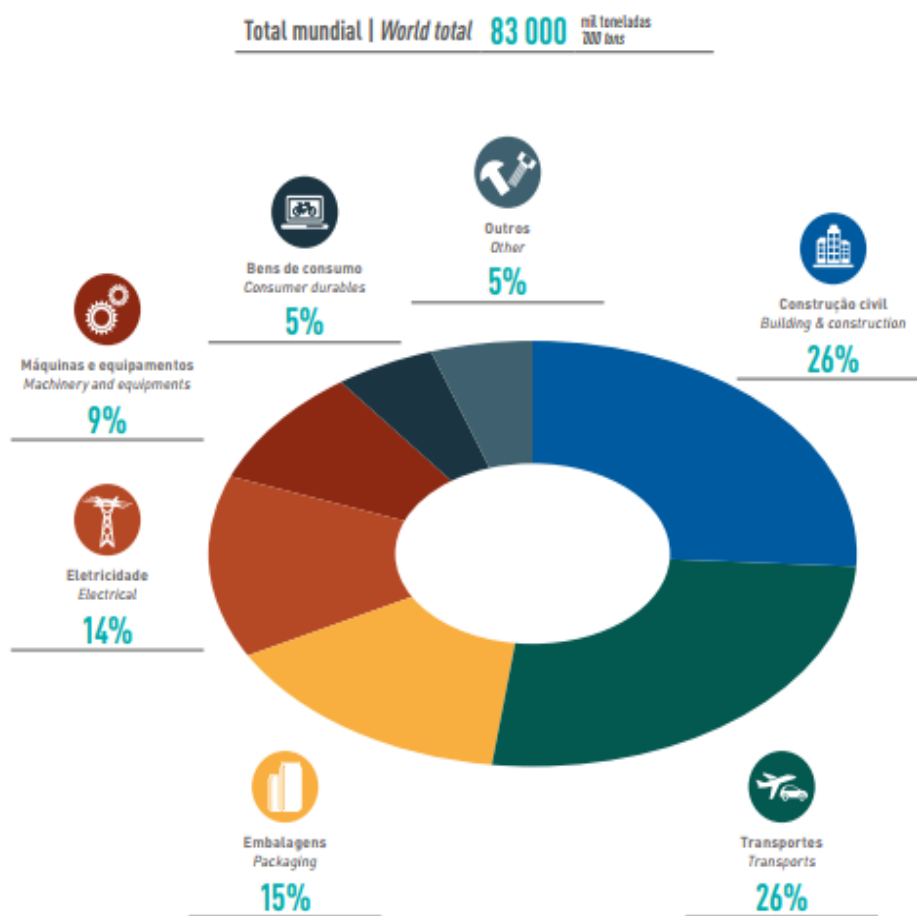
Fonte: Partnership California Fuel Cell apud GREET (2016).

Observa-se que a parcela liberada de GEE esta relacionada à eletricidade usada para comprimir e dispensar o combustível hidrogênio na estação de abastecimento, visto que as emissões do tubo de escape das células de combustível e veículos elétricos à bateria são nulas. Sendo assim, dependendo da produção e do caminho de T&D, a pegada de carbono para o hidrogênio pode ser ainda mais reduzida se este for produzido de forma descentralizada e por fontes energéticas renováveis.

## 2.3 REUTILIZAÇÃO DO ALUMÍNIO PARA PRODUZIR HIDROGÊNIO ENQUANTO TECNOLOGIA ALTERNATIVA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, não sendo encontrado em seu estado metálico na natureza. Originário do minério bauxita o qual é constituído por óxidos de alumínio hidratados combinado com outros elementos, como ferro, oxigênio e o silício (SMITH; HASHEMI, 2013, p. 297). O alumínio possui uma série de propriedades (Quadro 7) que o torna um material muito útil para a sociedade. O consumo mundial por segmento deste material é apresentado pelo Gráfico 2.

Gráfico 2- Comparativo do consumo mundial de alumínio por segmento -2016



Fonte: Hydro (2017) apud (ABRAF, 2017).



**Quadro 7 - Combinações de propriedades do alumínio**

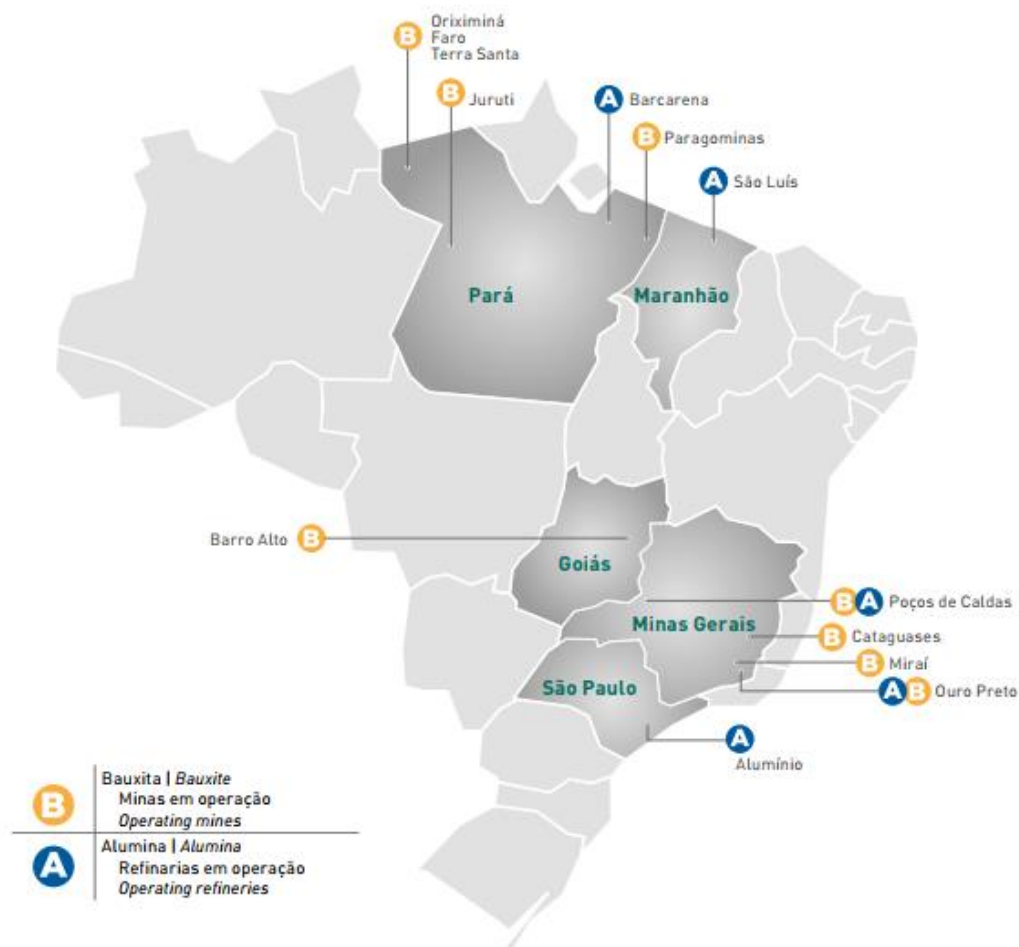
Características	Descrição
Peso Específico	A leveza: seu peso é de cerca de 2,7 g.cm <sup>-3</sup> , aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre.
Resistência Mecânica	A partir da adição de ligas de outros metais como silício, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco, ferro e outros, o alumínio apresenta um aumento de resistência e consequente aumento de capacidade de ser utilizado como material estrutural.
Resistente a Corrosão	Quando submetido à atmosfera, forma-se uma camada de óxido, o que irá proteger o metal de oxidações posteriores.
Impermeabilidade	Impermeável a luz, umidade e odores. Usado para a fabricação de latas, papel alumínio, plásticos ou papel laminados, e como filmes metalizados, de modo a melhorar as propriedades de barreira (LANDIM et al., 2016, p.84)
Propriedade Antimagnética	O metal não é magnético, sendo frequentemente utilizado em equipamentos eletrônicos; também não produz faíscas. Dessa forma, é muito utilizado na armazenagem de produtos inflamáveis
Atoxicidade	Não é tóxico, o que permite sua utilização em utensílios domésticos, não produzindo qualquer efeito nocivo ao organismo humano.
Reciclagem	Talvez seja a característica mais importante desse metal, pois o alumínio é infinitamente reciclável, sem perder suas propriedades físico-químicas, o que o torna o metal mais escolhido.

Fonte: Rodrigues (2012, p.25).

Levando em consideração as reservas que não foram descobertas, segundo a Hydro (2013, citado por Costa (2016, p.24) estima-se uma quantidade mundial de bauxita entre 50 a 75 bilhões de toneladas métricas que proporcionarão uma produção de alumínio por mais 250 a 340 anos. O Brasil está entre a terceira maior reserva e produção de bauxita no mundo, sendo o 10º maior produtor mundial de alumínio primário (LANDIM et al., 2016, p.84). A localização das minas de bauxita e refinarias de alumina no Brasil estão ilustrados na Figura 18.

Este é um mercado que somando o montante de todas as atividades desde mineração, processamento da alumina em alumínio primário, semimanufaturados, transformação e reciclagem, obteve um faturamento em 2016 de R\$55,7 bilhões para a indústria do alumínio no Brasil, tendo uma participação de 4,8% no Produto Interno Bruto – PIB (ABRAF, 2017).

**Figura 18 - Localização da Produção de Alumínio no Brasil**



Fonte: (ABRAF, 2017).

Segundo o relatório anual indicadores sociais (RAIS) e o cadastro geral de emprego e desemprego (CAGED) do Ministério do Trabalho, este setor específico da economia gerou em torno de 443 mil empregos diretos e indiretos no ano de 2016, um decréscimo de 16,2% em relação ao ano de 2013.

### 2.3.1 Produção do Alumínio no Brasil

Em seu ciclo natural geológico, a bauxita é formada por um processo químico natural, proveniente de água em rochas alcalinas em decomposição. Encontrado em três principais grupos climáticos: Mediterrâneo, Tropical e o Subtropical. De acordo

com a Associação Brasileira do Alumínio – ABAL (2017), sua cadeia primária de mineração é composta simplificadamente por:

- I. Remoção planejada da vegetação e do solo orgânico;
- II. Retirada das camadas superficiais do solo (argilas e lateritas); e
- III. Beneficiamento por meio da:
  - (a) Britagem, para redução de tamanho;
  - (b) Lavagem do minério com água para reduzir (quando necessário) o teor de sílica contida na parcela mais fina; e
  - (c) Secagem.

Para que a produção do alumínio seja economicamente viável, a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) (ABAL, 2017). Segundo as Tabelas 3 e 4, as reservas brasileiras de bauxita apresentam teores médios acima de 37%, sendo no estado de Goiás que se encontra o melhor minério para produção no país.

**Tabela 3 - Produção Bruta do Alumínio – Ano Base 2015**

Substância	Quantidade (ROM)		Contido		Teor Médio		
		t		t		%	$Al_2O_3$
<b>Alumínio (bauxita)</b>	<b>50.105.016</b>	<b>t</b>	<b>23.591.682</b>	<b>t</b>	<b>47,08</b>	<b>%</b>	<b><math>Al_2O_3</math></b>
Pará	45.190.364	t	21.622.680	t	47,85	%	$Al_2O_3$
Minas Gerais	3.546.508	t	1.322.758	t	37,30	%	$Al_2O_3$
São Paulo	826.913	t	345.511	t	41,78	%	$Al_2O_3$
Goiás	532.231	t	296.683	t	55,74	%	$Al_2O_3$
Santa Catarina	9.000	t	4.050	t	45,00	%	$Al_2O_3$

Fonte: BRASIL (2016, p.11).

**Tabela 4 - Produção Beneficiada – Ano Base 2015**

Substância	Quantidade		Contido		Teor Médio		
		t		t		%	$Al_2O_3$
<b>Alumínio (bauxita)</b>	<b>35.715.432</b>	<b>t</b>	<b>17.631.991</b>	<b>t</b>	<b>49,37</b>	<b>%</b>	<b><math>Al_2O_3</math></b>
Pará	33.240.406	t	16.475.789	t	49,57	%	$Al_2O_3$
Minas Gerais	1.732.392	t	758.151	t	43,76	%	$Al_2O_3$
Goiás	527.102	t	305.192	t	57,90	%	$Al_2O_3$
São Paulo	215.532	t	92.859	t	43,08	%	$Al_2O_3$

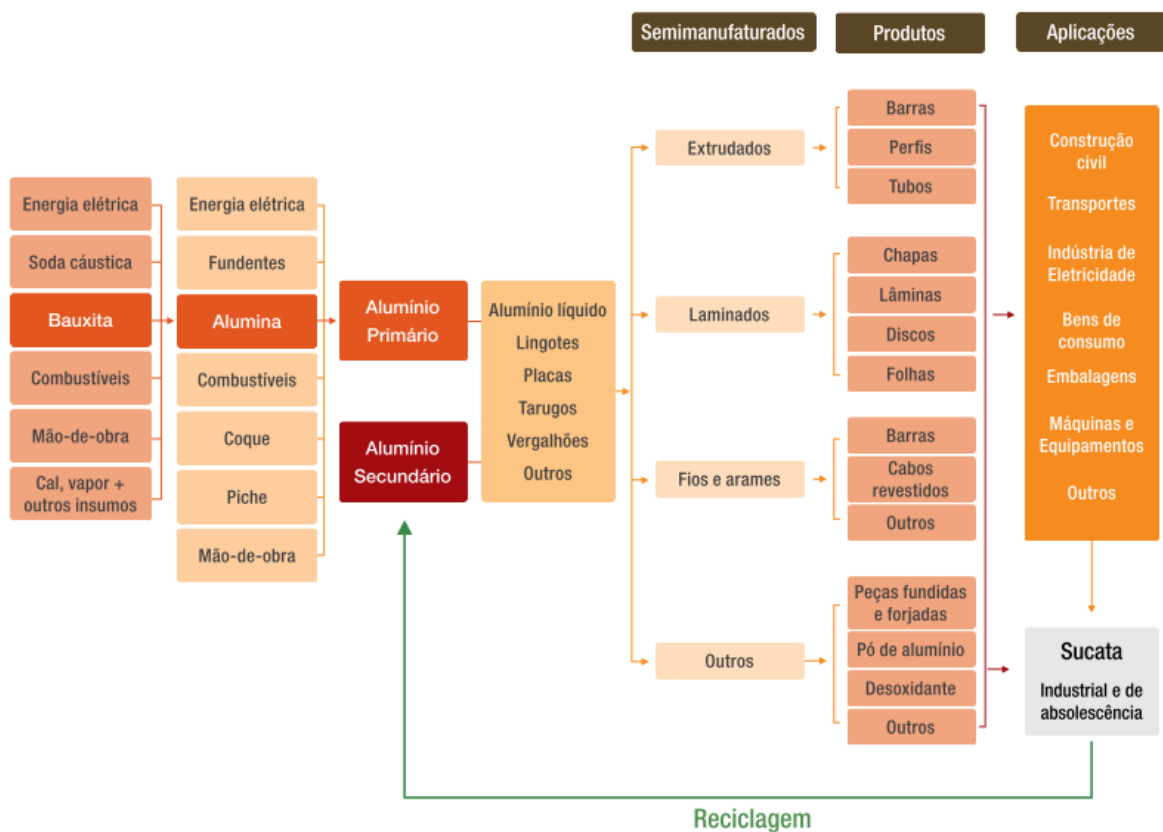
Fonte: (BRASIL, 2016a).

A próxima etapa da cadeia de produção é o refinamento da alumina para obtenção do alumínio primário, pelo processo conhecido como Hall-Héroult. De acordo com a Hydro (2013 apud COSTA, 2016) são necessárias entre 4 a 7 toneladas de bauxita e 2 toneladas métricas de alumina para produção de 1 tonelada de alumínio.

Resumidamente, são necessárias três matérias-primas para se produzir o alumínio: óxido de alumínio (alumina), eletricidade e carbono. Em uma cuba, a eletricidade circula entre um polo negativo (catodo) e um polo positivo (anodo), ambos feitos de carbono. O anodo reage com o oxigênio da alumina e forma gás carbônico. Deste processo, resulta o alumínio líquido, o qual é retirado da cuba e posteriormente fundido em lingotes de extrusão, lingotes de laminagem ou ligas de fundição, dependendo do uso que se vai dar ao alumínio.

A evolução da cadeia produtiva nesta indústria (Figura 19) é um sistema composto por grandes empresas de mineração do alumínio, de transformação, reciclagem, comercialização e fornecedores de insumos e equipamentos para este setor.

**Figura 19 – Cadeia Produtiva da Indústria do Alumínio**



Fonte: ABAL (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012).

### 2.3.2 Coleta Seletiva e Reciclagem do Alumínio

Em uma visão geral, a gestão de resíduos sólidos urbanos, prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) engloba as etapas de coleta, tratamento e disposição final dos rejeitos a fim de contribuir com o meio ambiente. Apesar de avanços significativos dos sistemas formais de coleta seletiva no Brasil, infelizmente este programa se mostra ainda incipiente.

Segundo a edição mais atual do Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (BRASIL; SNSA, 2015), a coleta seletiva no Brasil é praticada em 1.256 dos 3.520 municípios participantes, representando 35,7% deste universo, ou seja, de cada três pouco mais que um município tem coleta seletiva.

Ainda, existe um alto índice de municípios sem coleta seletiva, além dos grupos dos “sem informação”, que nesta edição do diagnóstico subiu de 32,4% em 2014 para os atuais 36,6%. O resultado desta pesquisa quanto à existência de coleta seletiva nos municípios é representado na Tabela 5 e seu respectivo Gráfico 3.

