



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO SANTOS JUNGES

**AUTOMAÇÃO DE REATOR DE HIDROGÊNIO PARA
ALIMENTAÇÃO DE MOTOGERADOR EM GERAÇÃO DISTRIBUIDA**

Ilha Solteira
2019

RODRIGO SANTOS JUNGES

**AUTOMAÇÃO DE REATOR DE HIDROGÊNIO PARA
ALIMENTAÇÃO DE MOTOGERADOR EM GERAÇÃO DISTRIBUIDA**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha Solteira - UNESP,
como parte dos requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação

Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior
Orientador

Prof. Dr^a. Maria Ângela de Moraes Cordeiro
Orientadora

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- J954a Junges, Rodrigo Santos.
Automação de reator de hidrogênio para alimentação de motorizador em
geração distribuída / Rodrigo Santos Junges. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
114 f. : il.
- Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2019
- Orientador: Dionízio Paschoareli Júnior
Inclui bibliografia
1. Alumínio. 2. Automação pressão e taxa de produção. 3. Geração
distribuída. 4. Hidrogênio sob demanda. 5. Hidróxido de sódio NaOH.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Biblioteca e Documentação
Setor Técnico de Biblioteca e Documentação
Unidade Técnica de Biblioteca e Documentação
13048 - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: AUTOMAÇÃO DE REATOR DE HIDROGÊNIO PARA
ALIMENTAÇÃO DE MOTOGERADOR EM GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA

AUTOR: RODRIGO SANTOS JUNGES

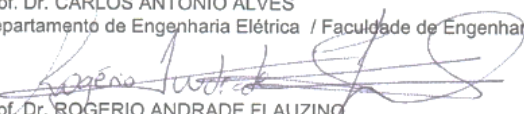
ORIENTADOR: DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA
ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. MARIA ANGELA DE MORAES CORDEIRO
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. CARLOS ANTONIO ALVES
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ROGERIO ANDRADE FLAUZINO
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos - USP


Prof. Dr. JOSÉ DILCÍO ROCHA
Grupo de Inteligência Territorial Estratégica / EMBRAPA Gestão Territorial

Ilha Solteira, 13 de junho de 2019.

“É nossa esperança que os engenheiros que lerem este estudo, se dedicarão para a criação de um mundo onde seus filhos e netos terão um ar que possam respirar e água que possam beber, onde os seres humanos e o resto da natureza vão nutrir um ao outro”

(MESSENGER e VENTRE, 2010).

"Creio que a água venha a ser um dia empregada como combustível, que o hidrogênio e o oxigênio que a constituem, usados em conjunto ou separadamente, podem proporcionar uma fonte inexaurível de calor e luz, cuja intensidade é superior à do carvão"

(JÚLIO VERNE A ILHA MISTERIOSA, 1874).

RESUMO

Este trabalho trata da automatização de um processo de obtenção de hidrogênio para a alimentação direta de um motogerador. Este processo permite a alimentação de um gerador de energia na ordem de 3Kw. Com sistema autorregulado, que produz gás hidrogênio pela reação do alumínio e água em presença de hidróxido de sódio, alimentando um motogerador elétrico à taxa de 100% do combustível alternativo. Propomos a adaptação do motogerador do tipo gasolina (Otto), para o uso com o gás H_2 produzido sob demanda. Cálculos de viabilidade econômica e valores medidos do alumínio como combustível nesta nova rota de obtenção e utilização do hidrogênio. O presente estudo trata da utilização em local isolado ou em sistema de backup, sendo transportado combustível sólido (Alumínio), e o H_2 produzido localmente sob a demanda do gerador. A composição dos resíduos foi levantada em experimentos e com análise laboratorial, assim como a viabilidade de retorno ao meio ambiente. Destaca-se neste trabalho a formulação que permite um ciclo de trabalho livre de carbono, aliado à conversão de baixo custo utilizando-se de motores anteriormente poluidores. Estudos sobre as variáveis desta reação como a apresentação do alumínio, concentrações da solução alcalina, temperatura e pressão. Diferentes ensaios com diferentes propostas de automação são citados ao longo da evolução e desenvolvimento dos protótipos decorrentes desta pesquisa e finalmente uma solução final é apresentada, viabilizando a utilização em grande escala.

Palavras Chave: Produção de hidrogênio sob demanda. Motogerador estacionário isolado. Geração distribuída. Reatores de alcalinos. Reciclagem resíduos de alumínio.

ABSTRACT

This work deals with the automation process to obtain hydrogen to direct feeding of a motor generator. This process allows the power supply of a generator in the order of 3Kw. With self-regulating system that produces hydrogen gas by the reaction of aluminum and water in the presence of sodium hydroxide, feeding an electric motor generator at the rate of 100% of the alternative fuel. We propose the adaptation of the gasoline type generator (Otto), for use with H_2 gas produced on demand. Calculations of economic viability and measured values of aluminum as fuel in this new route of obtaining and using hydrogen. The present study deals with the use in an isolated place or in backup system, being transported solid fuel (Aluminum), and the locally produced H_2 under the demand of the generator. The composition of the residues was raised in experiments and with laboratory analysis, as well as the feasibility of returning to the environment. It is highlighted in this work the formulation that allows a carbon-free work cycle, coupled with low-cost conversion using previously polluting engines. Studies on the variables of this reaction as the presentation of aluminum, alkaline solution concentrations, temperature and pressure. Different tests with different automation proposals are mentioned along the evolution and development of the prototypes resulting from this research and finally a final solution is presented, making feasible the large scale use.

Keywords: Hydrogen production on demand. Stationary motor generator. Distributed generation. Alkaline reactors. Aluminum waste recycling.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que administra o conhecimento infinito, dentro do qual o nosso mundo e nossa realidade foi dada a oportunidade de existir, pela infinita paciência com o nosso mundo e com nosso modo de pensar, dentro do qual foi possível a minha existência e decorrente pesquisa.

Agradeço aos meus pais, que me direcionaram sempre ao estudo, e à dedicação ao correto o justo e o honesto, sendo proveniente de muito trabalho e dedicação que me apoiaram mesmo através das dificuldades da vida, sendo este nível de escolarização pela primeira vez alcançado pela família...

O meu prezado orientador, que me recebeu de braços abertos nesta instituição, apoiando o desenvolvimento de um tema desafiador e inédito, optado pelo desafio e pelo desenvolvimento de pesquisa aplicada, com grandes desafios multidisciplinares, e também pela sua generosidade e paciência...

À minha esposa Cristina e filha Sophia e filho Lucas pelo apoio em todas as etapas e viagens decorrentes das pesquisas e desenvolvimentos, as ausências e o tempo dedicado...

Agradeço a este magnífico campus III da UNESP Ilha Solteira, que pelo esforço de todos os envolvidos se mantém o trabalho e a dedicação ao ensino e educação edificante de muitos jovens e profissionais. À biblioteca, aos funcionários da administração ao pessoal de apoio, e todos que indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos que se interessaram e se envolveram nesta pesquisa ao longo dos anos nos ensaios, onde com a participação de colegas e de alunos engenharia elétrica apresentaram-se os ensaios, motivando ainda mais ao aprimoramento das pesquisas.

Aos coorientadores que participaram diretamente ou indiretamente com o desenvolvimento desta pesquisa com destaque à professora Dr^a. Maria Ângela de Moraes Cordeiro, com orientações e ensaios nos laboratórios de Química.

Aos colegas professores e servidores do IFMT, que sempre estão dispostos ao diálogo e apoio muito importante para o desenvolvimento de um ambiente saudável de trabalho e compartilhamento de idéias.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático com o caminho da bauxita à alumina.	29
Figura 2 - Processo de produção do alumínio a partir da alumina.	30
Figura 3 - Balanço de massa no processo de produção de alumínio.	31
Figura 4 - Maiores produtores mundiais de alumínio e média de produção.	32
Figura 5 - Custo de produção médio mundial de alumínio.	33
Figura 6 - Relação consumo produção de alumínio.	33
Figura 7 - Tarifa de energia elétrica dos produtores de alumínio em 2007.	34
Figura 8 - Relação entre sucata de alumínio recuperada e consumo doméstico	34
Figura 9 - Total Alumínio, Relação entre Sucata Recuperada e Consumo.....	35
Figura 10 - Latas de embalagem e fardos prensados em centro de reciclagem.....	36
Figura 11 - Tipo de lata utilizada para o ensaio de H ₂	43
Figura 12 - Início da reação: em solução alcalina fechada por balão de ensaio de H ₂	44
Figura 13 - Reação em solução alcalina formação de bolhas de H ₂	44
Figura 14 - Avanço da reação formação de bolhas e aparecimento de alumina e H ₂	45
Figura 15 - Volume máximo alcançado com o total de H ₂ produzido.....	45
Figura 16 - Aspecto final da reação completa com alumina ao fundo.....	46
Figura 17 - Volume do Elipsoide.	47
Figura 18 - Difratoograma da gibsita em forma natural.	48
Figura 19 - Microscopia eletrônica realizada em laboratório de mecânica.	49
Figura 20 - Microscopia eletrônica camada inicial antes da reação.	50
Figura 21 - Formação de cavidades na superfície, conversão alumínio metálico em óxido.	50
Figura 22 - Microscopia eletrônica com ponto de conversão evidente de alumínio em alumina hidratada, ou gibsita quando desidratada.....	51
Figura 23 - Microscopia Eletrônica ampliação da formação de camadas de gibsita.	52
Figura 24 - Aspecto do vaso de pressão de reação utilizado.	54
Figura 25 - Motogerador de energia e agulha para injeção do combustível no carburador.	55
Figura 26 - Motogerador soltando fumaça, palma da mão com névoa branca.	56
Figura 27 - Sem fumaça, palma da mão sem a névoa branca.	56

Figura 28 - Acionamento com o H_2 injetado no carburador sem CO_2 na saída.....	57
Figura 29 - Óxido de alumínio – alumina e restos de alumínio não consumido.	57
Figura 30 - Carburador do motogerador de 2 HP ponto de entrada do hidrogênio.....	58
Figura 31 - Esquema de controle manual da reação.	60
Figura 32 - Sistema de controle mecânico manual para controle da reação H_2 com 3 vasos de pressão.	61
Figura 32 - Sistema de controle microprocessador para controle da reação H_2	62
Figura 34 - Soldagem dos flanges para a vedação do tanque de pressão.	65
Figura 35 - Vasilhame de aço inox-316L de 30l em processo de fabricação.	66
Figura 36 - Aspecto do geral protótipo.....	67
Figura 37 - Aspecto final deste protótipo.	68
Figura 38 - Layout da janela de programação.	69
Figura 39 - Valores de telemetria serial via rs-232 cabo USB.	70
Figura 40 - Circuito eletrônico de controle do reator de hidrogênio.	70
Figura 41 - Placa de circuito eletrônico de controle do reator de hidrogênio.....	71
Figura 42 - Sistema elevador e controle de pressão e display LCD.	72
Figura 43 - Fluxograma lógico de funcionamento do reator de imersão.	73
Figura 44 - Fogareiro a 100% hidrogênio aquecendo a massa de 1kg de água 8 lpm H_2	74
Figura 45 - Aspecto do motogerador utilizado de 6,5 kW.	75
Figura 46 - Sistema de imersão alimentando motogerador de 3KW.....	76
Figura 47 - Apresenta a inserção de folhas de alumínio em cesto móvel.	77
Figura 48 - Bloco de alumínio e o sistema fechado em produção de Hidrogênio.	79
Figura 49 - Detalhamento do reator seco de 80 litros.	80
Figura 50 - Bandeja de reação do reator de 80litros em estado inicial.....	81
Figura 51 - Bandeja de reação do reator de 80 litros em estado final com todo o.....	82
Figura 52 - Bandeja de reação do reator de 80litros aspecto final da alumina.	83
Figura 53 - Reator de hidrogenio 80 litros e chamas de teste.....	83
Figura 54 - Diagrama de funcionamento do módulo de controle de fluxo na entrada ...	84
Figura 55 - Fluxograma lógico de funcionamento do sensor de efeito Hall.	86
Figura 56 - Fluxo medido estavel para 1KW, injetor desenvolvido para a entrada de hidrogênio a 100% eversão já instalada junto ao carburador original.....	87
Figura 57 - Sensor de efeito <i>hall</i> no eixo do motogerador e bico injetor.....	88

Figura 58 - Carburador do motogerador.....	88
Figura 59 - Carburador e orifícios de saída do hidrogênio.	89
Figura 60 - Circuito de controle do injetor de hidrogênio.....	90
Figura 61 - Circuito AVR.	90
Figura 62 - Sinal senoidal de saída do motogerador carga de 1000W.....	91
Figura 63 - Sinal senoidal de Saída do motogerador, harmônicos.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Formas de obtenção de H ₂	23
Quadro 2 - Tipos diferentes de materiais e descrição.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial.	24
Tabela 2 - Tabela comparativa da energia dos combustíveis e seu custo.	26
Tabela 3 - Custo da produção em reais.	27
Tabela 5 - Alumínio, produção mensal.	32
Tabela 6 - Relações de grandezas do hidrogênio.	39
Tabela 7 - Comparativo da rota do alumínio com a rota eletrolítica.	41
Tabela 8 - Características do motogerador.	55