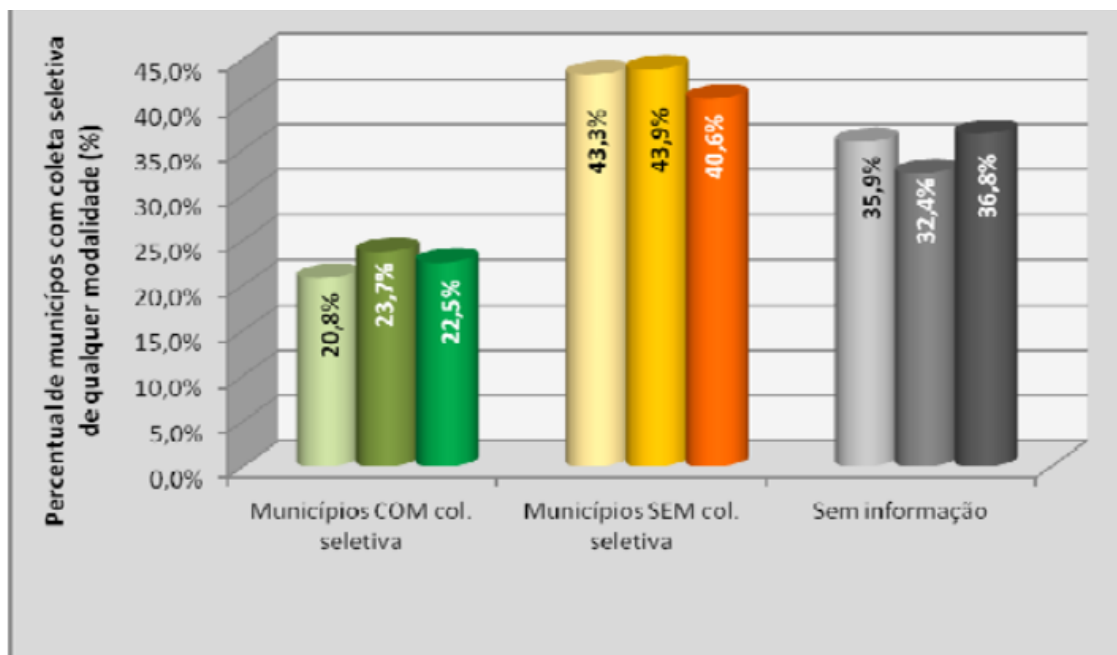
Tabela 5 - Evolução do índice de ocorrência do serviço de coleta seletiva de RDO dos municípios participantes de 2013 a 2015, segundo situação quanto à existência – SNIS-RS

Situação quanto à existência de coleta seletiva (campo Cs001)	Quantidade de municípios			Em percentuais		
	Ano 2013	Ano 2014	Ano 2015	Ano 2013	Ano 2014	Ano 2015
Municípios COM col. seletiva	1.161	1.322	1.256	20,8	23,7	22,5
Municípios SEM col. seletiva	2.411	2.443	2.264	43,3	43,9	40,6
Sem informação	1.998	1.805	2.050	35,9	32,4	36,8
Total	5.570	5.570	5.570	100,0	100,0	100,0

NOTA: Resultados baseados na resposta SIM ou NÃO no campo Cs001, independentemente da forma adotada (porta-a-porta, pontos voluntários ou outra modalidade) e de sua abrangência em âmbito municipal.

Fonte: BRASIL; SNSA (2015, p. 67).

Gráfico 3 - Evolução do índice de ocorrência do serviço de coleta seletiva de RDO dos municípios participantes de 2013 a 2015, segundo situação quanto a existência – SNIS-RS



Fonte: BRASIL; SNSA (2015, p. 67).

Do Gráfico 3, depreende-se que embora não se tenha ainda informações sobre 36,8% dos municípios, em pelo menos 22,5% ocorre a prestação deste tipo de serviço podendo ser executado, conforme as opções admitidas:

- diretamente pela prefeitura;
- por empresa contratada pela prefeitura;
- por associações/cooperativas de catadores, desde que com alguma parceria com a prefeitura; e
- outras entidades – filantrópicas, por exemplo – desde que também detenham alguma parceria com a prefeitura.

Importante ressaltar que o presente diagnóstico (BRASIL; SNSA, 2015) não considerada, por motivos de total impossibilidade de obtenção de dados consistentes, a coleta seletiva executada por empresas “autônomas” do ramo, como sucateiros ou catadores que não tenham algum tipo de vinculação com a prefeitura.

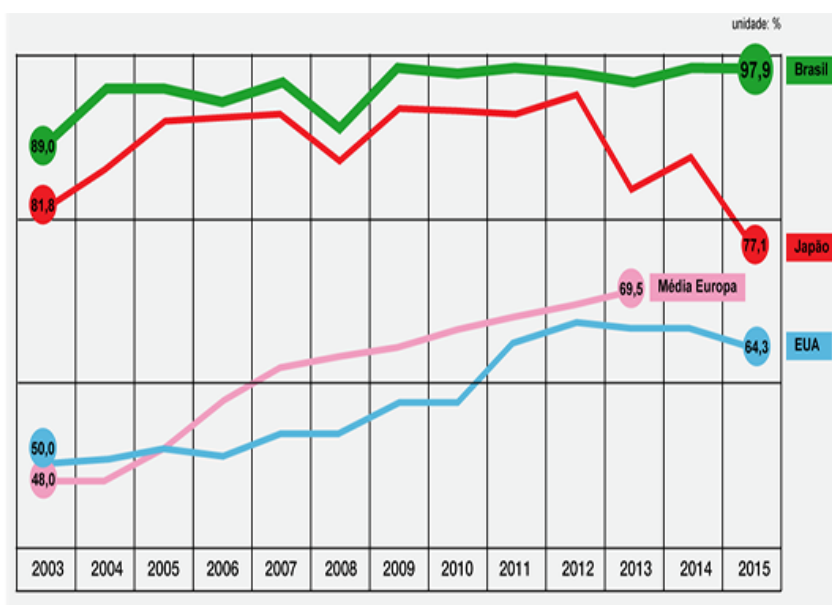
No entanto, muito autores como Nunes et al., (2011) afirmam que por mais que os programas oficiais de coleta seletiva ainda se mostrem limitados, a reciclagem de resíduos sólidos urbanos no país viabiliza-se, principalmente, devido ao trabalho

destes “autônomos” do ramo de material reciclável. Em aspectos socioeconômicos, o setor de reciclagem gera recursos nas esferas locais, criando empregos e gerando renda para aproximadamente 170 mil pessoas, desde a sua coleta, tratamento e transformação final (ABAL, 2017).

O caso de maior sucesso pode ser associado à reciclagem de alumínio, em particular latas de bebidas, setor no qual o Brasil mantém posição de destaque mundial desde 1990, com uma marca acima de 97% de reciclagem deste material em 2015 (Gráfico 4), tendo uma estatística de relação de consumo doméstico com sucata recuperada, em torno de 38,5%, acima da média mundial de 27,1%, ocupando o 8º lugar neste ranking (ABAL, 2017).

Portanto, nota-se que é necessário o desenvolvimento de políticas de apoio e registros confiáveis e disponíveis sobre o alumínio no Brasil considerando o conjunto total de sucatas e não somente considerando o segmento “latas de alumínio” para que se possa elevar a taxa de recuperação desse material (FERREIRA et al., 2014).

**Gráfico 4 - Índice de Reciclagem de Latas de Alumínio (%)**



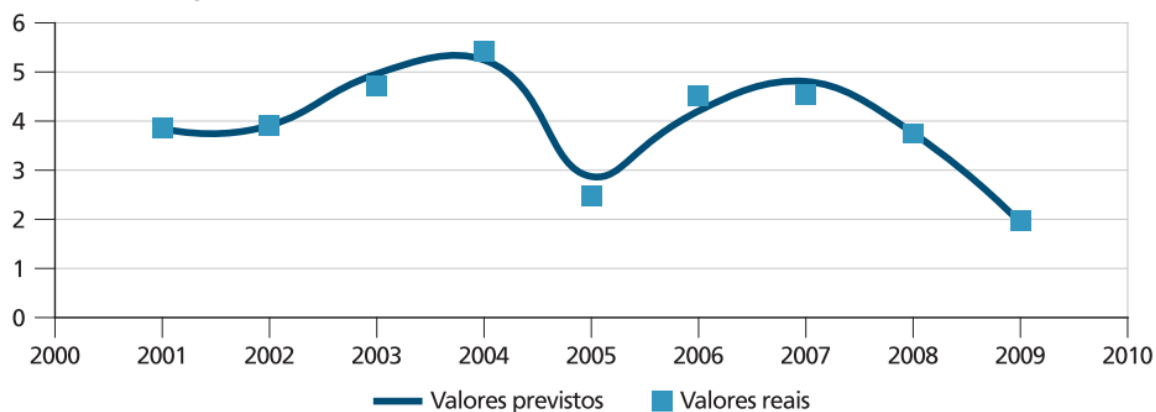
Fonte: (ABAL, 2017).

Dados interessantes são exibidos no estudo de Leite (2009) apud ROCHA (2016) o qual aponta a importância do conhecimento dos benefícios produzidos a partir da reciclagem ou beneficiamento na indústria do alumínio:

[...] uma única lata de alumínio reciclada representa uma economia energética capaz de manter uma televisão ligada por três horas. Essa economia energética gera outro tipo de economia, a financeira, que é bem considerável. Acerca desse tipo de economia, o processo de reciclagem do alumínio economiza o correspondente a 95% da energia elétrica utilizada na fabricação do alumínio primário, ou seja, são gastos 15 kWh (quilowatt-hora) para fabricar um quilo de alumínio primário, contra 0,75 kWh para fabricar um quilo de alumínio reciclado, que possui as mesmas características técnicas e de qualidade do primeiro. Esse valor é expressivo quando se considera que a energia elétrica representa 70% no custo de fabricação do alumínio primário; logo, ao reciclar alumínio, economiza-se, por esse insumo, aproximadamente 66,5% do alumínio primário.

Layargues (2002) aponta que a coleta seletiva de alumínio no Brasil é impulsionada, principalmente, pelo alto preço dessa sucata, sendo uma importante fonte de renda para os catadores. No entanto, de acordo com a análise quantitativa de Nunes et al. (2011) o preço da sucata de alumínio coletada varia de acordo com a demanda de material secundário<sup>2</sup> no Brasil e no exterior, podendo decrescer conforme a oscilação do comércio internacional, ocasionando uma retração da produção industrial, conforme é mostrado no Gráfico 3.

**Gráfico 3 - Preço pago aos catadores: comparação entre valores previstos e valores reais (Em R\$/kg)**



Fonte: Nunes et al. (2011, p.299).

Isto acontece quando há elevação dos estoques de alumínio e aumento da capacidade ociosa, que por consequência afeta o consumo de alumínio primário, que por sua vez também diminui a demanda por alumínio secundário. Ainda, segundo os

<sup>2</sup> Material secundário: termo usado por Nunes et al., (2011) em referência a sucata de alumínio para distinguir do alumínio primário.



autores deve-se levar em consideração que a sucata de alumínio pode substituir, em várias situações, o alumínio primário, e ainda, que os contratos de compra de sucata tendem a ser mais flexíveis do que de alumínio primário, aspectos que potencializam os impactos sobre o setor de alumínio secundário.

### 2.3.3 Benefícios Socioambientais

Além das vantagens econômicas com a reciclagem do alumínio, esta atividade oferece benefícios relacionados a aspectos ambientais e sociais, favorecendo assim a população do país. Tais benefícios são valorados quanto se compreende o contexto dos impactos socioambientais negativos para a produção do minério alumínio primário.

Em relação às implicações da indústria do alumínio, o pesquisador Fearside (2016) examinou os custos e benefícios socioambientais desta produção, ressaltando que:

Os lingotes de alumínio representam a energia elétrica em uma forma que pode ser carregada em um navio e levado embora. Muitas outras partes do mundo preferem importar os lingotes do que produzi-los em casa porque gera grandes quantidades de eletricidade necessária para fundir o alumínio teriam grandes impactos sociais e ambientais. [...] essencialmente, os países que importam lingotes de alumínio ou produtos (incluindo produtos parcialmente transformados como barras e chapas) estão exportando o impacto ambiental e social destes produtos para lugares como o Brasil (SWITKES, 2005 apud FEARSIDE, 2016).

Este comentário precedente, uma vez que a indústria do alumínio é eletro-intensiva, um dos grandes consumidores industriais. Em 2009 para a produção de uma tonelada do metal foram consumidos em média 15,4 Megawatt (Mwh) de energia elétrica. Desta forma, os grandes produtores mundiais de alumínio, necessariamente, são importantes consumidores e, por vezes, produtores de energia elétrica (FEARNSIDE, 2016). Só no Brasil o consumo de energia elétrica para a produção de alumina foi de 1.905,0 GWh e 16,1MWh por tonelada para produção de alumínio primário, em referência ao ano de 2016 (ABRAF, 2017).

A exemplo, cada quilo de alumínio reciclado evita que se extraiam 5 kg de bauxita e todo o impacto ambiental dessa extração - desmatamento, erosão, assoreamento, poluição, consumo de água, energia elétrica e outros (DIAS, 2015)

Para auxiliar em uma quantificação dos poluentes desta atividade, o Instituto Internacional do Alumínio realizou um inventário do ciclo de vida para a produção do alumínio primário em 2003, os principais resultados do inventário para a produção de alumina são encontrados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Inventário de refinação para produção média de 1,925 kg de alumina (na proporção de 1 tonelada de alumínio primário)**

<i>Input</i>	<i>Alumina Refining</i>	<i>Unit</i>
<i>Raw Materials</i>		
Bauxite	5,168	kg
Caustic Soda	159	kg
Calcined Lime	86	kg
Fresh Water	6.4	m <sup>3</sup>
Sea Water	6.5	m <sup>3</sup>
<i>Fuels and Electricity</i>		
Coal	185	kg
Diesel Oil	1.2	kg
Heavy Oil	221.4	kg
Natural Gas	233	m <sup>3</sup>
Electricity	203	kWh
<i>Output</i>	<i>Alumina Refining</i>	<i>Unit</i>
<i>Air Emissions</i>		
Particulates	1.2	kg
CO <sub>2</sub> -equivalents	1,908	kg
NO <sub>x</sub> (as NO <sub>2</sub> )	2.24	kg
SO <sub>2</sub>	10.2	kg
Mercury	0.00020	kg
<i>Water Emissions</i>		
Fresh Water	6.4	m <sup>3</sup>
Sea Water	6.6	m <sup>3</sup>
Oil/Grease	0.13	kg
Suspended Solids	1.43	kg
Mercury	0.0018	kg
<i>By – products for external recycling</i>		
Bauxite residue	2.3	kg
Other by-products	3.5	kg
<i>Solid Waste</i>		
Bauxite Residue (red mud)	1,905	kg
Other Landfill Wastes	47.5	kg

Fonte: Bergsdal et al.(2004).

Segundo os autores que apresentaram tal inventário, as quantidades de entradas e saídas na Tabela 5 correspondem, em média, à produção de uma tonelada de alumínio primário, que segundo eles é necessário extrair 5,168 kg de bauxita.

Deste processo de refinado são gerados os resíduos de bauxita, conhecidos como lama vermelha. Os montantes gerados variam muito, dependendo do tipo de bauxita utilizada, assim como suas propriedades químicas e físicas, o alcance da composição química é em média:

- Óxido de Ferro: 30 – 60%;
- Óxido de Alumínio: 10-20%;
- Dióxido de Silício: 3-50%
- Óxido de Sódio: 2-10%
- Dióxido de Titânio: 10%

Ainda, tais pesquisadores afirmam que os resíduos são considerados como quimicamente estáveis e não tóxicos, e são mais frequentemente descartados em terra. Uma vez que esses locais são desativados, eles podem ser usados para cultivar ou repor outra vegetação (BERGSDAL et al., 2004).

No entanto, ainda se tem impactos sociais negativos da extração deste minério que são bem descritos por Fearside (2016), sendo alguns dele: vários tipos de cânceres ocupacionais e outras doenças na fundição do alumínio, deslocamento da população, muitas vezes incluindo povos indígenas e comunidades ribeirinhas tradicionais, entre outros.

A ABAL (2008) estima que as emissões de gases do efeito estufa sejam 6.661 toneladas de CO<sub>2</sub>-eq/tonelada de alumínio primário, ou 0,15% das emissões nacionais do Brasil. Infelizmente, o impacto das barragens hidrelétricas construídas para fornecer energia para essas fábricas é parte integrante do impacto da fundição de alumínio.

Como resultado das projeções de produção de alumínio primário neste estudo, estima-se que o consumo per capita de alumínio no Brasil passará de cerca de 6,1 kg/habitante/ano, em 2015, para algo em torno de 7,0 kg/habitante/ano em 2020 (EPE/MME, 2015).

### 2.3.4 Hidrólise Alcalina com Alumínio Secundário

Um dos métodos mais usados na obtenção de hidrogênio é a reação de um álcali com alumínio, pelo caráter anfótero (substância que pode se comportar como um ácido ou como uma base dependendo do reagente) do alumínio, que reage tanto com ácidos quanto com bases (ILYUKHINA et al., 2012). A geração de hidrogênio pela divisão dos átomos que formam a água impulsionada pela reação de hidrólise do alumínio vem sendo muito pesquisada pela comunidade científica (AMBARYAN et al., 2016; DUDOLADOV et al., 2016; HUANG et al., 2011; NIU et al., 2014; PUDUKUDY et al., 2012). O interesse é devido a simplicidade da reação e baixo custo do material alumínio (NIU et al., 2014). As possíveis reações da hidrólise do alumínio segundo Petrovic e Thomas (2008) são expressas nas equações seguintes:



Em ambas as reações altamente exotérmicas, são liberados gases de hidrogênio, diferenciando que na primeira reação é formado o hidróxido de alumínio, enquanto na segunda tem-se o óxido hidróxido de alumínio e na última tem-se como subproduto o óxido de alumínio (PETROVIC; THOMAS, 2008, p.5).

Algumas vantagens do uso do alumínio para fornecer energia primária por meio do hidrogênio são destacadas pelos pesquisadores Porciúncula et al. (2012):

- a) O subproduto  $\text{Al}(\text{OH})_3$  junto com outros sais pode ser aplicado para tratamento de água como coagulante/floculante.
- b) Recuperação do alumínio a partir do  $\text{Al}(\text{OH})_3$  por eletrólise ou outro processo conveniente;
- c) Obtenção do metal a partir de materiais recicláveis (alumínio secundário) de diferentes graus de pureza;

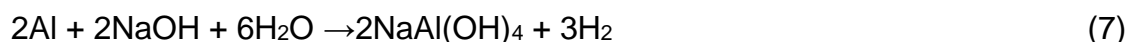
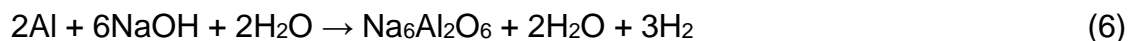
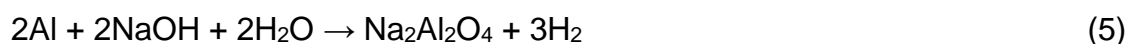
Segundo NIU et al. (2014) teoricamente um grama de Al pode produzir 1245 mL de  $\text{H}_2$  (CNTP) ao reagir completamente com a água. Já Ho e Huang (2015) exibem

outra equivalência teórica de que 1 g de Al produz de 1360 mL de H<sub>2</sub> em condições normais de temperatura e pressão.

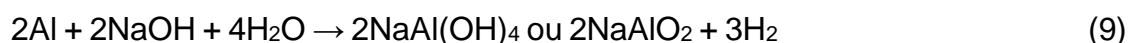
No entanto, ao interagir o metal com ar ou água, é formado facilmente um denso óxido filme ao redor da superfície de alumínio que interrompe a corrosão do metal e a produção de hidrogênio (ZOU et al., 2013). Portanto, é necessária uma ativação química para remover a barreira de óxido passivo na superfície do metal a fim de que a reação alumínio-água seja contínua (HO; HUANG, 2015).