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Al ₂ O ₃	Alumina – Óxido de alumínio.
BTU	Unidade tradicional de energia (<i>British Thermal Unit</i>).
C++	Linguagem de programação de alto nível de interação.
Cal	Caloria, unidade de medida de energia.
CC	Corrente contínua.
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.
CH ₄	O metano é um gás incolor, sua molécula é tetraédrica e apolar, é o mais simples dos hidrocarbonetos.
CO ₂	Dióxido de carbono, responsável por 25% do efeito estufa.
H ₂	Hidrogênio gasoso.
NaOH	Hidróxido de sódio.
Nm ³	Normal metro cúbicos nas condições da CNTP.
IHM	Interação Homem Máquina.
AVR	Regulador de voltagem original (<i>Automatic Voltage Regulator</i>).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO AO HIDROGÊNIO.....	17
1.1	MOTIVAÇÕES	21
2	FUNDAMENTAÇÃO DA PRODUÇÃO E ECONOMIA DO HIDROGÊNIO. ..	23
2.1	O HIDROGÊNIO NO BRASIL	23
2.2	COMPARATIVOS AOS COMBUSTÍVEIS DISPONÍVEIS NO BRASIL.....	24
2.3	VIABILIDADE DA OBTENÇÃO DE H ₂	26
2.4	FORMAS DE TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE H ₂	27
2.5	PROCESSO BAYER, DA BAUXITA À ALUMINA (1821)	28
2.6	PROCESSO HALL-HÉROULT, REDUÇÃO DA ALUMINA AO ALUMÍNIO (1886).....	30
2.7	POTENCIAL DE ALUMÍNIO DISPONÍVEL NO BRASIL	31
3	PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NA ROTA ALCALINA	37
3.1	CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DA REAÇÃO E RENDIMENTOS ESPERADOS DA SOLUÇÃO.....	38
3.1.1	Valores teóricos esperados para a reação química de Alumínio x Água;	38
3.1.2	Valores teóricos e proporções do material da reação de simples troca	39
3.1.3	Valores energéticos	40
4	RESULTADOS COM DIFERENTES MÉTODOS DE TESTE E PROCESSAMENTO DO HIDROGÊNIO	43
4.1	ENSAIO DE SISTEMA PARA A VERIFICAÇÃO DA VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE EMBALAGEM DESCARTÁVEL	43
4.1.1	Cálculo das quantidades utilizadas na experiência	47
4.1.2	Procedimento Experimental em Laboratório com a contribuição Prof. ^a Dr. ^a Maria Ângela de Moraes Cordeiro departamento de Química Unesp – FEIS.....	47

4.1.3	Microscopia eletrônica realizada em laboratório UNESP	48
5	SÉRIE DE ENSAÍOS DE REATORES PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM MOTOGERADOR À 100% DE HIDROGÊNIO	53
5.1	EXPERIÊNCIA PARA A ALIMENTAÇÃO DE UM MOTOGERADOR DE ENERGIA DE 2HP	53
5.2	SISTEMA DE CONTROLE DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR MEIO DE BOMBEAMENTO DA SOLUÇÃO ALCALINA COM OBJETIVO DE ALIMENTAÇÃO DE MOTOGERADOR DE ENERGIA.....	59
5.3	CONSTRUÇÃO DE MOTOGERADOR DE HIDROGÊNIO MICROCONTROLADO PARA A PRODUÇÃO SOB DEMANDA DE HIDROGÊNIO PARA ALIMENTAÇÃO DE MOTOGERADOR DE ENERGIA DE 6,5 HP	61
5.3.1	Automação do reator de hidrogênio	66
5.3.2	Circuito de controle do reator de hidrogênio.....	68
5.3.3	Programação algoritmo de controle.....	68
5.3.4	Algoritmo comentado	72
5.4	ENSAIO COM MOTOGERADOR DE 6,5 KW OU 13HP E REATOR DE IMERSÃO MICROCONTROLADO.....	74
	E TEMPO DE PRODUÇÃO.	76
5.6	ENSAIO COM MOTOGERADOR DE HIDROGÊNIO DE 80 LITROS, MÉTODO DE SOLUÇÃO À SECO.....	79
5.7	RELAÇÃO DE POTÊNCIA EM MOTOGERADOR AUTOMATIZADO QUANTO AO FLUXO DE HIDROGÊNIO.....	84
5.8	LÓGICA DE CONTROLE DO MOTOGERADOR EM RELAÇÃO À LINHA DE PRODUÇÃO RELAÇÃO DE POTÊNCIA X RPM.....	86
5.9	CONCLUSÕES DESTE ESTUDO QUANTO AO DESEMPENHO DO MOTOGERADOR GASOLINA ADAPTADO PARA O USO COM HIDROGÊNIO DIRETO E AJUSTES DE DESEMPENHO RELACIONADOS À DENSIDADE DO COMBUSTÍVEL.....	90

5.10	CONCLUSÕES FINAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS	92
6	CONCLUSÃO FINAL E SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS.....	94
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
	ANEXO A – MASCARA DA PLACA DE CONTROLE DE IMERSÃO	102
	A.1 – POSIÇÃO DOS COMPONENTES.....	102
	A.2 – COBRE SUPERFÍCIE SUPERIOR - TAMANHO REAL.	103
	A.3 – COBRE SUPERFÍCIE INFERIOR - TAMANHO REAL.....	104
	ANEXO B – LISTA DE MATERIAIS DA PLACA DE CONTROLE REATOR DE IMERSÃO	105
	ANEXO C - PARÂMETROS SENSOR DE PRESSÃO MPX5700DP	106
	ANEXO D – PARÂMETROS DO DRIVER DE POTENCIA L298 4A 2 CANAIS.	107
	ANEXO E – PARÂMETROS DO SENSOR DE TEMPERATURA LM35.	108
	ANEXO F – ALGORITMO COMENTADO DA PRODUÇÃO DE HIDROGENIO MÉTODO REATOR AUTOMATIZADO DE IMERSÃO	109
	ANEXO G – ALGORITMO COMENTADO DA AUTOMAÇÃO DE MOTOGERADOR DE ENERGIA COM EFEITO HALL.....	112

1 INTRODUÇÃO AO HIDROGÊNIO

O elemento químico hidrogênio¹ descoberto em 1766 por Henry Cavendish não ocorre de forma livre em nosso ambiente (CAVENDISH, 2011), não há estoques deste combustível na natureza, mas está presente em praticamente todos os lugares do planeta, principalmente nas moléculas de água, no ar que se respira, e em praticamente 65% de nosso corpo (TORTORA, 2016). Também em moléculas como nos hidrocarbonetos derivados do processo de fotossíntese, mas, neste caso, encontra-se associado ao átomo de carbono. Nos variados processos de queima dos hidrocarbonetos, ocorre liberação de monóxido de carbono para a atmosfera e, portanto, contribui para a poluição do ar, por fuligem, principalmente nas grandes cidades onde a emissão de gases de efeito estufa se torna mais expressiva (MARENGO, 2006).

Hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, compondo 75% da matéria normal por massa e mais de 90% por número de átomos (NAGNON, 2008). O uso de hidrogênio como alternativa ao hidrocarboneto combustível não só é de interesse do ponto de vista ambiental, não gerando gases de efeito estufa, como se torna uma possibilidade sustentável do ponto de vista energético, uma vez que o hidrogênio é renovável e pode ser obtido de variadas fontes como a água a mais abundante forma de consegui-lo, é o melhor combustível, pois possui a mais alta concentração de energia por unidade de massa 143 KJ/g (STAFF, 2008).