Abordagens para melhorar a eficiência da geração de hidrogênio foram desenvolvidas para interromper a formação da película de óxido (HO; HUANG, 2015). Esses métodos para ativação do alumínio incluem: (a) por aditivos óxidos; (b) por imersão em uma solução alcalina; (c) por materiais com carbono; (d) por adição de elementos metálicos; (e) entre outros (LÓPEZ-MIRANDA; ROSAS, 2015).

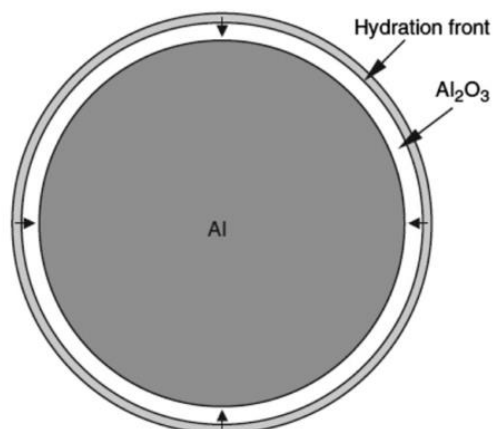
HO e HUANG (2015) descrevem as reações da imersão do alumínio em solução alcalina como um catalisador para dissolver a película de óxido entre OH<sup>-</sup> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou Al(OH)<sub>3</sub>, pois assim o Al(OH)<sub>4</sub> formado pode ser dissolvido na solução e em seguida, a superfície de Al permite que a reação da alumínio-água seja contínua, como uma taxa de geração de 2.9 L/min por grama de Al com 100% de rendimento. A ilustração da formação desta película é apresentada conforme a Figura 20. Contudo, o uso da solução alcalina forte causa a corrosão do reator e poluição ambiental (PETROVIC; THOMAS, 2008, p.7). Na compilação de estudos realizados por Petrovic e Thomas (2008) são citadas muitas patentes nos Estados Unidos que descrevem o uso de hidróxidos, como o hidróxido de sódio (NaOH) para promoção da combinação alumínio-água. Baseou-se nestes autores para as possíveis reações alcalinas:



Segundo Lee (1999), tem-se também a seguinte complementação:



**Figura 20-Camada Óxido de Alumínio**



Fonte: (HUANG et al., 2013).

Em relação aos processos químicos de produção de hidrogênio os autores Olivares-Ramirez et al.(2012) resumiram diferentes componentes e composições para a reação de alumínio-água, os quais são exibidos no Quadro 9. Segundo seu compilado extenso existem diversas aplicações desta reação, sendo as principais para energia térmica, células a combustível e plantas geradoras.

**Quadro 8 - Misturas de água+ alumínio e outros materiais para produção de hidrogênio**

Continua...				
Código	Reagentes	Processo	Taxa Produção H <sub>2</sub>	Fonte
<b>A</b>	Hidrogenação Mg <sub>3</sub> La + água	Hidrólise, nos primeiros 20 min	43.8 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	Ouyang et al.[50]
<b>B</b>	Hidrogenação La <sub>2</sub> Mg + água		40.1 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	
<b>C</b>	Mg + água do mar	Hidrólise, nos primeiros 10 min	90.6mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	Zou et al.[51]
<b>D</b>	Mg/Co (95:5) + sea water	Hidrólise durante o primeiro minuto	575mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	Zou et al.[51]
<b>E</b>	Al/Bi/NaCl (80:15:5) + água	Hidrólise, durante 30min	300 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	Fan et al. [52]
<b>F</b>	Al/Bi/CaH <sub>2</sub> (80:10:10) + água	Hidrólise, durante 3 min	340 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	
<b>G</b>	Al/Bi(80:20) + água	Hidrólise durante 30 min	24 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	
<b>H</b>	Al-20% wt CaH <sub>2</sub>	Hidrólise durante 5 minutos	24 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	

				<b>Conclui.</b>
<b>I</b>	Ni <sub>20</sub> Al <sub>80</sub> + 0.46M NaOH	Hidrólise durante 15 minutos	63 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	Hu et al. [53]
<b>J</b>	Ni <sub>30</sub> Al <sub>70</sub> + 0.46M NaOH	Hidrólise durante 15 minutos	54 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	
<b>K</b>	Ni <sub>40</sub> Al <sub>60</sub> + 0.46M NaOH	Hidrólise durante 20 minutos	47 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	
<b>L</b>	Ni <sub>50</sub> Al <sub>50</sub> + 0.46M NaOH	Hidrólise durante 60 minutos	7.34 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	

Fonte: (OLIVARES-RAMIREZ et al., 2012, p. 63).

As publicações mais recentes que também investigaram as possibilidades de produção de hidrogênio por meio da reação química hidrólise com alumínio e outros metais são listadas no Quadro 10.

**Quadro 9 – Produção de Hidrogênio por Hidrólise**

COD	Reagentes	Processo	Taxa Produção H <sub>2</sub>	Fonte
<b>L</b>	Al+NaOH+ Na <sub>2</sub> SnO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O	Hidrólise, nos primeiros 2 - 6 min	1900 a 5150 ml. min <sup>-1</sup>	(DAI et al., 2011)
<b>M</b>	NaAlO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SnO <sub>3</sub>	Hidrólise, durante 30 min	221 mL.min <sup>-1</sup>	(MACANÁS et al., 2011)
<b>N</b>	NaBH <sub>4</sub> +NaOH + Co-Mo-B	Catalisadores, durante 40 min	19 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	(ZHUANG et al., 2013)
<b>O</b>	Al+C+NaCl	Hidrólise com carbono, durante 400min	1113 mL. min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	(NIU et al., 2014)
<b>P</b>	Al <sub>lata</sub> + Ni e/ou Br + NaCl	Hidrólise, durante 600s	130 mL.s <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup> Volume total 1350ml. g <sup>-1</sup>	(HO; HUANG, 2015)
<b>Q</b>	NaBH <sub>4</sub> + 2NaOH (CoeZneB/GP) + 3H <sub>2</sub> O	Hidrólise c/catalisador, durante 7 min	2180 mL.min <sup>-1</sup> .g <sup>-1</sup>	(XIANG et al., 2015)
<b>R</b>	Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> + NaOH	Hidrólise, durante 75 min	250 mL. min <sup>-1</sup>	(LÓPEZ-MIRANDA; ROSAS, 2015)
<b>S</b>	Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> + CaO	Hidrólise, durante 600min	90 mL. min <sup>-1</sup>	

Fonte: Elaborada pela autora.

O processo químico proposto pela empresa Evoluções Hidrogás (2016) também traz outra opção de hidrólise alcalina para produção de hidrogênio com a

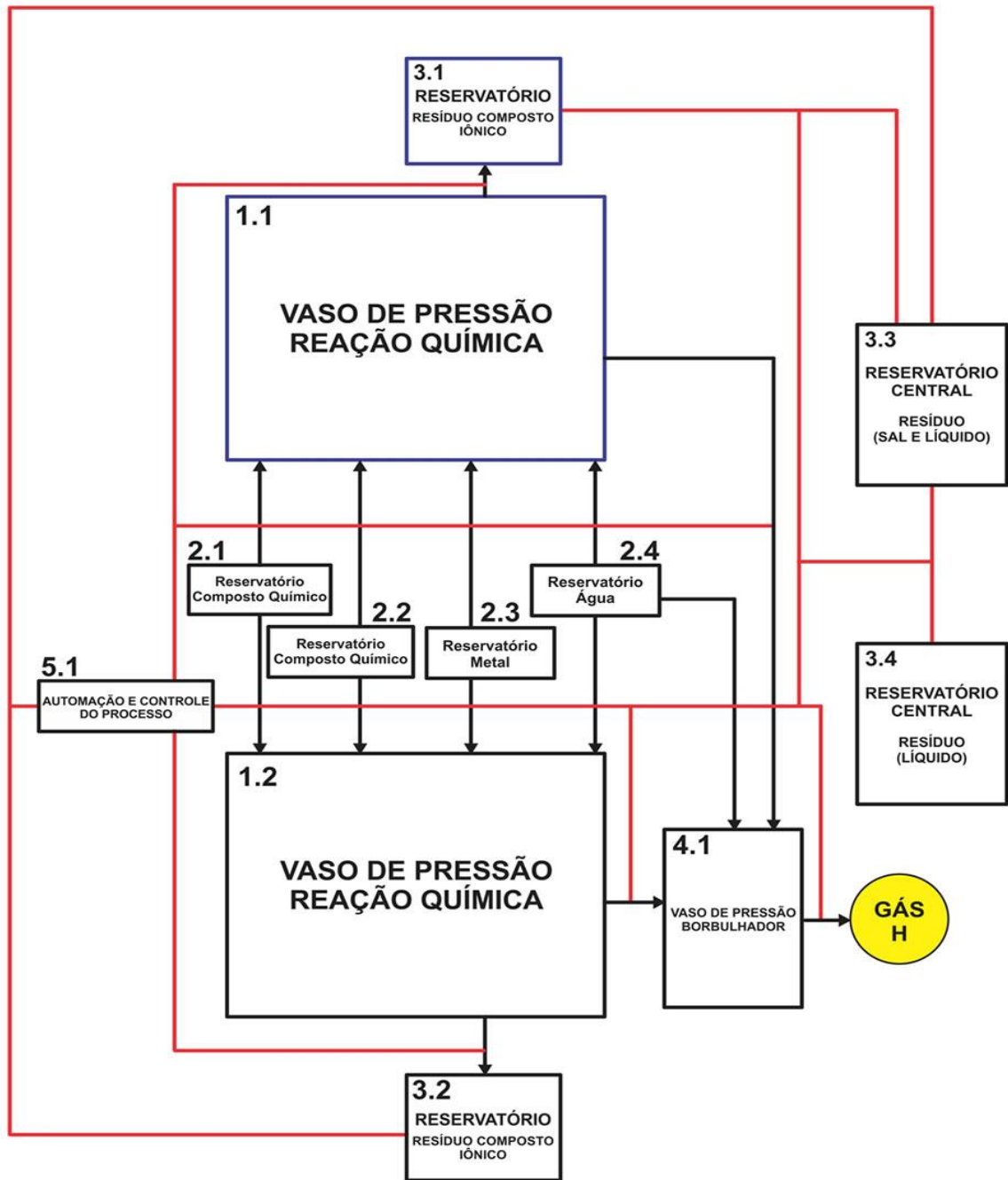
combinação de um ácido com os demais componentes, podendo ser utilizado tanto o alumínio primário quanto o secundário, o qual estabiliza a temperatura da reação química e conseqüentemente a obtenção mais efetiva e contínua de hidrogênio, possibilitando o fornecimento de um fluxo de 7,5 litros por minutos com pressão suficiente para uso direto durante seis horas.

Adicionalmente, ao final da reação química ocorre a formação de um hidróxido, fortemente alcalino e não corrosivo, com pH acima de 12. Tais características conferem a este subproduto sua aplicação em diversas áreas da indústria tais como: alumínio, construção civil, farmacêutica, petroquímica, celulose, tratamento de água e resíduos industriais, entre outras (TEIXEIRA, 2003; HO;HUANG, 2015).Um fluxograma deste processo é apresentado na Figura 21, que representa os principais pontos para produção do gás.

No Anexo A, está exibida uma estimativa dos equipamentos para construção de uma planta com capacidade de produção e armazenamento para 453.600 m<sup>3</sup> de hidrogênio (EVOLUÇÕES HIDROGÁS, 2016).



Figura 21 - Fluxograma do processo de hidrólise alcalina.



Fonte: HIDROGÁS (2016).

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Exposta a base teórica desta dissertação, o atual capítulo apresenta os meios encontrados para atingir os objetivos declarados. A seguir, serão descritas as etapas de levantamento de dados, procedimentos do experimento e metodologia de análise selecionados para se debruçar sobre o problema de pesquisa traçado.

### 3.1 COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS

A fim de conhecer melhor o processo de obtenção de hidrogênio por meio da hidrólise alcalina proposto pela empresa Evoluções Hidrogás Ltda, este experimento foi reproduzido em escala laboratorial, com o intuito de confrontar os dados publicados com os obtidos durante os ensaios e assim comparar com estudos similares. As informações necessárias para relacionar os aspectos de sustentabilidade foram retiradas próprio requerimento de patente, dos relatos das experiências dos inventores e informações disponibilizadas pela empresa (EVOLUÇÕES HIDROGÁS, 2016).

Os dados secundários foram obtidos a partir de pesquisa bibliométrica conforme anunciado no *item 1.6* com base nos artigos publicados em revistas eletrônicas, sendo as principais: *Internacional Journal of Hydrogen Energy*, *Journal Power Sources*, *Energy & Environmental Sciences*, *Industrial and Engineering Chemistry*, *Renewable and Sustainable Energy*, entre outros. As palavras-chaves e filtros utilizados são mostrados na Tabela 6.

Também foram encontradas dissertações e teses que abordaram o vetor hidrogênio a partir de aspectos econômicos, ambientais e técnicos, além da investigação de obras literárias e organizações governamentais que vislumbraram a rede de hidrogênio (COUNCIL, 2017; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017d; RIFKIN, 2003).

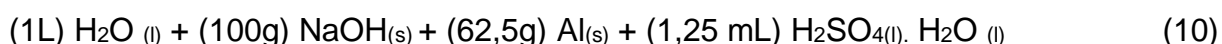
**Tabela 6 - Pesquisa bibliométrica para hidrólise alcalina**

Palavra-Chave	Resultado BASE CAPES	Período	Áreas de Interesse/Filtro
<b>Hydrolysis Aluminium</b>	77.315	-	TODAS
<b>Hydrolysis Aluminium AND Hydrogen Generation</b>	9.395	-	TODAS
<b>Hydrolysis Aluminium AND Hydrogen Generation/Production</b>	4.597	2012-2017	TODAS
<b>Hydrolysis Aluminium AND Hydrogen Generation/Production</b>	90	2012-2017	Engenharia, química, produção/geração de hidrogênio, alumínio
<b>Hydrolysis Aluminium AND Hydrogen Generation/Production</b>	9	2012-2017	No título as palavras-chaves

Fonte: Elaborada pela autora.

### 3.2 ENSAIO LABORATORIAL PARA PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO A PARTIR DE ALUMÍNIO SECUNDÁRIO

As sucatas de alumínio utilizadas para este experimento foram latas soltas (*Talc*) com teor máximo de 2,5% de impurezas, contaminantes e umidade. Vale ressaltar que no requerimento da patente é descrito o uso de água do mar como solvente, sem nenhum tratamento prévio. Devido as distâncias, foi utilizada água de torneira, junto com os reagentes hidróxido de sódio em cristal (NaOH) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) com pureza de 95%. As proporções utilizadas neste experimento seguem uma das variantes descritas no pedido de patente conforme fórmula abaixo (HIDROGÁS LTDA, 2016):



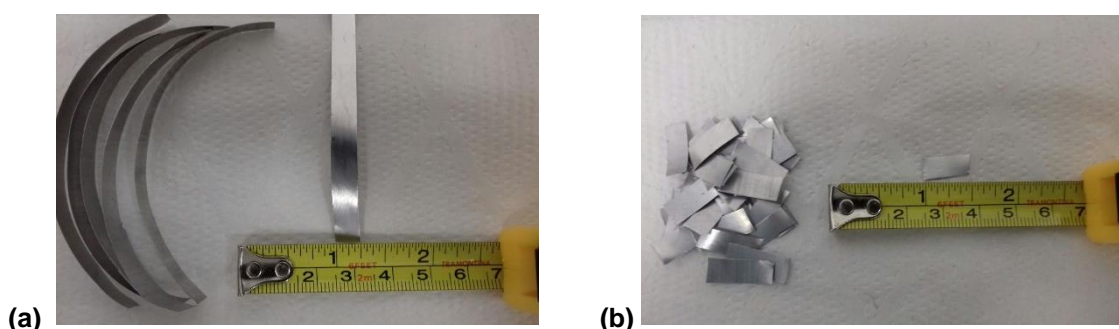
Ajustaram-se os reagentes para a proporção de 1g de Alumínio a fim de comparar com o padrão de registro das diversas reações para geração do gás divulgado na literatura científica. Reduziu-se, portanto, 62,5 vezes, obtendo as seguintes quantidades e ordens de mistura:

- a) Dissolução de 1,6g de NaOH em 16 mL de H<sub>2</sub>O torneira. Aguardou-se até a temperatura da reação voltar a temperatura ambiente;
- b) Com o auxílio da micropipeta, misturou-se 0,02mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> com pureza de 95% a 98% em 0,2 mililitros (mL) de H<sub>2</sub>O da torneira;e
- c) Misturou-se estas duas soluções no Erlenmeyer de 250mL, adicionando por último 1 (um) grama de alumínio;

Vale ressaltar que na descrição do requerimento é usado um vaso de pressão de aço inox calibrado a 3,5 quilograma-força por centímetro ao quadrado (kgf/cm<sup>2</sup>), equivalente a 3,39 atmosfera (atm), em uma temperatura que variou entre 93°C e 130°C. Por questões de custos e como foi realizada a redução dos reagentes, não se viu a necessidade neste primeiro momento da pesquisa em se incorporar tais especificações no reator químico.

As amostras utilizadas foram latas de alumínio, lavadas e secas. Aderiu-se o uso de luvas a fim de se evitar a contaminação das amostras com a gordura das mãos ao se realizar a retirada da tinta por meio do lixamento com esponja de aço. Seguida de picotamento e padronização da dimensão da amostra próximo de 0,5 x 0,25 cm (Figura 22). Para este experimento foram selecionadas as partes do corpo da latinha por serem mais fáceis de lixar e recortar.

**Figura 22 - Amostra de Sucata de Alumínio Lixada**



Fonte: Arquivo da autora.

Observação: (a) 0,25cm de comprimento (b) 0,5 cm largura

A planta do sistema instrumental para medição da vazão do hidrogênio foi montada conforme a Figura 23. A qual consistiu em um reator conectado a um filtro, recheado com carvão ativado e sílica, com o propósito de se reter umidade e possíveis

impurezas no gás. O carvão ativado passou por um pré-tratamento de moagem manual e peneiramento. Interligou-se em seguida um bolhômetro, onde fora adicionado uma pequena quantidade de detergente com água, preenchendo até a metade do orifício da entrada de gás. A observação inicial e final somou um volume de 10 mL, tendo marcação inicial no menisco côncavo em 50 mL e final de 40 mL.

Para medição da temperatura e do potencial hidrogeniônico (pH) foram reproduzidos testes separados, sendo o posicionamento do leitor posicionado no interior do reator sem o tampão de borracha.

Os instrumentos laboratoriais foram: (a) Erlenmeyer de 250 mL; (b) Tubo de vidro de 30cm; (c) Mangueira de borracha flexível ideal para gases; (d) Bolhômetro graduado de 50 mL; (e) Fixadores e braçadeiras; (f) Carvão ativado moído; (g) Sílica (h) Tampão de borracha; (i) Fita veda rosca; (j) Tubo de plástico rígido adaptado; (k) cronômetro digital; (l) tesoura; (m) micropipeta; (n) Balança analítica marca Shimadzu, com precisão de 4 casas decimais após a vírgula; (o) medidor de pH digital; e (p) termômetro químico.

**Figura 23 – Planta do Sistema Instrumental para Produção, Filtração e Medição**



Fonte: Arquivo da autora.

No período de utilização do laboratório não tinha disponível uma balança de conexão com o computador, não sendo então possível aplicar um método mais preciso e eficaz proposto por Brack et al.(2016) para medição de hidrogênio por meio

de um sistema automatizado de marcação do volume deslocado de água em função do tempo.

Para se obter uma análise qualitativa do gás gerado, ou seja, o seu grau de pureza, este foi submetido a um ensaio de cromatografia gasosa pelo método detector de condutividade térmica (TCD) na empresa Chronion de análises químicas e comércio Ltda na cidade de Quatro Barras/PR. A amostra foi retirada de um *bag* lacrado, sem submissão à vácuo, sendo que o experimento foi realizado no próprio local.

### 3.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE

A fim de fazer as correlações possíveis com o aporte teórico para validação da premissa deste trabalho, foram utilizadas técnicas de análise já bem difundidas e comuns entre pesquisadores desta área.

#### 3.3.1 Análise Econômica

Para o balanço dos aspectos econômicos da produção do hidrogênio fora aplicada a metodologia desenvolvida por Silveira (1998) citada nos estudos de Viola (2015), Braga (2015, 2014), e Silvério (2016). A Equação 11 sintetiza a análise deste aspecto ao se calcular o custo de produção do gás.

$$C_{H_2} = \frac{Inv.f}{H.E_{H_2}} + C_{op} + C_{main} \quad (11)$$

Em que:

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

A quantidade de energia contida no hidrogênio pode ser calculada multiplicando-se a vazão mássica total de hidrogênio pelo seu poder calorífico inferior (PCI), como apresentado pela Equação 12.

$$E_{H_2} = m_{H_2} \times PCI \quad (12)$$

Em que:

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

Para conversão da vazão volumétrica em fluxo mássico, utilizou-se a equação dos gases perfeitos (Equação 13 e 14).

$$d = \frac{P.M}{R.T} \quad (13)$$

$$m_{H_2} = d \times Q \quad (14)$$

Sendo:

P: pressão [atm]

d: densidade [g/L = kg/m<sup>3</sup>];

R: 0,082 atm L/Kmol;

T: 273 + °130C [K];

M: 2 g/mol;

Q= vazão [m<sup>3</sup>/s].

Complementando a equação, os dois últimos fatores são o custo de operação ( $C_{Op}$ ) e o custo de manutenção ( $C_{Main}$ ). O primeiro depende exclusivamente dos reagentes necessários para se realizar o processo químico de hidrólise alcalina dados pela Equação 15.

$$COP_{H_2} = \frac{m_{H_2O} \times C_{H_2O}}{E_{H_2}} + \frac{m_{Al} \times C_{Al}}{E_{H_2}} + \frac{m_{NaOH} \times C_{NaOH}}{E_{H_2}} + \frac{m_{H_2SO_4} \times C_{H_2SO_4}}{E_{H_2}} \quad (15)$$

Em que:

- $\dot{m}_{H_2O}$ : vazão de água requerida quantidade água [m<sup>3</sup>/h];
- $C_{H_2O}$ : custo água [US\$/m<sup>3</sup>];
- $\dot{m}_{Al}$ : quantidade alumínio [kg/h];
- $C_{Al}$ : custo alumínio [US\$/h];
- $\dot{m}_{NaOH}$ : quantidade hidróxido de sódio [kg/h];
- $C_{NaOH}$ : custo hidróxido de sódio [US\$/kg];
- $\dot{m}_{H_2SO_4}$ : quantidade ácido sulfúrico [m<sup>3</sup>/h];
- $C_{H_2SO_4}$ : custo ácido sulfúrico [US\$/m<sup>3</sup>];
- $E_{H_2}$ : energia contida no hidrogênio [kW];

Segundo Silvério (2016), o custo de manutenção será considerado 10% do valor do custo de investimento, obtido pela Equação 16.

$$C_{Main} = 0,10 \times \left( \frac{Inv.f}{H.E_{H_2}} \right) \quad (16)$$

Para conclusão, o fator de anuidade é calculado pelas Equações 17 e 18.

$$f = \frac{q^k(q-1)}{q^k-1} \quad (17)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (18)$$

Onde:

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



### 3.3.2 Análise Socioambiental

Segundo Sánchez (2013) deduzir quais serão as reações de uma determinada ação é uma das primeiras tarefas de uma análise socioambiental. A fim de direcionar mais adequadamente o planejamento do projeto hipotético que visa a obtenção de hidrogênio pelo processo químico de hidrólise alcalina com a reutilização de alumínio foi empregado o método de matrizes de interação. Consistem basicamente em linhas *versus* colunas de controle, relacionando aspectos do projeto com interações ao meio ambiente e social, sejam positivas ou negativas, possibilitando as integrações multidisciplinares.

Existem diversos tipos de matrizes de interação, sendo a mais mundialmente conhecida a que foi elaborada por Leopold em 1971, a qual estabelece relações com ações e fatores, para que se possa aferir posteriormente a magnitude, de forma empírica ou objetiva, com importância de cada impacto em uma escala de variação entre 1 a 10, de forma subjetiva ou normativa. Por outro lado, este método é passível de críticas visto que a forma de cálculo não é muito clara, além de não exibir os impactos indiretos, características temporais e dinâmicas dos sistemas (CREMONEZ et al., 2014).

Devido especificidades requeridas para cada projeto e empreendimento que necessite de um diagnóstico ambiental, tal matriz obteve diversas variações da original ao longo do tempo a fim de poder apresentar um relatório preliminar mais aproximado do meio estudado.

A variação utilizada nesta pesquisa será a baseada no modelo de Sánchez e Hacking (2002, apud Sanchez, 2013). Ela exibe a correlação entre aspectos e impactos, além dos mecanismos pelos quais ela ocorre, ideal para empreendimentos novos. Sendo a forma de estruturação apresentada pela Figura 24.

**Figura 24 - Modelo Base da Matriz de Análise Socioambiental**



Fonte: elaborada pela autora.

As atividades e aspectos ambientais relacionado a atividade de produção de hidrogênio foram baseadas segundo artigos que analisaram aspectos de sustentabilidade em diversos processos de produção do vetor segundo uma análise qualitativa (ABAS et al., 2015; ALLY et al., 2015; ANDREWS; SHABANI, 2014; DALAPATI et al., 2016; DINCER, 2012; EDWARDS et al., 2007; MANIATOPOULOS et al., 2015; MCDOWALL; EAMES, 2007; MORENO-BENITO et al., 2017; SHANDARR et al., 2014; VOLDSUND et al., 2016; WANG et al., 2014).

Para agregação de atributos e ponderação de valores para avaliação da significância de impactos ambientais e sociais utilizou-se parte do método quantitativo de Moreira (2014) a qual criou uma fórmula aplicada propondo a apresentação dos resultados também em forma de matriz, por meio das seguintes etapas:

- a) Levantamento de atributos segundo a norma da Resolução CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986;
- b) Combinação de atributos:
  - definição de atributos;
  - estabelecimento de escala para cada atributo;
  - critério de avaliação.
- c) Escala de classificação em grau de significância;
- d) Ponderação dos valores numéricos (Equação 19).

$$\sum Qa = (Va \times P) \tag{19}$$

Em que:

$Q_a$  = quantidade de atributos;

$V_a$  = valor do atributo (Varia de 0 à 2);

$P$  = valor do peso (Varia de 2 à 4).

Pela equação numérica simplificada quanto mais elevado o valor do atributo e valor peso, maior será o seu grau de importância do atributo. Na Tabela 7 são mostrados tais valores, tanto para impactos positivos quanto negativos. Os pesos adotados para cada critério são: (a) Probabilidade de Ocorrência -4; (b) Escala Temporal - 2; (c) Cumulatividade - 3; (d) Severidade- 3; e (e) Magnitude -3.

**Tabela 7 – Critérios e Valores Adotados para Caracterização de Impactos**

Continua...		
<b>Critério</b>	<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>
<b>Probabilidade de ocorrência</b>	Ocorrência certa	2
	Ocorrência incerta / baixa probabilidade	1
<b>Escala Temporal</b>	Imediata	1
	Média prazo/longo prazo	2
<b>Cumulativo</b>	Cumulativo	2
	Não cumulativo	1
<b>Magnitude localizada</b>	O alcance do impacto se limita ao local de origem do impacto, ou seja, atinge a área diretamente afetada (ADA)	0,4
<b>Magnitude pequena</b>	O alcance do impacto se limita a área de inserção do empreendimento. Atinge a equipe de funcionários atuantes no empreendimento.	0,8
<b>Magnitude média</b>	O alcance do impacto extrapola os limites do empreendimento e atinge área de influência direta.	1,2
<b>Magnitude grande</b>	O alcance do impacto extrapola os limites do empreendimento e atinge a área de influência indireta.	1,6
<b>Magnitude muito grande</b>	O alcance do impacto extrapola os limites do empreendimento e extrapola a área de influência indireta.	2
<b>Severidade baixa</b>	O impacto é reversível, temporário, não altera indicador ambiental e não modifica a realidade local dos aspectos socioeconômicos, dos aspectos físicos e da flora e fauna.	0,4

		Conclui.
<b>Severidade pequena</b>	O impacto é reversível, temporário, altera indicador ambiental sem proteção legal e não modifica a realidade local dos aspectos socioeconômicos, dos aspetos físicos e da flora e fauna.	0,8
<b>Severidade Média</b>	O impacto é reversível, temporário, altera indicador ambiental com proteção legal e não modifica a realidade local dos aspectos socioeconômicos, dos aspetos físicos e da flora e fauna.	1,2
<b>Severidade Grande</b>	O impacto é reversível, temporário, altera indicador ambiental com proteção legal e modifica a realidade local dos aspectos socioeconômicos, dos aspetos físicos e da flora e fauna. /Ou O impacto é irreversível, permanente, altera indicador ambiental com ou sem proteção legal e não modifica a realidade local dos aspectos socioeconômicos, dos aspetos físicos e da flora e fauna	1,6
<b>Severidade crítica</b>	O impacto é irreversível, permanente, altera indicador ambiental com ou sem proteção legal e modifica a realidade local dos aspectos socioeconômicos, dos aspetos físicos e da flora e fauna.	2

Fonte: Adaptado de Moreira (2014).

Cumpridas as etapas anteriores, soma-se ao final o valor ponderado de cada atributo, o qual irá conferir a significância do impacto, que por sua vez, está associado a uma escala de cores a serem preenchidas na matriz. Sendo os graus de significância:

- a) Pouco significante;
- b) Significância média;
- c) Significante;
- d) Muito significante; e
- e) Significância crítica.

Tendo como bases os resultados levantados, conduziu-se uma discussão de relação desta tecnologia com alguns possíveis fatores concernentes a dimensão social. Tais ponderações foram baseadas nos estudos de ciência, tecnologia e sociedade, cumprindo assim, uma análise a esta inovação segundo um viés que de fato vislumbre as vantagens e desvantagens para a coletividade.

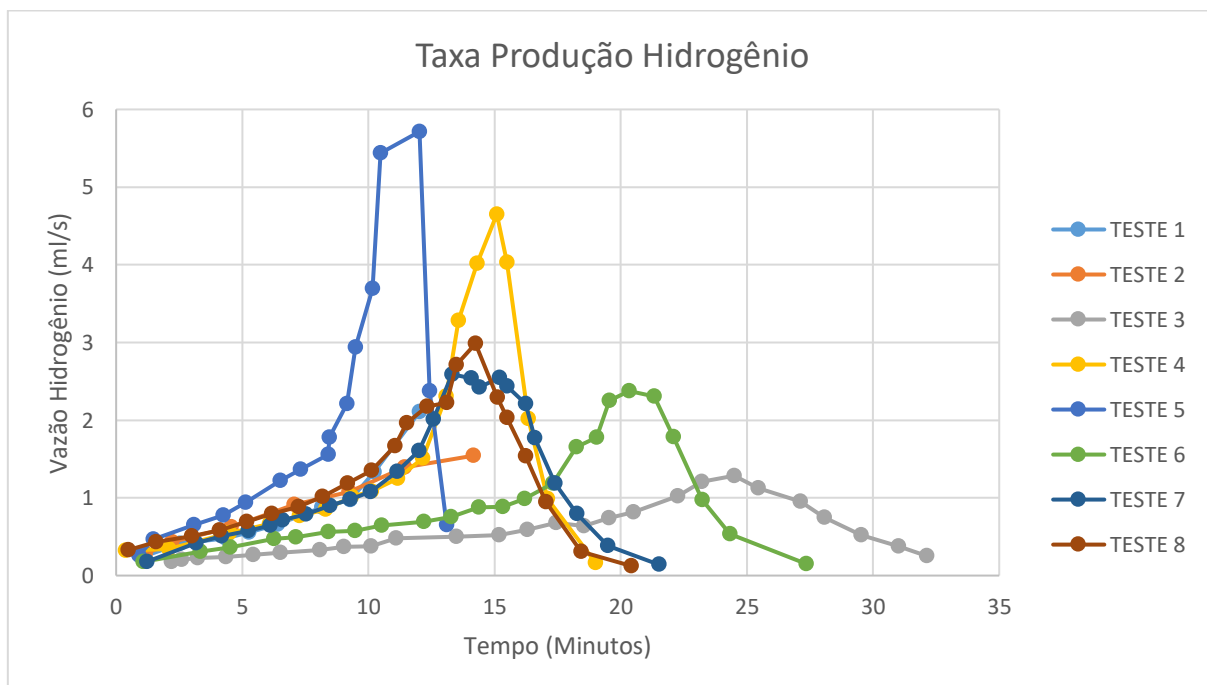
## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos segundo os materiais e métodos descritos no capítulo anterior são exibidos nos próximos tópicos desta dissertação, divididos de igual forma para facilidade de identificação.

### 4.1 ENSAIO LABORATORIAL

Os reagentes e equipamentos para medição do hidrogênio produzido foram montados conforme instruções do item 3.2. Sendo suas marcações e vazões compiladas no Gráfico 5. Foram verificadas diferenças no intervalo de duração da geração do gás, que variou em torno de 12 a 38 minutos, para a amostra proveniente do corpo da lata. A temperatura ambiente marcada foi 22°C. Logo no início a reação alcançou a temperatura de 30°C elevando-se até 40°C no pico de maior produção.

Gráfico 5 - Produção de Hidrogênio por Hidrólise Alcalina para 1g de Alumínio/Corpo Lata



Fonte: Elaborada pela autora.

A média das vazões de cada teste, junto com a estimativa teórica da produção de hidrogênio, foi agrupada na Tabela 8. Tal diferença pode estar correlacionada com a área superficial e diferença da composição e pureza do Al nas latas.

**Tabela 8 - Média das Vazões de Hidrogênio**

TESTE	MÉDIA VAZÃO (mL/min)	TEMPO DE MARCAÇÃO (minutos)	VOLUME H2 (mL)
1	50,857	12	610,29
2	53,686	14	751,61
3	34,500	38	1310,99
4	68,806	20	1376,12
5	120,143	15	1802,14
6	59,442	27	1604,93
7	76,895	22	1691,68
8	78,382	20	1567,64
Média	67,84	21	1.424,62

Fonte: Elaborada pela autora.

A vazão média encontrada foi de 67,84 mL/min com tempo médio de duração de 21 minutos, produzindo um total teórico de 1.424,62 mL de H<sub>2</sub>, quase 1 (um) litro e meio de hidrogênio para 1 (um) grama de alumínio. Extrapolando a produção teórica de 1360 mL (HO; HUANG, 2015).

É importante expor que a vazão volumétrica mensurada em laboratório foi maior que a exposta pela requerente do processo. Pois, segundo Rosa (2015) a equivalência para a quantidade de hidrogênio produzido pode ser feita de acordo com a quantidade de alumínio. A Tabela 9 abaixo mostra um comparativo com os testes realizados em laboratório e as estimativas das vazões de acordo com a massa de alumínio. Frisando que no requerimento da patente é sustentada uma vazão de 7,5 litros/minuto para um somatório de 1,5kg de Al durante seis horas.

**Tabela 9 - Comparativo de Vazões de Hidrogênio**

Alumínio [gramas]	1	10	100	500	1000	1500
Vazão (mL/min)- Evoluções Hidrogás (HIDROGÁS LTDA, 2016)	5	50	500	2.500	5.000	7.500
Vazão Teste (mL/min)	67,84	678,4	6.784	33.920	67.840	101.760

Fonte: Elaborada pela autora.

Extrapolando para 1.000 (mil) gramas é possível estimar uma vazão de 67,84 L/min, sendo em torno de 13,5 vezes maior que a apresentada por Barbosa et al. (2016). No entanto, é presumível esta diferença de resultados, uma vez que no requerimento o medidor utilizado no processo fora um fluxômetro de oxigênio, o qual é calibrado para medir a vazão de um gás que possui uma densidade 16 vezes maior que a do hidrogênio de acordo com as condições de temperatura e pressão do ensaio.

Outros processos de hidrólise que utilizaram alumínio ou pelo menos um metal foram investigados, sendo então formulado a Tabela 10. Ela apresenta a estimativa do volume de hidrogênio produzido conforme os dados dos Quadros 9 e 10 no item 2.3.4 desta pesquisa. Vale destacar que apenas se exibiu os valores de volume daquelas reações que padronizaram sua taxa de produção em mL.(min.g)<sup>-1</sup>, portanto os processos de códigos L, M, R e S não puderam ser equiparados.

**Tabela 10 - Comparativo do Volume de Hidrogênio Produzido entre Processos de Hidrólise**

<b>CÓDIGO</b>	<b>Duração (min)</b>	<b>Taxa de Produção mL.(min.g)<sup>-1</sup></b>	<b>Volume H<sub>2</sub> (mL)</b>
<b>A</b>	20	43,8	876
<b>B</b>	20	40,1	802
<b>C</b>	10	90,6	906
<b>D</b>	1	575	575
<b>E</b>	30	300	9000
<b>F</b>	3	340	1020
<b>G</b>	30	24	720
<b>H</b>	5	24	120
<b>I</b>	15	63	945
<b>J</b>	15	54	810
<b>K</b>	20	47	940
<b>L</b>	60	7,34	440,4
<b>L</b>	2 a 6	5150 ml/min	--
<b>M</b>	30	221 ml/min	--
<b>N</b>	40	19	760
<b>O</b>	400	1113	445200
<b>P</b>	10	130	1300
<b>Q</b>	7	2180	15260
<b>R</b>	75	250 ml/min	--
<b>S</b>	600	90 ml/min	--

Fonte: Elaborada pela autora.