Muito tem sido dito que o hidrogênio é o "combustível do futuro" devido à sua abundância e aos produtos de combustão não poluentes (CABRAL, 2017). Pouco tem sido dito sobre o fato de que outras formas de energia devem ser consumidas para produzir o hidrogênio que será usado como combustível. A maioria do hidrogênio é derivada de compostos como água ou metano, e energia é necessária para quebrar o hidrogênio livre desses compostos, depois separar, purificar, comprimir ou liquefazer o hidrogênio para armazenamento e o transporte para os pontos de uso (STAFF, 2008). A produção, distribuição e uso generalizados de hidrogênio, exigem muitas inovações e investimentos em sistemas de produção eficientes e ambientalmente aceitáveis, sistemas de transporte, sistemas de armazenamento e dispositivos de uso.

¹ Em condições CNTP, é um gás diatômico H₂, altamente inflamável.

Propõe-se a produção de hidrogênio por reação exotérmica em processo de baixo custo, com a possibilidade da queima do gás H_2 de forma direta em câmara de explosão de modestos motogeradores convencionais de energia, adaptados, da anterior utilização com gasolina, visando o baixo custo e acessibilidade do método. O presente estudo não utiliza hidrocarbonetos na sua proposta de produção de energia, é possível a retirada do gás hidrogênio da molécula da água, sem o uso de eletricidade (eletrólise), utiliza-se um meio aquoso alcalino que não tem carbono em suas partes constituintes, e materiais que estão presentes e muito comuns na prática da sociedade humana moderna, coadunando a necessidade do uso de energia elétrica e calor.

Apresenta-se um modelo de reator alcalino com processo não eletrolítico de produção, a reação contém todos os componentes e catalizadores de manutenção da reação química presentes na própria solução, não havendo a necessidade de fonte externa de eletricidade ou calor (SOUZA, 1998).

Propõe-se uma forma de obtenção de hidrogênio a baixo custo a partir da reação do metal alumínio em meio aquoso alcalino sobre demanda de um motogerador de energia elétrica. As formas de controle da produção desse gás e a gestão eletrônica inteligente da reação com o uso de um microcontrolador que monitora valores de temperatura, faixa de pressão de trabalho, nível da solução e ajustes automatizados nas proporções dos insumos da reação serão discutidos no decorrer deste estudo.

Quanto à aplicação, tem-se o interesse em atender a demanda do fornecimento de energia e calor em locais isolados, mas com objetivo de impacto zero de emissão de carbono, podendo ser aplicado, também, em reservas ou parques aonde o combustível fóssil representa risco de contaminação ao solo no meio ambiente.

Mas também possibilita a reciclagem direta de lixo metálico, como embalagens, latas, cantoneiras de construção, restos de obras, peças de automóvel como cabeçotes, pistões, rodas de liga leve, ou seja, tudo que contenha liga de alumínio em qualquer proporção pode ser utilizado no reator para a produção hidrogênio, resultando em calor e energia, utilização oportuna em centros de reciclagem.

Como resultado desta reação com a água, o alumínio retorna ao seu estado anterior de óxido de alumínio ou alumina (ALUMINA, 2007), com o retorno a fábrica de alumínio volta a ser alumínio metálico pelo processo Hall-Héroult (GRJOTHEIM, 1986), tratando-se,

portanto de combustível retornável. Além disso, existem ligas metálicas e blocos de motores com diferentes ligas e outros contaminantes, que podem ser removidos pelo processo apresentado no presente estudo, agregando à indústria de reciclagem um novo insumo (DAS, 2007).

O catalizador do processo utilizado é o hidróxido de sódio (NaOH), que funciona como um decapante da fina camada de óxido de alumínio (alumina) que se forma, permitindo assim, a manutenção da reação. Tanto o NaOH restante na solução aquosa, quanto a alumina, são insumos que podem ser tratados para posterior comercialização com as usinas de alumínio, fechando o ciclo de reciclagem.

O hidróxido de sódio (Soda Cáustica) é de origem abundante e extensamente utilizada na indústria com produção superior a 45 milhões de toneladas (FERNANDES, 2009). É processado a partir do NaCl (Sal comum), e não é consumida na reação, podendo ser reutilizado indefinidamente uma vez que age apenas como catalizador decapante (1 PORCIÚNCULA, 2013).

Quanto ao descarte ambiental, quando não é interessante a sua acumulação para a comercialização, da alumina (Al_2O_3) em solução alcalina forte, pode ser neutralizada com ácido clorídrico, com o auxílio de um medidor de pH, podendo então ser descartado ao ambiente, não tendo componentes tóxicos de risco ambiental e tão pouco poluidor de águas como o óleo dos hidrocarbonetos convencionais (LILLO-RÓDENAS, 2003).

Além de todos estes fatores positivos, este estudo apresenta estratégia promissora na expectativa de utilização do hidrogênio a partir de componentes abundantes e de baixo custo, com produção sob demanda no local de uso, mitigando o risco e as dificuldades do transporte e armazenamento do gás hidrogênio, no momento em que as técnicas atuais de transporte e armazenamento são onerosas e inviáveis para o uso em escala.

Apresenta-se ao longo deste estudo um método compatível e viável para a substituição de combustível fóssil, que levou milhares de anos para se formar e apenas libera carbono e calor na atmosfera, por outro que é produzido por processo químico renovável, o alumínio utilizado como combustível sólido, que produz a detonação necessária à combustão em motores térmicos. Sua utilização neste modelo retorna ao seu estado primário, como óxido de alumínio (alumina), sendo novamente convertido em alumínio por meio da eletricidade que pode ser gerada em fontes renováveis, eliminando totalmente a molécula de carbono CO_2 dos

motores térmicos de explosão, existem artigos científicos apontando maior flexibilidade no projeto de motores de explosão para o hidrogênio podendo ampliar em muito a sua eficiência de conversão como apontado em (VERHELST, 2012).

Desta forma, na saída do motogerador devidamente adaptado e posteriormente fabricado especificamente para a queima de hidrogênio, a libera apenas vapor de água e calor e energia, outra possibilidade é a diluição do hidrogênio em gás inerte para a equiparação calorífica com a gasolina ou o diesel, mantendo o mesmo projeto do motor e sua longevidade, com características térmicas de velocidade de reação dimensionadas em (MEYER, 1994).

O armazenamento de combustível em formato sólido é mais vantajoso, do ponto de vista energético com uma densidade maior por volume do que a forma líquida, tem-se mais combustível em um volume menor, sendo também interessante para aplicações embarcadas em situações onde o risco ambiental é extremamente menor como em barcos (FURLAN, 2008).

Pode ser utilizada a filtração adequada da água de escape que será pura do ponto de vista microbiológico os contaminantes seriam os metais e lubrificantes do motor, em caso de utilização em ambiente náutico estes motores já contam com lubrificantes ambientalmente adequados. Neste caso é também um método de purificação da água salina do oceano, permitindo até que se utilize água do mar no reator ou água contaminada, degradada e tem-se água pura no escape do motogerador.

Com a intensificação do uso do alumínio em nossa sociedade, encontra-se em todos os conglomerados urbanos, na construção civil, nas embalagens, em materiais descartáveis em geral, onde muitas vezes acaba no lixo, algumas vezes reciclados e outras não. Este estudo apresenta possibilidades de utilização por cooperativas de catadores de lixo como fonte de calor e energia podendo-se estabelecer um contrato de cogeração. Existe ainda a possibilidade de utilização em locais isolados onde é mais seguro o transporte de material sólido do que hidrocarboneto líquido, ou ainda, onde a produção de energia solar ou eólica não atenda a demanda devido à intermitência, pois se trata de geração contínua de energia podendo ser um agregado energético para determinados horários assim como o uso em *backup*.

A proposta é de geração de energia com este material descartável, alumínio de baixo custo, de forma isolada da rede por motogerador adaptado para a substituição de hidrocarboneto por hidrogênio sem liberação de gases de efeito estufa - CO₂.

Na maioria dos casos as estações meteorológicas ou comunidades isoladas encontra-se em parques ou florestas protegidas devido a sua riqueza ambiental, portanto, nestes ambientes especiais, o risco do transporte de combustíveis fósseis e a sua estocagem é sempre um risco ambiental grave. Com esta proposta, seriam transportados lingotes ou frisos de alumínio que, num eventual acidente, configura metal inerte ao meio ambiente natural podendo ser recolhido posteriormente (DOE, 2008).

O hidrogênio é um meio de armazenar quimicamente a energia, podendo ser queimado em turbinas ou motores de explosão para geração de energia. Atualmente os métodos utilizados para geração de energia a partir do hidrogênio utilizam células de combustível, mas com severas limitações, sendo o custo elevado e a limitação de escala devido ao uso de materiais raros (US, 2004).

1.1 MOTIVAÇÕES

Este estudo busca uma rota energética livre de carbono para a produção de energia na ordem de kW.

O Brasil assumiu meta de redução de emissão de gases de efeito estufa em cúpula do clima na ONU 43% até 2030, sendo líder mundial em combustível renovável com o etanol e o biodiesel, tecnologias que buscam o saldo zero de CO₂ de origem fóssil, uma vez que o etanol foi produzido pela fotossíntese durante o cultivo da cana de açúcar, que retira neste processo o carbono para o crescimento da planta da atmosfera terrestre, resultando em saldo zero de ciclo renovável. Algo semelhante pode ser tentado com o alumínio em ciclo renovável uma vez que seu processo de produção é reciclável, principalmente se no processo de eletrólise ígnea - Hall-Héroult, forem utilizadas de fontes alternativas de energia como solar e eólica assim como a fonte hidrelétrica atualmente utilizada pela (ALCOA, 2019).

Geração isolada de energia elétrica livre do diesel e gasolina em motogerador com produção de hidrogênio sobre demanda sem transporte ou armazenamento do combustível em formato gasoso ou líquido, sendo estes últimos dispendiosos e perigosos;

Alternativa ao biogás em processos industriais, possibilidade de aproveitamento de resíduos em processos industriais em sua própria planta ou processo;

Maior densidade de energia por volume, em relação aos hidrocarbonetos líquidos, com maior segurança no transporte e armazenamento, podendo ser mais eficiente em motogeradores desenvolvidos para este fim (VERHELST, 2012);

Reciclagem e destinação de uma grande variedade de tipos de embalagens e agregados ao alumínio sem destinação e de grande impacto ambiental;

O óxido de alumínio ou alumina é utilizado em tratamento de água, pois tem efeito de decantação do material orgânico em suspensão na água. Não sendo nocivo ao meio ambiente;

2 FUNDAMENTAÇÃO DA PRODUÇÃO E ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é considerado o elemento químico mais abundante do universo, compondo 90% de todas as moléculas existentes, mas não é encontrado em sua forma gasosa H_2 na atmosfera terrestre, está sempre combinado com outros elementos, formando, principalmente hidrocarbonetos e compostos orgânicos derivados da fotossíntese (GOMES, 2005).

Em condições normais de temperatura e pressão o hidrogênio é gás incolor, inodoro e insípido, bem mais leve que o ar com densidade de $0,0889 \text{ kg/m}^3$, para atingir o estado líquido é preciso que sua temperatura esteja abaixo de 253°C , onde ocupa 700 vezes menos espaço e com cerca de 2,5 vezes mais energia que o CH_4 por unidade de massa, e 1100 vezes mais energia que uma bateria ácida por unidade de massa (ALMEIDA, 2005).

O gás hidrogênio pode ser obtido de várias formas, uma vez que é vetor energético e não fonte, conforme Quadro 1:

Quadro 1 - Formas de obtenção de H_2 .

Processo	Insumo básico	Fonte energética	Uso
Eletrolise	H_2O	Elettricidade	Indústria Química, célula de combustível, foguetes.
Reforma a vapor de hidrocarbonetos	CH_4 (Metano) e H_2O	Calor gerado pela queima	
Oxidação parcial de óleos pesados	Hidrocarbonetos pesados e H_2O	Calor gerado pela queima	
Oxidação parcial do carvão	Carvão e H_2O	Calor gerado pela queima do carvão	
Termoquímica	H_2O	Hidroelettricidade /Energia solar	
Hidrólise a altas Temperaturas	H_2O	Hidroelettricidade /Energia solar	
Eletrolise Fotovoltaica	H_2O	Radiação Solar / Hidroelettricidade	

Fonte: (TOLMASQUIM, 2003).

2.1 O HIDROGÊNIO NO BRASIL

Dentre os usos industriais do hidrogênio no Brasil cita-se a síntese de amônia com 50% do consumo; o hidrocrackeamento do petróleo em 25% da demanda; a síntese de

Metanol em 8%; a síntese de ciclohexano em 4% e outros como alimentos, álcoois, metalurgia, eletricidade, entre outros (TOLMASQUIM, 2003).

Quanto à origem do hidrogênio, o departamento de energia dos Estados Unidos (DOE, 2008), apresenta a estimativa de que 78% são obtidos a partir do petróleo e, ainda, se considera que parte da energia utilizada na eletrólise, seja de origem fóssil, e conclui-se que menos de 4% do hidrogênio produzido no mundo é de origem renovável, neste caso, basicamente proveniente de hidroeletricidade e eletrólise demonstrado na Tabela 1:

Tabela 1 - Produção mundial.

Fonte	Volume ($10^9 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$)	Participação
Gás Natural	240	48%
Petróleo	150	30%
Carvão	90	18%
Eletrólise (Fontes Diversas)	20	4%
TOTAL	500	100%

Fonte: (FICHE, 2001).

Portanto, verifica-se a importância de ampliar cada vez mais a obtenção de hidrogênio por meio alternativo, recentemente denominado “*Green Hydrogen*”, ou hidrogênio limpo, extraído de fontes de energia limpas e renováveis, e utilizado inclusive em indústria alimentícia (CLARK, 2006).