Com este compilado, pode-se notar que o processo de hidrólise alcalina percorrido neste trabalho produziu maior volume de hidrogênio em relação a 13 (treze) processos inseridos. Sendo os processos E, O e Q as reações que apresentaram melhor desempenho de produção. Não obstante, para uma efetiva comparação entre os processos é necessário um maior aprofundamento ligado a questões químicas como balanço de energia, pureza do gás, como também a adição de critérios ambientais como análise de emissão de poluentes e resíduos.

O resultado qualitativo do gás produzido é apresentado na Tabela 10, sendo o certificado de ensaio e os dados da cromatografia incluídos no Anexo B e C.

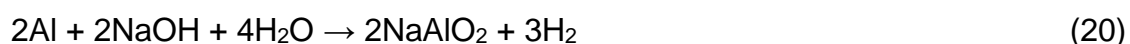
**Tabela 11 - Resultado ensaio cromatografia TCD**

Molécula	(% peso)	Método
<b>Hidrogênio (H2)</b>	84,20	Cromatografia Gasosa TCD
<b>Nitrogênio (N2)</b>	4,94	
<b>Oxigênio (O2)</b>	10,86	

Fonte: Chronion Análises Químicas e Comércio Ltda

Como o bag armazenador para coleta do gás não foi passado a vácuo, é possível que esta porcentagem de nitrogênio seja em boa parte proveniente da composição do ar atmosférico. No entanto, em processos industriais é comum a instalação de purificadores de gases para que a pureza do hidrogênio atinja valores acima de 99,99% (WHITE MARTINS, 2017).

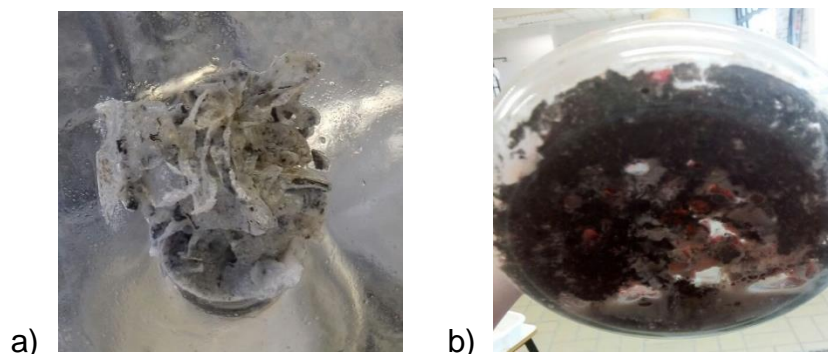
A exata composição da solução e do precipitado foge ao escopo do trabalho, porém pelo pH medido de 13,5, considera-se fortemente a formação de aluminato como descreve Lee (1999, p.192):



Os aspectos dos subprodutos foram fotografados após 24h e 48h, sendo encontrado flutuando uma película que lembra o aspecto de um plástico para a amostra de latinha lixada (Figuras 26).



**Figura 25 - Aspecto do subproduto após 24h (a) latinha lixada, filtrada; (b) aspecto do fundo do bécker sem filtramento.**



Fonte: Autoria própria.

Após agitação e adição de água, deixando repousar por mais cinco minutos o resultado final encontrado é exposto pela Figura 27. Observaram-se dois compostos como subprodutos, um líquido quase transparente e um precipitado pastoso, de cor cinzenta.

**Figura 26 - Aspecto Final da Reação após 48h**



Fonte: Autoria própria.

Para se analisar os subprodutos da reação seria necessário fazer o teste de sólidos dissolvidos e suspensos totais, a fim de poder estimar a quantidade inorgânica de alumínio. Tal análise não foi possível de ser realizada. Segundo Barbosa et al. (2016) o precipitado seria hidróxido de alumínio enquanto a fase líquida seria uma solução fortemente alcalina não corrosiva com pH acima de 12, tendo aplicação como neutralizador, coagulante e combinado com outros reagentes, a possibilidade de obtenção de novas substâncias: hidróxidos, sulfatos, etc.

De acordo com as observações dos autores, a somatória do peso dos subprodutos resultou na importância de 5,935 kg, ou seja, um consumo em torno de 56,08% por parte dos reagentes para produção do gás hidrogênio, tendo um resíduo aproximado de 43,92% em relação ao montante das massas no início do processo.

## 4.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Para estimativa do valor de investimento da planta geradora de hidrogênio por meio do processo de hidrólise alcalina foi consultada a empresa Evoluções Hidrogás Ltda, fornecendo o valor real de mercado em R\$9.630,000,00 para o custo de construção deste sistema com capacidade de produção de 454.600m<sup>3</sup> de Hidrogênio (não armazenado), 1 milhão de litros de composto iônico líquido e 1 mil de metros cúbicos de hidróxido de alumínio. Todos os equipamentos e serviços presentes nesta cotação são mostrados no Anexo A. Foi utilizada a cotação do dólar no valor de R\$ 3,23 para cada conversão comercial referente ao mês de novembro de 2017.

A estipulação do período de operação foi de 8h, 10h e 24h diárias durante 365 dias resultando em uma carga horária anual de 2.920h, 3.640h e 8.760h, em sua devida ordem. Em relação aos valores dos reagentes, a Tabela 12 mostra os custos encontrados para a produção de 5.040,00m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> para um período de 8h horas diárias, segundo dados teóricos da empresa. Resultando no valor de custo por metro cúbico de hidrogênio em R\$2,36.

**Tabela 12 - Quantidade de Matéria-prima Operação de 8 Horas Diárias**

Reagente	Quantidade	Unid.	Custo Unitário	Custo Total	Fonte
Água	16.000,00	Litros	R\$ 0,00771	R\$123,36	(SANEPAR, 2017)
Alumínio	2.500,00	Kg	R\$3,80	R\$9.500,00	(CLASSIFICADOS SUCATAS, 2017)
Hidróxido de Sódio	1.000,00	Kg	R\$2,00	R\$2.100,00	(EVOLUÇÕES HIDROGÁS, 2016)
Ácido Sulfúrico	80,00	Litros	R\$2,10	R\$160,00	
<b>Valor Total Consumo Matéria-Prima</b>				R\$11.883,36	R\$2,36/m <sup>3</sup> .H <sub>2</sub> US\$ 0,73/ m <sup>3</sup> .H <sub>2</sub>

Fonte: elaboração autora.

Portanto, para o encontro de custo de operação nas demais cargas horárias diárias realizou-se a estimativa por equivalência, permanecendo o mesmo valor de custo de hidrogênio por metro cúbico.

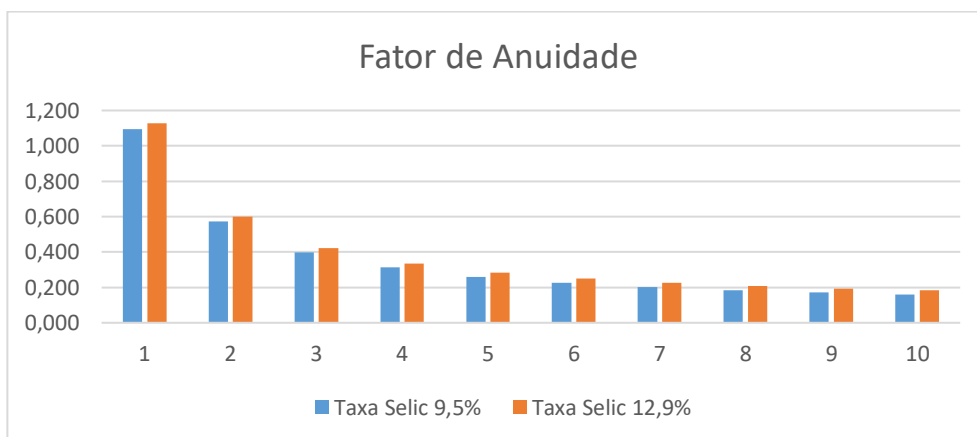
Em seguida, converteu-se a vazão volumétrica em mássica por meio da equação dos gases perfeitos, obtendo a densidade de  $0,205\text{kg}/(\text{m}^3.\text{H}_2)^{-1}$  para temperatura de  $130^\circ\text{C}$  e pressão de  $3,39\text{ atm}$  conforme descrição no requerimento da patente, o qual realizou o procedimento em vasos de pressão apropriados para produção de hidrogênio (HIDROGÁS LTDA, 2016). Multiplicando a massa específica pela vazão volumétrica de  $0,175\text{m}^3/\text{s}$ , atingiu-se o fluxo mássico de  $0,0359\text{ kg/s}$ .

Investigou-se que os combustíveis que contêm hidrogênio quando queimados produzem água, podendo então ter dois tipos de poder calorífico (PCI): (a) *poder calorífero superior*, correspondente à produção da água no estado líquido; e (b) *poder calorífero inferior*, correspondente à formação do vapor d'água. No caso do hidrogênio seu PCI é respectivamente  $143\text{ MJ/kg}$  e  $125\text{ MJ/kg}$ , sendo utilizado neste trabalho o PCI inferior (ROSA, 2015) . Já Braga (2014) e Viola (2015) utilizaram o PCI de  $119.950\text{ kJ/kg}$ , equivalente a  $195,95\text{ MJ/kg}$ . Desta forma, a efeito de comparação será utilizado o valor menor proposto pelo estudo destes dois últimos autores.

Com os valores de PCI e a vazão mássica foi possível encontrar a quantidade de energia contida no hidrogênio na grandeza de  $4.306,74\text{kW}$ , o equivalente a  $34.453,92\text{kWh}$  para o período de 8 horas e  $12.575,69\text{MWh}$  para produção anual.

A taxa anual de juros equivalente ao Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (Selic) para títulos federais relativa ao ano de 2017 variou entre em  $9,15$  a  $12,90\%$  (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2017). Fixando estes dois valores extremos, obteve-se respectivamente  $0,159$  e  $0,184$  para os fatores de anuidade com *payback* de 10 anos. A variação deste fator segundo a amortização é exibida pelo Gráfico 6.

**Gráfico 6 - Variação do Fator de Anuidade**



Fonte: Elaborada pela autora.

Tanto para a taxa anual de juros de 9,5% quanto para o de 12,90% o custo de produção do hidrogênio permaneceu muito próximo para o mesmo período de *payback* com três casas depois da vírgula. Sendo assim, fixou-se a taxa maior, obtendo os seguintes resultados em real (R\$) e dólar (US\$) para o período de amortização de 10 anos (Ver Tabela 13).

**Tabela 13 - Custo de Produção de Hidrogênio por Hidrólise Alcalina**

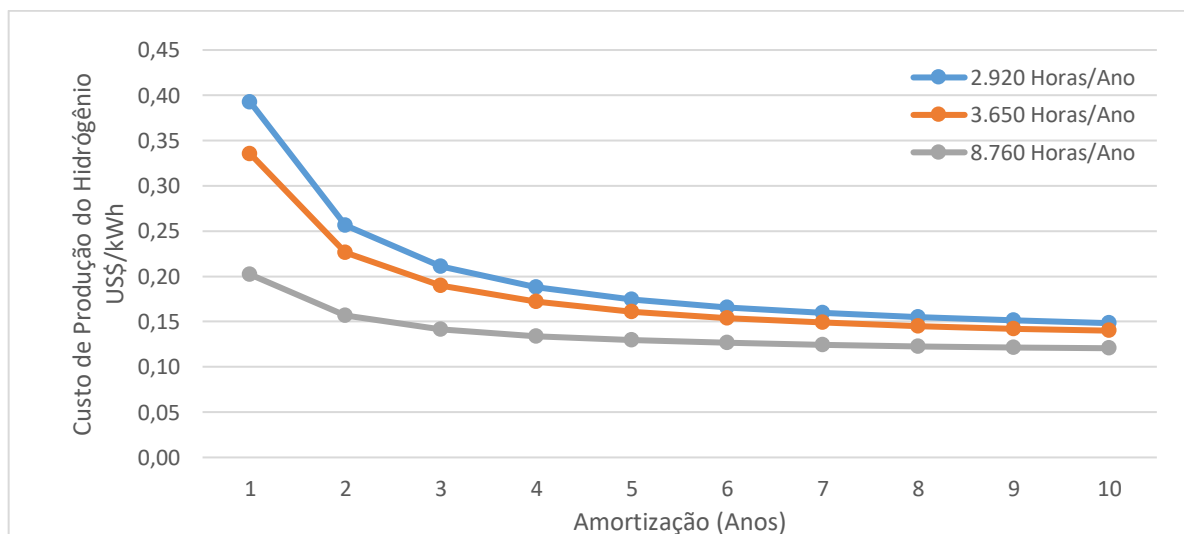
Carga Horário Anual	Taxa 9,5% R\$/kWh	Taxa 12,90% R\$/kWh	Taxa 9,5% US\$/kWh	Taxa 12,90% US\$/kWh
<b>2.920 horas</b>	0,48	0,50	0,15	0,15
<b>3.650 horas</b>	0,45	0,47	0,14	0,15
<b>8.760 horas</b>	0,39	0,40	0,12	0,12

Fonte: Elabora pela autora.

Com estes resultados foi possível notar que a mudança de valor em relação à taxa anual de juros varia muito pouco, sendo encontrado o menor custo de produção do hidrogênio para a carga anual de 8.760 horas, equivalente a R\$0,39 (US\$0,12), e o maior custo para o período de 6 horas diárias.

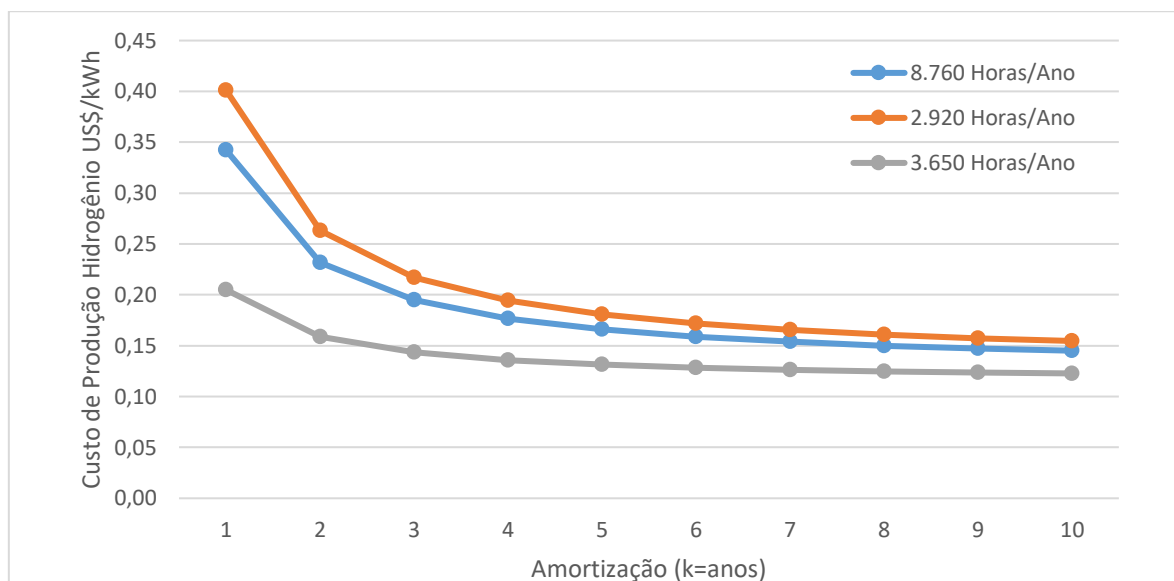
A evolução do custo em função da amortização pode ser visualizada nos Gráficos 7 e 8. Nota-se que os valores diminuem consideravelmente ao longo do tempo de investimento. Tendo a tendência de se estabilizar a partir do décimo ano de operação.

**Gráfico 7 - Evolução Custo de Produção do Hidrogênio por Hidrólise Alcalina Taxa Selic 9,5%**



Fonte: Elaborada pela autora.

Gráfico 8 - Evolução Custo de Produção do Hidrogênio por Hidrólise Alcalina Taxa Selic 12,9%



Fonte: Elaborada pela autora.

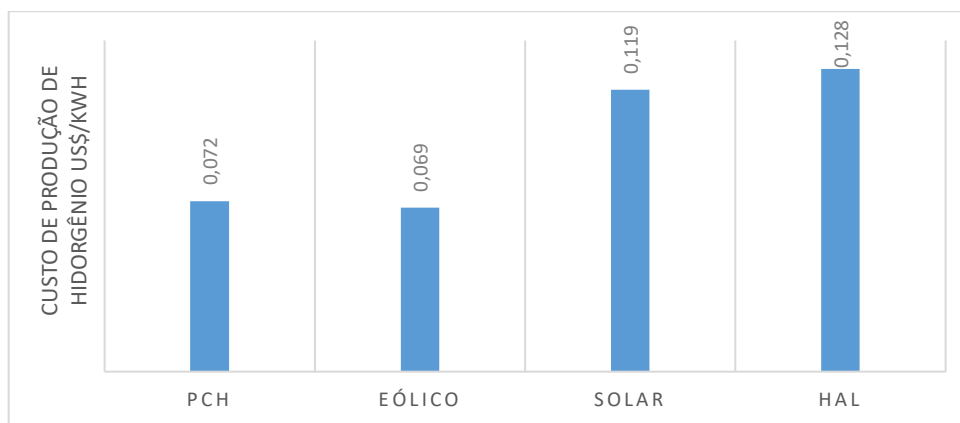
Como o maior custo de operação se encontra na sucata de alumínio, válido é expressar que a taxa anual de juros também reside neste insumo, podendo então encarecer o processo de acordo com a cotação de sua tonelada. Destaca-se que não foram contabilizados o fator de consumo de energia elétrica para acionamento do maquinário da indústria. Bem como, o prévio tratamento da água, pois dependendo da finalidade de uso da técnica ou mesmo aumento de agregação de valor na cadeia de produção com a reutilização dos subprodutos, este custo seria aumentado de acordo com o padrão de qualidade do solvente.

Um exemplo seria o direcionamento do processo a fim de obter insumos químicos que precisam manter certo tipo de qualidade e composição química. No entanto, a finalidade de uso do processo de hidrólise alcalina seria a obtenção de hidrogênio, sendo, portanto, suficientes características como da água superficial, tanto continental quanto oceânica.

Em conferência com as contribuições de Luigi Viola (2015), que calculou o custo de produção do hidrogênio a partir de fontes renováveis, como solar, eólica e hidroelétrica (PCH) pelo processo eletrolítico, foi compilado o Gráfico 9 a partir da correção da cotação do dólar, fixação da amortização para 8 anos e período de operação para 20 horas diárias conforme usado pelo autor.

Nota-se que o processo de hidrólise alcalina (HAL) é o que apresenta o maior valor de acordo com esta padronização de variáveis utilizando três casas decimais, no entanto, a diferença que se encontra é a partir da segunda casa. Sendo assim, conforme já comentando anteriormente, ao longo do período de *payback* acima de 10 anos é possível chegar em valores menores, tornando o custo benefício tão atrativo quanto é fornecido pelas outras fontes renováveis.

**Gráfico 9 - Custo Comparativo de Produção de Hidrogênio com Fontes Renováveis**



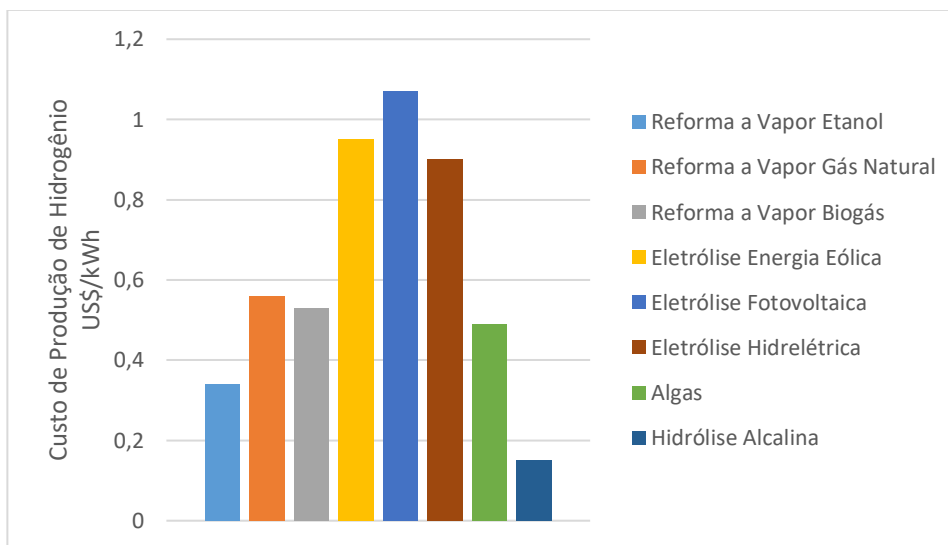
Fonte: Elaborada pela autora.

Gustavo Braga (2015) também encontrou valores próximos aos resultados mencionados anteriormente para o período de 10 anos de amortização, sendo eles: 0,14 US\$/kWh para PCH; 0,19 US\$/kWh para eólica e 0,29 US\$/kWh para solar. Portanto o processo eletrolítico a partir de energia solar é o que apresenta o maior valor de custo-benefício conforme dados do autor, enquanto o processo de hidrólise alcalina o melhor custo-benefício com 0,12 US\$/kWh.

Agora, já em comparação com a tese de Lúcia Braga (2014) que também realizou um levantamento de custo de produção do hidrogênio pelos processos eletrolíticos, fotolíticos e termoquímicos, não foi possível realizar a conversão do dólar, apenas a adaptação para o período de operação em 10 horas diárias e amortização de nove anos, sendo os resultados obtidos diferentemente dos apresentados anteriormente. Esta outra compilação é visualizada no Gráfico 10 .

Nota-se que a diferença de valores com o método de hidrólise alcalina são decorrentes dos altos custos de investimentos para tecnologias como eletrólise via energia fotovoltaica, eólica e hidrelétrica, variando apenas entre estes os custos de operação (BRAGA, 2014).

**Gráfico 10 - Comparativo de Produção do Hidrogênio por Processo**



Fonte: Elaborada pela autora.

### 4.3 ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL

Como o processo de hidrólise alcalina com reutilização do alumínio para produção de hidrogênio esta em fase de estudo e planejamento, não tendo no presente momento nenhum empreendimento para coleta de dados, foram compilados aspectos e impactos de uma planta hipotética com base na literatura. A fim de conhecer as entradas e saídas da cadeia produtiva, foi proposto um fluxo de mercado baseado na reutilização de alumínio para produção de hidrogênio (Figura 28).

Para esquematização do fluxo, os limites de onde iniciar e parar a análise do sistema, foram restringidos os insumos direcionados para planta geradora de hidrogênio, não sendo acumulados os impactos indiretos negativos das indústrias que extraem e manufaturam as matérias-primas para o referido empreendimento. Desta forma foi compilado informações sobre os materiais para produção de hidrogênio por meio da HAL, a fim de poder identificar se os recursos são renováveis ou não, contribuindo assim para o prévio diagnóstico dos aspectos da matriz de interação (SILVA, 2012).

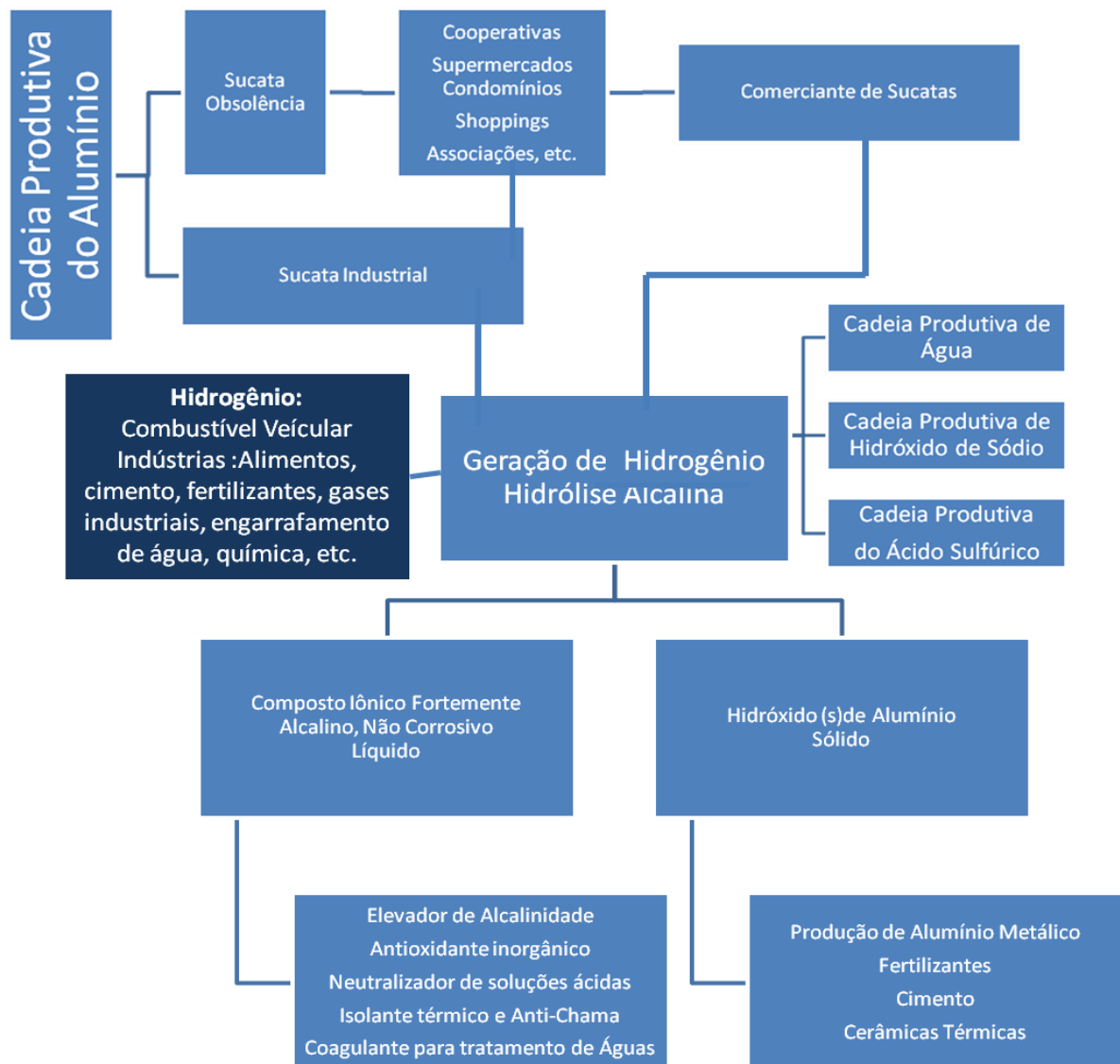
Em relação ao hidróxido de sódio ou soda caustica este insumo químico constitui um dos produtos químicos mais amplamente utilizados pelas indústrias como papel, alumina, têxtil, galvanoplastia, detergente e águas residuais. Atualmente a água do mar, lagos, rios e rochas são fontes de extração, e dependendo da fonte pode-se classificar este recurso natural como renovável (SILVA, 2014). Para fins industriais os processos utilizados para produção de soda são eletrólise da solução de cloreto de sódio com mercúrio, diafragmas ou células de membrana (MARTINS, 2011).

Por mais que este setor tenha grande magnitude poucos são os estudos que têm analisado o impacto desta indústria no meio ambiente por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ALVAREZ-GAITAN et al., 2013). Tal necessidade é apontada devido às significativas emissões de carbono e lançamento de compostos tóxicos para o ambiente local, como metais pesados e organoclorados, além de melhoria do desempenho ambiental em sua extração, transformação e transporte (HONG et al., 2014).

Ainda, visto o consumo crescente de energia LIMA et al., (2010) complementam indicando a necessidade iminente do avanço tecnológico e diminuição do consumo de energia para a produção do álcali.



Figura 27 - Cadeia Produtiva da Geração de H<sub>2</sub> com a Reutilização da Sucata de Alumínio



Fonte: Elaborada pela autora.

Segundo HONG et al., (2014), mais estudos que aumentem o banco de dados do inventário de ciclo de vida para a produção de soda cáustica são requeridos a fim de reconstruir e transformar as indústrias cloro-soda, pois com uma avaliação sistêmica e conjunta de fatores econômicos, sociais, políticos e ambientais é possível que tais produtos químicos contribuam com a sustentabilidade.

O enxofre, cuja principal aplicação é na produção de ácido sulfúrico, possui fontes variadas e abundantes, sendo encontrado em ordem decrescente em: depósitos de enxofre elementar, o H<sub>2</sub>S recuperado do gás natural, do petróleo, da

pirita ( $\text{FeS}_2$ ). A maioria dos solos contém teores altos de enxofre nutriente, sendo os principais usos no setor industrial. Seu ciclo biogeoquímico permite que este recurso natural seja repostado (MANAHAN, 2016). Os principais problemas ambientais dos óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) são: acidificação do solo, eutrofização e acidificação do água e poluição atmosférica. A origem deste poluente atmosférico está relacionada a queima de carvão em termoelétricas (DAVIS;MASTEN, 2016). Como no ensaio laboratorial não foi possível realizar a análise dos gases emitidos, a primeira vista, levantando-se em consideração a pequena porcentagem de 1% em relação aos outros reagentes pode-se constatar que não ocorreria emissão de sulfetos, no entanto, são necessárias maiores investigações para dados precisos.

Em relação às matérias-primas, a água utilizada na reação é do oceano, não necessitando de tratamento preliminar para fins de geração de hidrogênio, portanto, considerado um recurso renovável (HUSSAIN et al., 2017). Em contrapartida o processo de obtenção do alumínio é energeticamente elevado, o que não compensaria para produzir  $\text{H}_2$ . O conhecimento desta análise multidisciplinar referente a cadeia produtiva do alumínio pode ser melhor aprofundado nos estudos desenvolvidos por Casagrande Jr (1996), Henriques e Porto (2013), Melo e Gomes (2016), Fearnside (2016) e Lúcia et al.,(2017), os quais listaram os impactos econômicos e socioambientais das atividades de extração do alumínio primário.

Como a proposta deste estudo é a reutilização de sucatas de alumínio, um material que tem a vida útil esgotada pós-consumo, que assim como o nome implica, têm sua origem na etapa pós-consumo (ABAL, 2008). Podendo ser materiais para a produção do hidrogênio as seguintes sucatas: latinhas, painéis, rodas de carros, cabos, perfis, chaparias e cavacos. Indicando desta forma mais uma alternativa de reutilização do material (BERNARDES et al., 2014).

Com as informações anteriormente expostas, pode-se construir uma matriz de interação para uma prévia avaliação dos impactos negativos e positivos na dimensão socioambiental, que inevitavelmente incorpora os aspectos econômicos e vice-versa (Figura 28). Dentre os impactos ponderados, os que tiveram maior significância, com valores atribuídos acima de 25, para este processo de produção do hidrogênio, foram:

- a) Possíveis Ferimentos e Mortes:** o tamanho pequeno da molécula de hidrogênio faz com que este gás vaze facilmente através de minúsculos

buracos e fendas, e se houver uma grande quantidade concentrada dele, podem ocorrer explosões que ocasionam em ferimentos e mortes. Sua reputação como um gás perigoso é muito relacionada com a explosão de 1937 do Hindenburg, em Nova Jersey, quando 36 pessoas morreram. No entanto, pela mesma propriedade, o gás ligeiramente sobe rapidamente e dispersa, enquanto outros combustíveis formam poças que espalham fogo (ROSA, 2015);

- b) Redução de Emissões Veiculares:** Conforme já exposto no referencial teórico o setor de transporte representa quase um quarto das emissões globais de CO<sub>2</sub>, desta forma, veículos movidos a hidrogênio podem impactar positivamente na redução de emissões veiculares, extrapolando os limites do empreendimento e atingindo uma magnitude grande quando ocorrer o aumento de disponibilidade da frota acessível para todas as classes sociais (BRANDON; KURBAN, 2017);
- c) Melhoria da Qualidade de Ar:** Com a diminuição de emissões de gases do efeito estufa ocorre a melhoria da qualidade de ar, melhorando os aspectos tanto para a biota quanto para a sociedade. No processo de reciclagem do alumínio tal segmento é responsável por apenas 5% das emissões de CO<sub>2</sub> quando comparado com às emissões da produção de alumínio primário (ABAL, 2008). Desta forma, é possível melhorar o índice de qualidade do ar caso o processo de hidrólise alcalina seja estruturado de forma a se evitar o máximo possível de emissões em suas atividades de implantação e operação.
- d) Qualidade da vida/saúde humana:** Melhorando a qualidade de ar diretamente a vida humana é afetada de forma positiva, tanto para os residentes da área quanto para suas proximidades que utilizam a tecnologia, de forma a alterar aspectos ambientais e diminuir custos da saúde pública.
- e) Hábitos de Consumo:** Tendo em vista que os preços de combustíveis convencionais tendem a crescer por serem finitos, bem como, o aumento da conscientização da população em relação aos impactos onerosos ao clima com o uso destes, é possível indicar um impacto de grande significância na sociedade em relação aos hábitos de consumo. Principalmente se ocorrer o impulso dos meios de comunicação por parte tanto dos fornecedores de

hidrogênio quanto dos distribuidores finais. A medida que a sensação de perpetuidade no fornecimento de hidrogênio é aumentada maior é a decisão de mudança por parte dos consumidores (SILVA, 2012).

**f) Aumento da competitividade entre recicladores:** Os recicladores são os beneficiadores secundaristas da reciclagem de alumínio. Com a entrada no mercado do processo de HAL para geração de hidrogênio é previsto o aumento da competitividade do alumínio secundário, impactando nas negociações com os comerciantes de sucata. Podendo assim contribuir de maneira positiva para associações e cooperativas de catadores.

**g) Aumento da mudança estrutural da cadeia de valor:** Com a imersão do hidrogênio a partir da HAL, o qual possibilita o fornecimento do combustível no local, é possível prever uma mudança estrutural na cadeia de valor de forma crítica, a ponto de mudar em longo prazo o regime atual centralizado para uma cadeia de fornecimento descentralizada (RIFKIN, 2012). Tal mudança na cadeia exige a inserção de novas tecnologias, educação ambiental além de responsabilidade social (SILVA, 2012).

Os outros impactos listados são típicos de construções e instalações industriais, que possuem sua significância, podendo ser reduzidos mediante a um planejamento estratégico que incorpore as normas de licenciamento, fiscalização e monitoramento ambiental.

Com esta análise percebe-se a importância da investigação não apenas na dimensão econômica, mas também no âmbito socioambiental, pois toda geração de energia acarreta em impactos ambientais e sociais, que implicam em custos impostos a sociedade. Tais externalidades devem ser incorporadas nos custos como uma ferramenta racional de análise de cada alternativa energética (VIOLA, 2015).

Além disso, no que tange a ponderação dos impactos ambientais, deve ser levado em consideração que sua magnitude e severidade, percebidas de maneira diferente para cada pessoa, dependendo principalmente do envolvimento com assunto e de interesses locais ou gerais próprios (SILVA, 2014).



### 4.3.1 Responsabilidade Social

“A responsabilidade deve ser entendida como medo primeiro, como uma ação que se antecipa ao agir e que podemos compreendê-la como prudência em vista de possíveis consequências desconhecidas da ação humana. Além de entendermos como “sentimento” podemos considera-lo também como uma forma de conhecimento, ou seja, um “*saber de possibilidades*” (FONSECA, 2009)”.

Conforme mostrado anteriormente, a inserção desta tecnologia na sociedade implica em possibilidades para um novo cenário de desenvolvimento sustentável, sejam eles para o equilíbrio ambiental e econômico ou mesmo para o prolongamento da capacidade de suporte. No entanto, para afirmação deste conceito é necessário a integração da justiça e solidariedade em seu triple (JACOBI, 1999).

A possibilidade imediata a qual se vislumbra na dimensão social seria a maior valoração do resíduo de alumínio gerado. Despertando o principal interesse de conversão da sucata em valor econômico tangível, pois, a latinha coletada hoje é o combustível/energia de amanhã. Considerando os resultados quantitativos e qualitativos levantados em laboratório junto com os dados fornecidos pela ABAL (2017), uma latinha de refrigerante que contém em média 14,5 gramas pode gerar aproximadamente 22,72 litros de hidrogênio. Para se encher 140 litros do tanque de armazenamento do carro estilo Hyundai Tucson, seriam necessárias em torno 6 (seis) latas de alumínio que permitiriam a condução equivalente a 426 km de distância (HYUNDAI, 2017). Ainda, observando a média brasileira do consumo de 51 latas de alumínio por habitante é possível estimar a geração de aproximadamente 1.158,60 litros de hidrogênio, o suficiente para um cidadão abastecer 8 (oito) vezes o seu carro por ano. Desta forma, ocorreria uma motivação a mais para a reutilização desta sucata.

Outro ponto importante a discorrer seria a mudança de valores individuais e coletivos, inserindo-se neste contexto os agentes tradicionais como os catadores, sendo participantes ou não de associações ou cooperativas, pois são agentes fundamentais para a organização e gestão tanto dos resíduos sólidos como para geração de energia nos espaços urbanos (LIMA et al., 2011). O surgimento desta alternativa descentralizada amplia o raio de influência sobre estes agentes,

oferecendo oportunidades para o desenvolvimento de sua atuação, como também, auxílio em seu reconhecimento social, visto que são atores determinantes para efetivação deste sistema integrado.

Conforme citado por Jonas (2006, p.66) as “capacidades de ação de um novo tipo exigem novas regras de ética, e talvez mesmo, uma ética de novo tipo” , sendo assim, tal tecnologia exige um discurso ético capaz de dar suporte aos seus empreendimentos. A começar pelo próprio nome informal da profissão: catador. Podendo ser então renomeado como agente ambiental ou mesmo seletor ambiental, visto que é um trabalho que permite a redução de custos públicos com o descarte de resíduos urbanos e segundo esta pesquisa, um promovedor de energia alternativa e preservação ambiental.