Verifica-se que a maior parte da produção de hidrogênio utiliza o “*Black Hydrogen*”, quando o hidrogênio é extraído de fontes fósseis, como o petróleo ou o gás natural necessitando de processo de separação de resíduos de enxofre em caso de utilização em células de combustível (US, 2004).

2.2 COMPARATIVOS AOS COMBUSTÍVEIS DISPONÍVEIS NO BRASIL

A quantidade de energia contida em uma determinada quantidade de combustível é chamada de poder calorífico, quanto maior o poder calorífico do combustível, maior será a quantidade de energia.

O poder calorífico superior é a quantidade de energia liberada na forma de calor mais a quantidade de energia gasta para a formação de água, no caso de combustível que contém hidrogênio em sua composição. O poder calorífico inferior é a quantidade de energia liberada

na forma de calor por um combustível. Portanto, o poder calorífico inferior representa o potencial energético do combustível (SANTOS, 2005).

Os combustíveis são comercializados em unidades de volume, litros para combustíveis líquidos como o etanol, gasolina e diesel e metros cúbicos no caso de gás natural veicular (GNV).

Esta convenção é conveniente, pois é mais fácil de medir, mas como os combustíveis têm diferentes densidades, a quantidade de combustível em litros muda com a variação de temperatura (BARROS, 2003). No caso do Etanol a 0°C tem massa de 0,826 kg e em 40°C o mesmo litro tem massa de 0,792kg, uma diferença de 4%, sendo que o mesmo ocorre com a gasolina e no caso do gás natural GNV até 15% menos combustível se abastecido a 40°C. Seria mais correto se os combustíveis fossem medidos em kg, pois assim evitaria o fator de variação de densidade, esta dificuldade não ocorre se o combustível for sólido como o alumínio proposto neste estudo, pois já está em quilogramas e não se perde com a temperatura.

Outro fator é a variação de quantidade de energia nos combustíveis comercializados, medido em megajoules (MJ), onde 1 MJ é a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de 10 litros de água em 23,8°C, o que pode variar por diversos fatores, como pureza contaminação, adulterações (OSTERMAYER, 2004).

O que se aproveita dos combustíveis é a energia contida nele, o GNV tem um poder calorífico de 47MJ/kg, mas com densidade 0,7 kg/m³ (em 20°C), assim 1 m³ de GNV contém 33MJ.

A gasolina no Brasil não é um combustível puro, pois é mistura de 27% de etanol e 73% gasolina com densidade 0,81 e 0,72, respectivamente, tendo o etanol 20MJ/l e a gasolina pura 30,6 MJ/l. Com esta mistura na gasolina, fica com 29,7MJ/l. Percebe-se, também, que a regra de 70% de relação entre abastecimento com etanol ou gasolina é proveniente da razão de energia/litro onde 20 MJ/l (Etanol) /27,9 MJ/l (Gasolina x Anidro) = a razão de 0,72.

O diesel tem 42,5 MJ/kg, mas com densidade de 0,85, resulta em 36 MJ/l. Isso explica a sua utilização em veículos pesados e motogerador de melhor rendimento, pois equivale a 1,1m³ de GNV, a 1,29 litros de gasolina, e a 1,8 litros de etanol. Além disso, o motor ciclo diesel tem rendimento superior ao motor gasolina com o ciclo Otto, ou seja, para fins de

comparação, um carro compacto que faz 11km/l de álcool na estrada, considerando apenas as diferenças energéticas do combustível, equivale a 15,3 km/l de gasolina, a 18,15 km/m³ com GNV e a 19,8 km/l de diesel.

Considerando os combustíveis fósseis disponíveis para o consumo em termelétricas o GNV é o menos tributado e com melhor custo benefício, em média R\$ 2,30 (dois reais e trinta centavos), por metro cúbico, isso explica a escolha deste combustível como primeira opção para a geração de energia elétrica em termelétricas, além do menor impacto ambiental, apesar disso o Diesel é o mais utilizado em locais remotos devido a dificuldades de transporte do GNV e de sua disponibilidade de baixa relação custo benefício em empreendimentos de pequeno e médio porte (PERES, 2015).

Apresenta-se este comparativo, pois, são os mesmos combustíveis utilizados em motogeradores estacionários de energia à combustão - motogerador, principalmente à gasolina em motogeradores de pequeno porte. Mas em indústrias com acesso ao GNV podem-se ter os motogeradores adaptados para gás, assim como nos automóveis que receberam kit GNV.

Na Tabela 2, tem-se o comparativo em MJ por quilo de combustível fornecido pela Agencia Nacional de Petróleo (ANP).

Tabela 2 - Tabela comparativa da energia dos combustíveis e seu custo.

Combustível	MJ/kg	MJ/un	R\$(médio)/un	MJ/R\$ (ANP)	Data
Gasolina	37,7	27,9 MJ/l	3,63	7,68	15/08/2017
Gasolina Pura	42,5	30,6 MJ/l	-	-	-
GNV	47,1	33 MJ/m ³	2,70	12,22	15/08/2017
Diesel S10	42,6	36 MJ/l	3,18	11,32	16/08/2017
GLP(bot.13kg)	46,6	605,8 MJ/ botijão	68,00 (botijão)	8,90	15/08/2017
Álcool hidratado	25,6	20 MJ/l	2,19	9,13	16/08/2017

Fonte: (AGENCIA NACIONAL DE PETRÓLEO – ANP, 2017).

2.3 VIABILIDADE DA OBTENÇÃO DE H₂

Um estudo comparativo da obtenção do H₂ é encontrado na Tabela 4 em normal metro cúbico – Nm³ (S. FERNANDES, 2008).

Comparativo do custo da rede de produção de hidrogênio para sistemas com baixa capacidade 100-1000 Nm³ H₂/h, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Custo da produção em reais.

Tecnologia	Custo da produção R\$/Nm³
Reforma a vapor do gás natural CH₄	1,41
Eletrolise com convencional eletricidade	1,00
Bioprocesso de produção de hidrogênio	1,10
Reforma à vapor a partir de Biomassa	1,41
Eletrolise com eletricidade gerada por turbinas de vento	1,10
Eletrolise com eletricidade gerada por células fotovoltaicas	13.96

Nota: cotação Jan/2015.

Fonte: (FERNANDES, 2008)

Apenas 2% do hidrogênio produzido no mundo provêm da eletrolise, pois depende do custo da eletricidade que corresponde a 2/3 do custo de produção (MARQUES, 2004). Entretanto, sua produção pode se viabilizar com o uso da hidroeletricidade no período de baixa demanda.

O método mais empregado utiliza células eletrolíticas alcalinas, que usam como eletrólito soluções de hidróxido de sódio - NaOH com uma eficiência de 60 a 98%, sendo que o custo de produção depende basicamente da fonte primária de energia utilizada (FRONTIN, 2011).