Conforme explicam Lima et al. (2011) tais seletores são:

“[...] submetidos à exploração de atravessadores, [...] enfrentam vários empecilhos à melhoria da produtividade de suas associações, relacionados aos processos de trabalho e de produção que utilizam, deparando-se com dificuldades para lidar com conhecimentos e tecnologias inerentes à cadeia produtiva em que se inserem.”

Trata-se, portanto, da necessidade de potencializar iniciativas de acesso a informação e capacitar tais recursos humanos, criando cursos de reconversão profissional e desenvolvimento de competências (SENAI, 2008). Pois uma parcela da tomada de decisão complexa “qual é a melhor destinação dos resíduos de alumínio? Não apenas do ponto de vista dos catadores, mas da sociedade como um todo?” é feito por eles (LIMA et al.,2011).

Sendo assim, configurou-se o Gráfico 11 que representa os principais atores que são responsáveis pela cadeia de valor da geração de hidrogênio a partir da sucata de alumínio. De fato, conforme vislumbra Rifkin (2012, p.244) o “engajamento, integração, reposição e holismo” são formas de tornar a natureza sustentável, levando-nos a uma nova visão de que ela deve ser uma comunidade cultuada, trazendo além do direito de explorar a obrigação de zelar. E assim, para asseguar

de tal suporte o mesmo princípio de “relações ativas e parcerias” deve ser aplicado em um sistema com democratização da energia.

**Gráfico 11 - Principais atores na cadeia de produção de H<sub>2</sub> a partir da sucata de alumínio**



Fonte: Elaborada pela autora.

Outra instância seria a consolidação da produção deste vetor energético em pequena escala, tornando a geração distribuída por meio da hidrólise alcalina um candidato a compor e diversificar o oficial sistema elétrico (SENAI, 2008). Junto com o uso da tecnologia da internet, poderia adequar este setor em uma “rede interativa de infoenergia”, permitindo que a comunidade possa gerar sua própria energia e a compartilhe (RIFKIN, 2012, p.74). Dando espaço assim para a rede elétrica inteligente a qual permite economizar investimentos em transmissão e reduz perdas de energia e emissões de GEE neste sistema. Oferecendo a democratização da energia imensamente poderosa, que segundo Winner (1986) é mais compatível com a igualdade e participação social por meio da noção de responsabilidade, mas que por outro lado é mais instável e relativamente fraca.



## CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme exposto neste trabalho, a geração de energia para suprimento das necessidades da sociedade moderna necessita ser avaliada pelos pesos da sustentabilidade, promovendo a criação de novos espaços no mercado que permitam o desenvolvimento econômico e segurança energética com responsabilidade social e ambiental. Por meio desta interdisciplinaridade, os argumentos e resultados expostos fortaleceram a importância de sempre estar conversando com a tecnologia.

Sendo assim, pode-se inferir que o processo de hidrólise alcalina para geração de hidrogênio com a reutilização da sucata de alumínio é uma alternativa energética que viabiliza a produção do gás de forma prolongada com a adição do ácido em sua reação. Em comparativo com outras reações de hidrólise, este processo se mostrou vantajoso devido a sua simplicidade de produção, aquisição de matérias primas e bom desempenho de produção do gás em relação a maioria dos outros processos.

Nos aspectos econômicos levantados, concluiu-se que o processo investigado apresentou o melhor custo-benefício em confronto com outras fontes alternativas de produção de hidrogênio segundo o levantamento de Braga (2015) e Braga (2014). Já em comparação com o estudo de fontes renováveis de hidrogênio feito por Viola (2015) seu valor foi o mais alto, porém, se enquadrou muito próximo dos dados exibidos.

Conforme a exposição da análise socioambiental, seu desenvolvimento impacta de forma positiva para a redução de emissões do GEE e melhoria da qualidade do ar, favorecendo a descarbonização da cadeia produtiva. Além de estimular a superação de déficits sociais, por meio de iniciativas entre interlocutores como os agentes ambientais e participantes sociais (consumidores), introdução de valores éticos, noção de participação, e reforça-se o sentimento de responsabilidade com o meio ambiente e as relações ativas na comunidade.

Assim, seu estabelecimento implica em um processo de diálogo informado e de práticas educativas que construam uma nova forma de pensar, promovendo experiências de relações compartilhadas, cada vez mais inclusivas de caráter profundamente social (RIFKIN, 2012, p.262).

Portanto, o desenvolvimento tecnológico de novas formas de produzir energia se complementaria com a implementação da geração distribuída, que por sua vez, contribuiria para a democratização da energia, visto que o acesso à eletricidade, com produção em pequena escala, é um ponto inicial indispensável para melhoria da qualidade de vida de qualquer grupo social.

Tal postura, que mescla fatores socioeconômicos e ambientais, permite levantar duas indagações chaves para avaliação pontual desta tecnologia alternativa: - Hidrogênio por hidrólise alcalina **pra quê?** – Hidrogênio por hidrólise alcalina **pra quem?** As respostas para as duas perguntas podem ser tanto para contribuição de maior equidade e melhoria dos estilos de vida da sociedade quanto para verificação dos tipos de benefícios desta inovação em meio social.

E assim, pesquisadores do campo de ciência, tecnologia e sociedade podem contribuir com a somatória de elementos inerentemente sociais, sejam eles valores morais, interesses profissionais, ambientais ou econômicos, os quais contribuem para a reflexão e emancipação do ser humano em relação às tecnologias propostas como ideais em nossa contemporaneidade.

Diante do que foi estudado e exposto para os leitores, foi possível verificar os limites desta pesquisa, o que abre espaço para sua continuidade. Apresentam-se a seguir sugestões para trabalhos futuros, pois a composição sinfônica sempre está longe de ser acabada:

- a) Análises físico-químicas dos subprodutos e gás produzido para quantificação do grau de pureza;
- b) Taxa de produção de hidrogênio com diferentes tipos de sucatas de alumínio e outros metais anfóteros;
- c) Análise do ciclo de vida dos recursos para produção de hidrogênio via hidrólise alcalina;
- d) Análises de aplicação e reutilização dos subprodutos com outros materiais;e
- e) Educação ambiental e a mudança de hábitos para veículos movidos a hidrogênio.

## REFERÊNCIAS

- ABAL. **Guia Técnico do Alumínio: Reciclagem.** Associação Brasileira do Alumínio, São Paulo, 2008.
- ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio.** Disponível em: <<http://abal.org.br>>. Acesso em: 9 set. 2017.
- ABAS, N.; KALAIR, A.; KHAN, N. **Review of fossil fuels and future energy technologies.** Futures, v. 69, p. 31–49, 2015.
- ABRAF. **Anuário estatístico 2016.** Associação Brasileira do Alumínio, São Paulo, 2017.
- ACAR, C.; DINCER, I. **ScienceDirect Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 39, n. 1, p. 1–12, 2013.
- ALLY, J.; PRYOR, T.; PIGNERI, A. **The role of hydrogen in Australia's transport energy mix.** International Journal Of Hydrogen Energy, v. 40, n. 13, p. 4426–4441, 2015.
- ALVAREZ-GAITAN, J. P.; PETERS, G. M.; ROWLEY, H. V.; MOORE, S.; SHORT, M.D. **A hybrid life cycle assessment of water treatment chemicals: an Australian experience.** The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 18, n. 7, p. 1291–1301, 2013.
- AMBARYAN, G. N.; VLASKIN, M.S.; DUDOLADOV, A.O.; MESHKOV, E.A.; ZHUK, A.Z.; SHKOLNIKOVA, E.I. **Hydrogen generation by oxidation of coarse aluminum in low content alkali aqueous solution under intensive mixing.** International Journal Of Hydrogen Energy, v. 41, n. 39, p. 17216–17224, 2016.
- ANDREWS, J.; SHABANI, B. **The role of hydrogen in a global sustainable energy strategy.** Wiley Interdisciplinary Reviews-Energy And Environment, v. 3, n. 5, p. 474–489, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Relatório anual de sustentabilidade (2012).** São Paulo: 2012. Disponível em: <[http://www.samarco.com.br/templates/samarco\\_201011/img/ico/icoDownload.gif](http://www.samarco.com.br/templates/samarco_201011/img/ico/icoDownload.gif)>.
- BARBIERI, J. C. et al. Vasconcelos, I. F. G.; Andreassi, T.; Vasconcelos, F. C. **Inovação e sustentabilidade: Novos modelos e proposições.** Revista Administração de Empresas, v. 50, n. 2, p. 146–154, 2010.
- BERGSDAL, H.; STRØMMAN, A. H.; HERTWICH, E. G. **The Aluminium Industry: Environment, Technology and Production.** Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Trondheim, 2004. Disponível em: <<http://www.cntq.gob.ve/cdb/documentos/quimica/171.pdf>>.
- BERNARDES, L. H.; Deamici, K.M; Oliveira, L.C; Oliveira, E. G. **Produção De Hidrogênio Via Corrosão Alcalina De Latas De Alumínio Recicláveis.** X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica, v. 1, n. 2, p. 8–11, 2014.
- BRACK, P., DANN, S., WIJAYANTHA, K. G., ADCOCK, P., FOSTER, S. **A Simple, Low-cost, and Robust System to Measure the Volume of Hydrogen Evolved by Chemical Reactions with Aqueous Solutions.** J. Vis, v. Exp. (114), n. e54383, 2016.
- BRAGA, G. G. A. **Aspectos Técnicos, Econômicos E De Sustentabilidade Da Produção De Hidrogênio Renovável.** [s.l.] Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- BRAGA, L. B. **Aspectos Técnicos, Econômicos E Ecológicos De Processos De Produção De Hidrogênio.** [s.l.] Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual

Paulista, 2014.

BRANDON, N. P.; KURBAN, Z. **Clean energy and the hydrogen economy**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 375, n. 2098, 2017.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas I**. Brasília: 2016. Disponível em: <[www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br)>.

BRASIL, E. DE P. E. **Balço Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: 2016. Disponível em: <[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>.

BRASIL, M. DAS C.; SNSA, S. N. DE S. A. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2015**. SNSA. Brasília: 2015.

CAMPANHOTO, T. R. **Metodologia para Estimativa das Emissões Evitadas de Gases de Efeito Estufa na Geração de Energia Elétrica a partir do Hidrogênio Eletrolítico obtido através da Energia Vertida Turbinável Metodologia para Estimativa das Emissões Evitadas de Gases de Efeit**. 148p. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 2016.

CASAGRANDE JR, E. F. **Sustainable Development and the Northern Exported-Oriented Aluminium Industry in Brazil: A Multidisciplinary Analysis**. 270p. University of Nottingham, 1996.

CGEE. **Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2015**. 68 p. Brasília: 2010.

CHAUBEY, R; Sahu, S; James, O. O; Maity, S. **A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 23, p. 443–462, 2013.

CLASSIFICADOS SUCATAS. **Tabela Nacional de Preços das Sucatas**. Disponível em: <[www.sucatas.com.br](http://www.sucatas.com.br)>. Acesso em: 8 dez. 2017.

COSTA, B. F. DA. **Alumínio como pele de alçado : três casos de estudo**. [s.l.]Universidade Lusíada de Lisboa, 2016.

COUNCIL, H. **How hydrogen empowers the energy transition**. Hydrogen Council, 2017. Disponível em: <<http://hydrogencouncil.com/>>.

CREMONEZ, F. E; Cremonez, P.A; Feroldi, M; Camargo, M. P. Klajn, F. F; Feiden, A. **Avaliação De Impacto Ambiental: Metodologias Aplicadas No Brasil**. Revista Manografias Ambientais, v.13,p.3821-3830, 2014.

DAI, H.-B; MA, G.L;XIA, H.J;WANG,P. **Reaction of aluminium with alkaline sodium stannate solution as a controlled source of hydrogen**. Energy & Environmental Science, v. 4, n. 6, p. 2206–2212, 2011.

DALAPATI, G. K.; Chua, C. S.; Kushwaha, A. Liew, S. L; Suresh, V; Chi, D. **All earth abundant materials for low cost solar-driven hydrogen production**. Materials Letters, v. 183, p. 183–186, nov. 2016.

DARROW, K.; PAM, R. **Appropriate Technology SourceBook**. U.S.A: Volunteers in Asia, 1981.

DAVIS, M. L.; MASTEN, S. J. **Princípios de Engenharia Ambiental**. 3ª edition ed. [s.l.] AMGH Editora Ltda, 2016.

DIAS, G. F. **Educação e Gestão Ambiental**. [s.l.] Global Editora e Distribuidora, 2015.

DINCER, I. **Green methods for hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 37, n. 2, p. 1954–1971, 2012.

DINCER, I.; ACAR, C. **Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 40, n. 34, p. 11094–11111, 2015.

DINCER, I.; BALTA, M. T. **Operating characteristics of transcritical CO<sub>2</sub> heat pump for simultaneous water cooling and heating**. Archives of Thermodynamics, v. 33, n. 4, p. 23–40, 2011.

DINCER, I.; ZAMFIRESCU, C. **Sustainable hydrogen production options and the role of IAHE**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 37, n. 21, p. 16266–16286, 2012.

DUDOLADOV, A. O.; Buryakovskaya, O. A.; Vlaskin, M. S.; Zhuk, A. Z.; Shkolnikov, E. I. **Generation of hydrogen by aluminium oxidation in aqueous solutions at low temperatures**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 4, p. 2230–2237, 2016.

DUTTA, S. **A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource**. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 20, n. 4, p. 1148–1156, 2014.

EDWARDS, P. .; KUZNETSOV, V. .; DAVID, W. I. . **Hydrogen energy**. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 365, n. 1853, p. 1043–1056, 2007.

EPE/MME. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 5 anos (2016-2020)**. Estudos da Demanda, v. 19, n. 15, p. 88, 2015.

EVOLUÇÕES HIDROGÁS. **Evoluções Hidrogás**. Disponível em: <<http://evolucoeshidrogas.com.br/web/>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

FEARNSIDE, P. M. **Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry**. World Development, v. 77, p. 48–65, 2016.

FERREIRA, A. C. M. B.; FARIA, A. M. M.; RIBEIRO, A. R. R.; AZEVEDO JUNIOR, W. C. DOMINGOS, H. D.; MANSO, J. P. **Reciclagem de Alumínio e Estimativa de Poupança de Energia no Brasil**. Revista Eletrônica de Energia, v. 4, n. 1, p. 75–88, 2014.

FIGUEIREDO, V. **Produção Social da Tecnologia**. São Paulo: EPU, 1989.

FONSECA, F. O. **Hans Jonas: ética para a civilização tecnológica**. In: Cadernos de Ciências Sociais Aplicadas. n. 5/6 ed. Vitória da Conquista-BA: UFS, 2009. p. 151–156.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5 ed. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GODOY, G. A. R. **Rodovia do hidrogênio Brasil - Paraguai: estudo técnico, econômico e ambiental**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2013.

GREENPEACE. **[R]evolução Energética**. Cenário Brasileira p. 1–96, 2016.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física, v:1: Mecânica**. 10<sup>a</sup> ed. 2016.

HENRIQUES, A. B.; PORTO, M. F. S. **A insustentável leveza do alumínio: impactos socioambientais da inserção do Brasil no mercado mundial de alumínio primário**. The unbearable lightness of aluminum: the social and environmental impacts of Brazil 's insertion in the primary aluminum global. Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal, v. 18, n. 11, p. 3223–3234, 2013.

HIDROGÁS LTDA. **Processo de hidrólise alcalina para obtenção de hidrogênio e eletrólitos**.

PCT/BR2015/050242. BRPE2078. Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI , 2016.

HO, C. Y.; HUANG, C. H. **Enhancement of hydrogen generation using waste aluminum cans hydrolysis in low alkaline de-ionized water**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 6, p. 3741–3747, 2015.

HONDA. **Clarity Fuel Cell**. Disponível em: <<https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell#how-long-does-it-take>>. Acesso em: 2 dez. 2017.

HONG, J; CHEN, W.;WANG, Y.;XU, C.;XU,X. Life cycle assessment of caustic soda production: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 113–120, 2014.

HUANG, X. et al. **A review: Feasibility of hydrogen generation from the reaction between aluminum and water for fuel cell applications**. Journal of Power Sources, v. 229, p. 133–140, 2013.

HUANG, X.-N; Lv, C.-J; Huang, Y.-X; Liu, S;Wang, C.; Chen, D. **Effects of amalgam on hydrogen generation by hydrolysis of aluminum with water**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 36, n. 23, 2011.

HUGHES, T. P. **A evolução de grandes sistemas tecnológicos**. In: THOMAS, Héran; BUCH, Alfonso (Org.). Actos, actores y artefactos: sociología de la tecnología. Bernal: Universidade Nacional de Quilmes, 2008. p. 101–145.

HUSSAIN, A.; ARIF, S. M.; ASLAM, M. **Emerging renewable and sustainable energy technologies : State of the art**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 71, n. June 2015, p. 12–28, 2017.

HYUNDAI. **Tucson Fuel Cell**. Disponível em: <<https://www.hyundaiusa.com/tucsonfuelcell/index.aspx>>. Acesso em: 2 dez. 2017.

IEA. **Hydrogen Production And Storage**. OECD/ Internacional Energy Agency, p.38. France:2006.

IEA. **Technology Roadmap**. Springer Reference, p. 81, 2015.

ILYUKHINA, A. V.; ILYUKHIN, A. S.; SHKOLNIKOV, E. I. **Hydrogen generation from water by means of activated aluminum**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 37, n. 21, p. 16382–16387, nov. 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy, Climate Change, and Environment**. p. 133, 2016a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key CO2 Emission Trends**. International Energy Agency, p.16, 2016. Disponível em: <<http://www.iea.org/statistics/topics/CO2emissions/>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Clean Energy Progress 2017. Technology**, p. 1–82, 2017a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy balances: an overview**. Global trends. 2017b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables information: overview 2017**. 2017c.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewable energy**. Disponível em: <<https://www.iea.org/about/faqs/renewableenergy/>>. Acesso em: 16 mar. 2017d.

JACOBI, P. **Poder Local, Políticas Sociais e Sustentabilidade**. Saúde e Sociedade, v. 8, p. 31–48, 1999.

JONAS, H. **O princípio responsabilidade: ensaio de uma ética para a civilização tecnológica. Tradução de Marijane Lisboa e Luiz Barros Montez**. Rio de Janeiro: Contraponto: Editora PUC-Rio, 2006.

KRUGER, E. L. **Tecnologias apropriadas**. 1 ed. ed. Curitiba: CEFET-PR, 2000.

LANDIM, A. P. M; OLIVEIRA BERNADO, C; ARAUJO MARTINS, I.B; RODRIGUES FRANCISCO, M.; SANTOS, N.B.; MELO, N.M.. **Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil**. Polímeros, v. 26, n. spe, p. 82–92, 2016.

LAYARGUES, P. P. **O CINISMO DA RECICLAGEM: o significado ideológico da reciclagem da lata de alumínio e suas implicações para a educação ambiental**. Educação ambiental: repensando o espaço da cidadania, 2002.

LEE, J. . **Química inorgânica não tão concisa**. 5º ed. ingl ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

LIMA, F. DE P.A; VARELLA, C.V.S; OLIVEIRA, F.G; PARREIRAS, G.; RUTKOWSKI, J. **Tecnologias Sociais da Reciclagem : Efetivando Políticas de Coleta Seletiva com Catadores**. Gerais: Revista Interstucional de Psicologia, v. 4, n. 2, p. 131–146, 2011.

LIMA, L. C. DE A. **Desafios do desenvolvimento sustentável: estudo sobre as mudanças na matriz energética brasileira**. Universidade Federal Fluminense. Departamento de engenharia química e petróleo, 2016.

LIMA, P. R; MIRAPALHETA, A; ANDRADE, M.H.S; VILAR, E.O.V; ZANTA, C.L.P.S.; TONHOLO, J. **Energy loss in electrochemical diaphragm process of chlorine and alkali industry - A collateral effect of the undesirable generation of chlorate**. Energy, v. 35, n. 5, p. 2174–2178, 2010.

LODHI, M. **Hydrogen production from renewable sources of energy**. International journal of hydrogen energy, v. 12, n. 7, p. 461–468, 1987.

LODHI, M. A. K. **Helio-hydro and helio-thermal production of hydrogen**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 29, n. 11, p. 1099–1113, 2004.

LÓPEZ-MIRANDA, J. L.; ROSAS, G. **Hydrogen generation by aluminum hydrolysis using the Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> intermetallic compound**. International Journal of Hydrogen Energy, 2015.

LÚCIA, V; SILVA, R.S; PAIVA, S.D. **Adoecimento dos trabalhadores desenvolvido pelos trabalhadores das empresas do Complexo de Alumínio**. Anais do Encontro Internacional e Nacional de Política Social, p. 1–17, 2017.

LUCKEMEYER, A. **Análise Da Matriz Energética Brasileira Sob Avisão Sistêmica : Programas Energéticos Governamentais E a**. [s.l: s.n.].

MACANÁS, J. et al. **Hydrogen generation by aluminum corrosion in aqueous alkaline solutions of inorganic promoters: The AlHidrox process**. Energy, v. 36, n. 5, p. 2493–2501, 2011.

MANAHAN, S. E. **Química Ambiental**. 2016.

MANIATOPOULOS, P.; ANDREWS, J.; SHABANI, B. **Towards a sustainable strategy for road transportation in Australia: The potential contribution of hydrogen**. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, v. 52, p. 24–34, 2015.

MANSOURI, I.; CALAY, R. K. **Sustainable hydrogen evaluation in logistics; SHEL**. Whcc 2012 Conference Proceedings - 19th World Hydrogen Energy Conference. Anais...: Energy Procedia.2012

MARTINS, M. M. S. **Biblioteca digital**. Programa de Incentivo à Produção do Conhecimento Técnico e Científico na Área da Cultura da FCRB, 2011.

MCDOWALL, W.; EAMES, M. **Towards a sustainable hydrogen economy: A multi-criteria sustainability appraisal of competing hydrogen futures**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 32, n. 18, p. 4611–4626, 2007.

MELO, N. S.; GOMES, V. L. B. **Trabalhadores acidentados/adoecidos no Complexo do Alumínio-Barcarena (Pará) e a negação dos direitos sociais.** Revista Em Pauta, v. 14, n. 38, p. 114–139, 2016.

MILTNER, A.; WUKOVITS, W.; PROLL, T.; FRIEDL, A. **Renewable hydrogen production: A technical evaluation based on process simulation.** Journal of Cleaner Production, v. 18, n. SUPPL. 1, p. S51–S62, 2010.

MOLINER, R.; LÁZARO, M. J.; SUELVE, I. **ScienceDirect Analysis of the strategies for bridging the gap towards the Hydrogen Economy.** v. 1, p. 0–8, 2016.

MOREIRA, I. C. **Proposta De Metodologia De Agregação De Atributos E Ponderação De Valores Para Avaliação Da Significância De Impactos Ambientais.** Revista Brasileira de Meio Ambiente Digital e Sociedade da Informação, v. 1, p. 444–461, 2014.

MOREIRA, R.; CARVALHO, F.M.S.; BERGAMACHI, V.S.; POLITANO, R. **Patentes depositadas em âmbito nacional como indicador de desenvolvimento das tecnologias de produção de hidrogênio.** Quimica Nova, v. 36, n. 5, p. 748–751, 2013.

MORENO-BENITO, M.; AGNOLUCCI, P.; PAPAGEORGIOU, L. G. **Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development.** Computers and Chemical Engineering, v. 102, p. 110–127, 2017.

MOYA, J. R. G. **Nanotubos de TiO<sub>2</sub> Sensibilizados com Quantum Dots de CdS e suas aplicações para a Geração de Hidrogênio mediante Fotocatálise e Fotoeletrocatalise.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

NATERER, G. F.; DINCER, I.; ZAMFIRESCU, C. **Hydrogen Production from Nuclear Energy.** Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=-UFDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=-UFDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 4 jan. 2017.

NICODEMOS, R. M.; LIMA, A. M. DE; ASSIS, A. J. DE. **Produção De Hidrogênio A Partir De Fontes Renováveis.** Horizonte Científico, v. 5, n. 1, p. 1–24, 2011.

NIU, F. et al. **Hydrogen Generation from Hydrolysis of Ball-Milled Al/C Composite Materials: Effects of Processing Parameters.** Energy Technology, v. 2, n. 7, p. 593–597, 2014.

NUNES, T. et al. **A Reciclagem De Alumínio No Brasil E O Mercado Internacional : Uma Análise Quantitativa.** Planejamento e Políticas Públicas, v. 47, p. 289–303, 2016.

OECD. **Manual de Frascati.** Coimbra: 2009.

OLIVARES-RAMIREZ, J. M. et al. **Hydrogen Generation by Treatment of Aluminium Metal with Aqueous Solutions: Procedures and Uses.** Hydrogen Energy - Challenges and Perspectives, p. 55–76, 2012.

PAHWA, P. K.; PAHWA, G. K. **Hydrogen Economy.** New Delhi: The Energy and Resources Institute (TERI), 2014.

PARTNERSHIP CALIFORNIA FUEL CELL. **Air Climate Energy Water Security.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://cafcp.org/sites/default/files/W2W-2016.pdf>>.

PETROVIC, J.; THOMAS, G. **Reaction of aluminum with water to produce hydrogen.** US Department of Energy, p. 1–26, 2008.

PORCIÚNCULA, C. B. et al. **Production of hydrogen in the reaction between aluminum and water in the presence of NaOH and KOH.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 29, n. 2, p. 337–348, 2012.

PPGTE. **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E SOCIEDADE.** Disponível em:



<<http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/diretorias/dirppg/programas/ppgte/pagina-inicial>>. Acesso em: 26 mar. 2018.

PUDUKUDY, M. et al. **Hydrogen production from sea water using waste aluminium and calcium oxide**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 37, n. 9, p. 7451–7456, 2012.

RIFKIN, J. **A economia do hidrogênio**. M. Books do Brasil Editora Ltda, 2003.

RIFKIN, J. **A terceira revolução industrial: como o poder lateral está transformando a energia, economia e mundo**. São Paulo: M.Books do Brasil Editora Ltda, 2012.

ROCHA, P. C. A. **O uso da logística reversa para o marketing comercial das indústrias de alumínio no município de catolé do rocha-pb**. Universidade Federal De Campina Grande, 2016.

RODRIGUES, S. C. P. **A logística reversa na cadeia produtiva da extrusão do alumínio em minas gerais**. 2012.

ROHRICH, S. S. **Descarbonização do regime energetico dominante: perspectivas para a economia do hidrogenio no Brasil**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2008.

ROSA, A. V. DA. **Processos de energias renováveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de Impactos Ambientais: Conceitos e Métodos** São Paulo, 2013. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=nsN6BwAAQBAJ&pg=PT438&dq=análise+de+impacto+ambiental+matriz+leopold&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwirypGXvPvXAhXGi5AKHZ0DDYwQ6AEILzAC#v=onepage&q&f=false>>

SANEPAR. **Simulador de Tarifas**. Disponível em: <<http://site.sanepar.com.br/informacoes/simulador-de-tarifas>>. Acesso em: 6 nov. 2017.

SANTOS, M.; SOUZA, M. A. A.; SILVEIRA, M. L. **Território: Globalização e fragmentação**. São Paulo: Hucitec, 1994.

SCHUMACHER, E. F. **Small is Beautiful**. London: Harper Collins, 1973.

SENAI. **Rotas estratégicas para o futuro da indústria paranaense: roadmapping do setor de energia - 2015**. Curitiba: SENAI/PR, 2008.

SHANDARR, R. Y; TRUDEWIND, C. A.; ZAPP, P. **Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - a review**. Journal Of Cleaner Production, v. 85, p. 151–163, 2014.

SILVA, C. L. **Inovação e Sustentabilidade na Cadeia de Valor**. In: Inovação e Sustentabilidade. Curitiba: Aymarã Educação, 2012. p. 94.

SILVA, E. P. DA. **Fontes renováveis de energia: produção de energia para um desenvolvimento sustentável**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

SILVÉRIO, M. DE O. **Análise Técnica Econômica Do Processo De Produção De Hidrogênio Por Reforma A Vapor Do Glicerol**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2016.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Editora AMGH, 2013.

TEIXEIRA, J. **Utilização de resíduos alcalinos de indústrias de celulose na correção da acidez do solo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

TOYOTA. **Mirai Fuel Cell**. Disponível em: <<https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>>. Acesso em: 2 dez. 2017.

UNEP SETAC LIFE CYCLE INITIATIVE. **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products**. United Nations Environment Programme, v. 15, 2009

VERAS, T. DA S. et al. **Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 4, p. 2018–2033, 2017.

VIOLA, L. **Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica**. p. 68, 2015.

VOLDSUND, M.; JORDAL, K.; ANANTHARAMAN, R. **Hydrogen production with CO2 capture**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 9, p. 4969–4992, 2016.

WANG, M. et al. **The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production - A review**. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 29, p. 573–588, jan. 2014.

WHITE MARTINS. **Gases Especiais e Equipamentos**. 2017. Disponível em: <<http://www.praxair.com.br/-/media/documents/specialty-gases>>.

WINNER, L. **Artefatos tem política?** From: "Do Artifacts have Politics? in\_1986. In: The Whale and the Reactor - A Search for Limits in an Age of High Technology. Chicago: The University of Chicago Press, 1986. p. 19–39.

XIANG, C. et al. **Hydrogen generation by hydrolysis of alkaline sodium borohydride using a cobalt-zinc-boron/graphene nanocomposite treated with sodium hydroxide**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 40, n. 11, p. 4111–4118, 2015.

ZHUANG, D. W. et al. **Evaluation of a cobalt-molybdenum-boron catalyst for hydrogen generation of alkaline sodium borohydride solution-aluminum powder system**. Journal of Power Sources, v. 224, p. 304–311, 2013.

ZOU, H. et al. **Hydrogen production by hydrolysis of aluminum**. Journal of Alloys and Compounds, v. 578, p. 380–384, 2013.

## ANEXO A – EQUIPAMENTOS PLANTA GERADORA HIDROGÊNIO

ITEM	QDE	DESCRIMINAÇÃO
01	02	Vaso de pressão 19.000 litros aço inox 316
02	01	Vaso de pressão borbulhador 19.000 litros aço inox 316
03	02	Reservatórios de 20.000 litros com agitador (Sal básico e líquido iônico)
04	01	Reservatório de matéria-prima 500m <sup>3</sup> (Água)
05	01	Reservatório de matéria-prima 500m <sup>3</sup> Hidróxido (Sal)
06	01	Reservatório de 55m <sup>3</sup> matéria-prima Reagente (Líquido)
07	02	Reservatório de 500m <sup>3</sup> aço para resíduo (Sal básico)
08	02	Reservatório de 500m <sup>3</sup> aço para resíduo (Líquido)
09	100	(Metros) de linha de gás, entre vasos e borbulhador até o ponto de saída do H <sub>2</sub>
10	01	Software de parametrização e equipamentos de TI, dispositivos de automação e controle do processo, circuito de alimentação; serviços de instalação.
11	01	Material e mão de obra para montagem subestação de energia elétrica 13,8 kV (a definir) kVA 220/380Vca. Para alimentação das bombas, motores, dispositivos de manobra, além do circuito de alimentação de controle e automação do processo.
12	01	Materiais da planta. Área classificada (a prova de explosão), elétricos, eletropneumáticos, para instalações de iluminação, bombas, motores, painéis de comando.
13	02	Dispositivo de bombeamento centrífuga, para água, alta pressão, a prova de explosão, altura de sucção: (a definir) metros, altura de recalque: (a definir) metros, distancia da tubulação: (a definir) metros, diâmetro da tubulação: (a definir) mm, vazão: (a definir) litros/hora (a definir) litros por minutos.
14	02	Dosador e/ou dispositivos bombeamento para transferência de matéria-prima (Hidróxido sódio 97% escama (sal)) 750 kg por minutos, altura de sucção: (a definir) metros, altura de recalque: (a definir) metros, distancia da tubulação: (a definir) metros, diâmetro da tubulação: (a definir) mm, FABRICANTE KSB ou similar.
14	02	Dispositivos de bombeamento para transferência de matéria-prima, (reagente (líquido)), altura de sucção: (a definir) metros, altura de recalque: (a definir) metros, distancia da tubulação: (a definir) metros, diâmetro da tubulação: (a definir) mm (a definir) litros/hora FABRICANTE KSB ou similar.
15	02	Bomba centrífuga FABRICANTE KSB ou similar, alta pressão. Para transferência de resíduo dos reservatórios com sal e líquido para do reservatório (A) e líquido para o reservatório (B). (a definir) litros por minuto, a prova de explosão. Altura de sucção: (a definir) metros, altura de recalque: (a definir) metros, distancia da tubulação: (a definir) metros, diâmetro da tubulação: (a definir) mm.
16	01	Mecanismo de transferência do metal para o vaso de pressão da reação química (distância a definir)
17	03	Triturador de alumínio, capacidade de trituração 1000 kg/hora conforme volume necessário definido pelo tempo da reação química de aproximadamente 35 minutos.
18	01	TI, Software de controle do processo.
19	01	Serviços de engenharia: projeto BÁSICO e EXECUTIVO, além de visita e teste de inspeção na fabricação dos equipamentos: vasos de pressão, reservatórios, da construção e montagem da planta. Testes e garantia de pré-formasse do processo industrial.
20	12	Serviços de construção das 10 bases de sustentação para os (7) reservatórios e (5) vasos de pressão
21	01	Tubulações entre vasos de pressão, vaso borbulhador e reservatórios.
22	01	Serviços de instalações

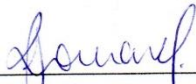
Dados de equipamentos e instalações – a definir de acordo com a instalação de campo

**Valor Total estimado USD 3.000.000,00 ou R\$ 9.630.000,00**

ANEXO B – CERTIFICADO ENSAIO CROMATOGRAFIA



**ANÁLISES QUÍMICAS  
E COMÉRCIO LTDA**

<b>CERTIFICADO DE ENSAIO</b>			
PRODUTO:	GÁS HIDROGÊNIO		
DATA DA AMOSTRAGEM:	21/03/2018	Nº.CERTIFICADO:	873/18
DATA DO RECEBIMENTO:	21/03/2018	ANALISTA:	LOURENÇO
DATA DA ANÁLISE:	21/03/2018	AMOSTRADO POR:	CLIENTE
DATA DE EMISSÃO:	21/03/2018		
EMPRESA:	UTFPR		
ORIGEM:	REAÇÃO REALIZADA EM LOCO		
<u>ENSAIOS</u>	<u>RESULTADOS</u>	<u>ESPECIFICAÇÕES(*)</u>	<u>MÉTODOS</u>
	(%peso)		
Hidrogênio (H2)	84,20	-	Cromatografia gasosa
Oxigênio (O2)	4,94	-	
Nitrogênio (N2)	10,86	-	
		 JOSÉ LOURENÇO JUNIOR CRQ 09400075 - 9ª. Região	

# ANEXO C – GRÁFICO CROMATOGRAFIA TCD

N2000 Chromatography Data System

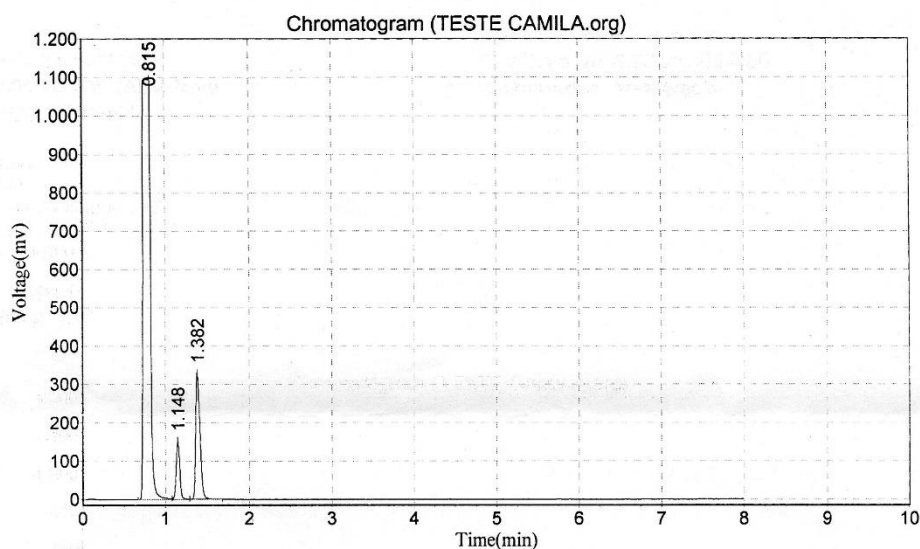
1

## TESTE CAMILA

Company: MS  
Date/Time: 2018-03-21,10:52:16  
Data File: C:\N2000\TESTE CAMILA.org  
Method File: C:\N2000\FID.mtd

Analyst: Samuel Busnardo  
Date/Time: 2018-03-21,10:55:06  
Quantification: Area/Area%

Sample Description:  
CHANNEL 1 (TCD)  
Pressão na cabeça da coluna : 42  
INJ B: 220°C - DET A: 200°C  
250 microlitros - range 0  
ATTN: 1  
Data da Coleta: 14/03/18  
Volume de gás (ml.): 2,40



### Results

Peak No.	Peak ID	Ret Time	Height	Area	Conc.
1		0.815	1094233.750	6832416.000	80.8660 H <sub>2</sub>
2		1.148	147839.047	445954.938	5.2782 O <sub>2</sub>
3		1.382	328132.594	1170691.625	13.8559 N
<b>Total</b>			1570205.391	8449062.563	100.0000

2018-03-21

Zhejiang University, China