Para quebrar a molécula da água por eletrolise alcalina é necessária uma tensão entre placas de 1,23 volts a 1,5 volts, para se produzir 1 m³ de hidrogênio com eletrolizador de eficiência de 65% gasta-se em média 5,6 kWh em NORMAL metro cúbico. Como a densidade do hidrogênio é de 0,0899 kg/m³, obtém-se que 1kg de hidrogênio ocupa 11,1 m³. Multiplicando esse último valor pela quantidade de kWh necessária para se produzir 1 m³, (5,6 kWh), conclui-se que para se produzir 1kg de hidrogênio, são gastos 62,16 kWh, com uma eficiência de 65% (FRONTIN, 2011).

A mesma quantidade de hidrogênio pode ser produzida por reação aquosa alcalina por 714g de Alumínio, defendidos no presente estudo.

2.4 FORMAS DE TRANSPORTE E ARMAZENAMENTO DE H₂

O hidrogênio geralmente é produzido no local de utilização, nos processos industriais uma vez que é mais fácil o transporte dos insumos do que do próprio hidrogênio. Mas, há

casos especiais de baixo consumo, onde não se tornou viável, até em tão, a sua conversão no local em pequena escala, neste último é transportado em forma gasosa (OLIVEIRA, 2011).

Como o hidrogênio tem densidade de $0,0899 \text{ kg/m}^3$, tende a ocupar um grande volume, mas geralmente pressurizado em tanques de hidrogênio gasoso (GH_2) de 350 a 700 bar de pressão. Já o transporte de hidrogênio líquido (LH_2) é possível com técnicas de criogenia mantendo o hidrogênio abaixo de -253°C , consumindo de 30 a 40% da energia obtível do hidrogênio armazenado (MARQUES, 2004).

Os tanques de GH_2 têm evoluído muito com novos materiais utilizados como plásticos e fibra de carbono ultra resistentes, que chegam a ser 5 vezes mais leves que os cilindros metálicos alcançando uma eficiência máxima de $\sim 6\%$, ou seja, o percentual da massa do reservatório correspondente ao peso em combustível. São transportados na maioria das vezes por caminhão que agregam outras despesas e uso de combustível fóssil durante o transporte (DOE, 2008).

2.5 PROCESSO BAYER, DA BAUXITA À ALUMINA (1821)

Descoberta em 1821 por Berthier, em Les Baux, sul da França, é uma rocha de coloração avermelhada, rica em aluminatos, com composição de 40% de alumina (Al_2O_3). A coloração da rocha é originada pela proporção de óxidos de ferro, na bauxita vermelha em torno de 25% e na branca cerca de 4%. A fonte natural do alumínio é a bauxita, o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre depois do oxigênio e do silício. Não há registros de ocorrência natural de alumínio na natureza, mas sim em associação com o oxigênio com o qual forma a alumina (SAMPAIO, 2015).

No processo de obtenção de alumina das jazidas de bauxita, o minério inicialmente é peneirado por meio de separadores de tamanho, em seguida segue para ser moído em tamanhos uniformes depois é misturado com hidróxido de sódio - NaOH (soda cáustica), em alta temperatura e pressão restando uma lama que é processada e purificada.

*wt – Abreviação de *weight* – utilizado para referir-se à proporção de combustível em relação ao peso do reator de hidrogênio.

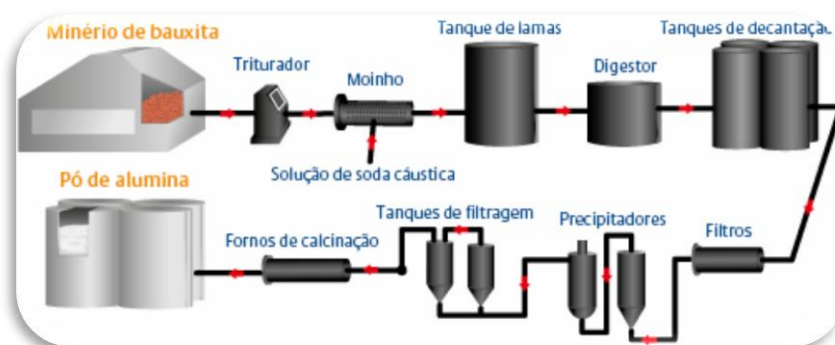
Este processo continua com a decantação de impurezas como ferro, silício e titânio que se precipitam ao fundo onde são removidos. A lama agora mais pura segue para um acréscimo de soda cáustica e temperaturas de 145°, para extrair os compostos com alumínio.

O resultado é o óxido de alumínio (alumina), que é bombeada aos tanques de decantação para a remoção de impurezas ao fundo. O liquor resultante é direcionado a uma série de filtros para recuperar a alumina e a soda cáustica, a lama residual é bombeada a reservatórios de armazenamento onde é seca por evaporação.

O liquor resultante é filtrado mais uma vez para a remoção de materiais contaminantes, segue em seguida aos tanques de precipitação onde são acrescentadas “sementes” de hidróxido de alumina que induzem o processo de cristalização da alumina, produzindo um espessamento da mistura, finalmente é filtrado novamente e segue aos fornos de calcinação (EMERSON, 2017).

O hidróxido agora cristalizado, filtrado e lavado para remover as impurezas e a umidade nos fornos de calcinação, onde é aquecido a 1.000°C, girando para garantir a uniformidade, posteriormente, é resfriado estando pronto para a próxima etapa no processo sendo classificado como alumínio primário – óxido de alumínio, Figura 1.

Figura 1 - Esquemático com o caminho da bauxita à alumina.



Fonte: (EMERSON, 2017).

As reservas brasileiras de bauxita, além da ótima qualidade do minério também estão entre as maiores do mundo (BRASIL, 2017).

2.6 PROCESSO HALL-HÉROULT, REDUÇÃO DA ALUMINA AO ALUMÍNIO (1886)

O óxido de alumínio é muito abundante na natureza, mas especialmente abundante nas jazidas de bauxita, onde se extrai alumina, pelo processo Bayer, já o alumínio é produzido pelo processo de *Hall-Héroult* em que é realizada a eletrólise ígnea da alumina fundida na criolita, onde 80% do valor de produção é a energia elétrica (FOGAÇA, 2015).

Na segunda metade do século XIX, praticamente toda a bauxita era produzida na França foi utilizada para fins metalúrgicos. Neste período a produção de alumina destinava-se principalmente ao uso de mordente (fixador) na indústria têxtil, no entanto somente com o desenvolvimento do processo Hall-Héroult em 1886 que a alumina foi de modo crescente utilizada para a produção de alumínio metálico. Além disso, as aplicações da alumina na indústria não metalúrgica são de compostos abrasivos mecânicos, refratários, produtos químicos, cimentos de alta temperatura e próteses humanas (SAMPAIO, 2015).

Inicialmente a alumina seca e calcinada é adicionada à criolita (Na_3AlF_6), que tem baixo ponto de fusão, é fundente da alumina em alumínio, e pode ser artificialmente produzida a partir da fluorita.

O processo Hall-Héroult, consiste na obtenção de alumínio líquido em cubas eletrolíticas pela redução de alumina calcinada e criolita à temperaturas na ordem de 1000°C por meio de eletrodos de grafite que são consumidos na eletrólise, Figura 2 (BRASIL, 2017).

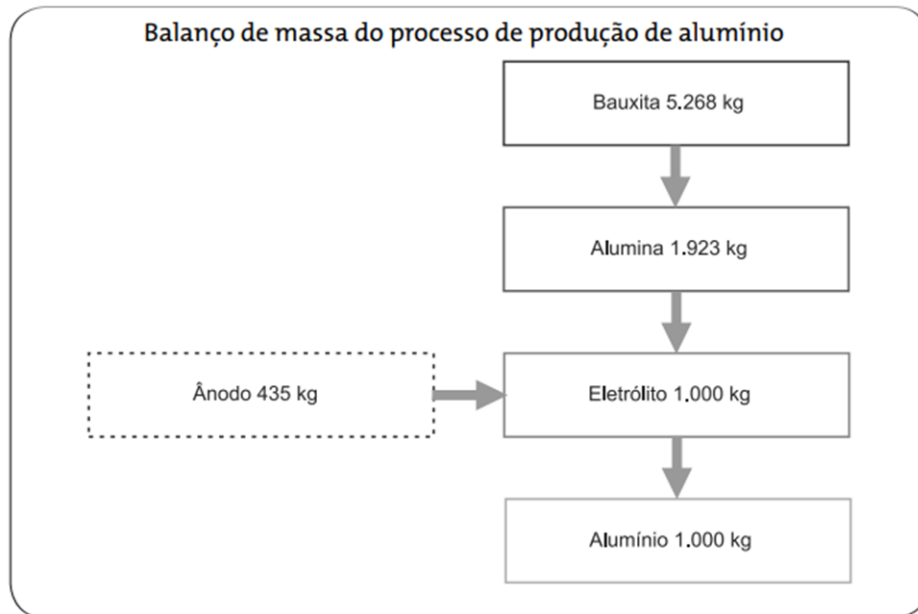
Figura 2 - Processo de produção do alumínio a partir da alumina.



Fonte: (BRASIL, 2017).

Na Figura 3, tem-se o balanço de massa na produção de alumínio pela indústria do alumínio primário segundo informativo da biblioteca virtual do BNDES (BASTOS, 2007).

Figura 3 - Balanço de massa no processo de produção de alumínio.



Fonte: (CARDOSO, 2011).

São necessários aproximadamente 5 kg de bauxita para produzir 1 kg de alumínio. As reservas mundiais de bauxita somam em torno de 27,1 bilhões de toneladas (USGS, 2010). O Brasil com cerca de 7% de reservas mundiais de bauxita. Cerca de 95% de toda a bauxita processada no mundo é usada para a produção de alumina pelo processo Bayer (BASTOS, 2007).

2.7 POTENCIAL DE ALUMÍNIO DISPONÍVEL NO BRASIL

Visualização do potencial de alumínio disponível no mercado demonstrando a viabilidade da proposta deste estudo. Na Tabela 5 apresenta-se a produção mensal de alumínio no Brasil.

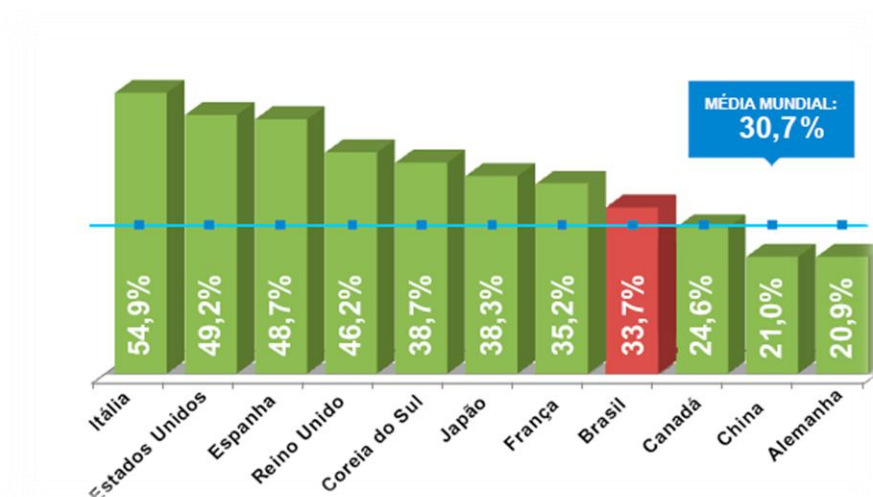
Tabela 4 - Alumínio, produção mensal

Unidade: 1000 toneladas

Período	2014	2015	2015 / 2014 (%)
Janeiro	104,8	70,9	-32,3
Fevereiro	92,6	63,5	-31,4
Março	101,1	72,2	-28,6
Abril	90,5	64,9	-28,3
Mai	81,3	62,8	-22,8
Junho	71,9	61,3	-14,7
Julho	70,4	63,5	-9,8
Agosto	69,6	63,2	-9,2
Setembro	68,6	61,4	-10,5
Outubro	71,0	63,5	-10,6
Novembro	69,3	61,3	-11,5
Dezembro	70,9	-	-
Janeiro – Novembro	891,1	708,5	-20,5
Total Ano	962,0	-	-

Fonte: Produtores Primários de alumínio no Brasil (ABAL, 2015).

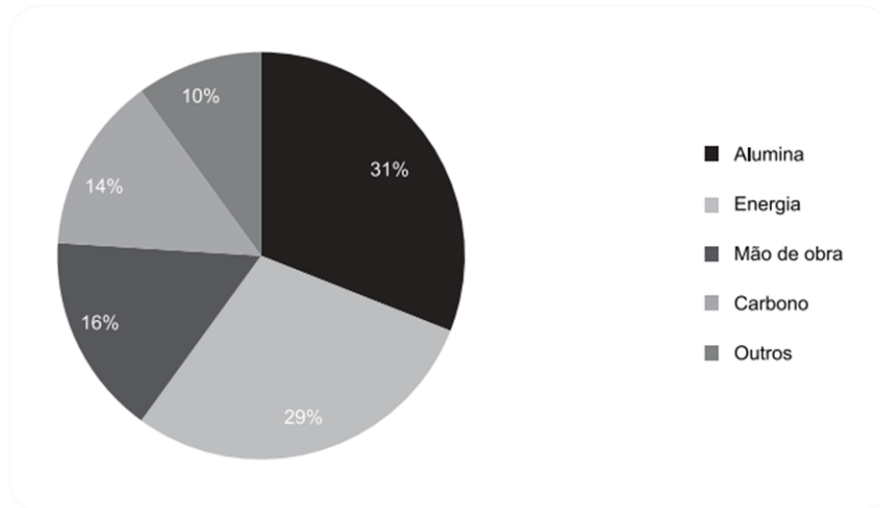
A seguir, tem-se o comparativo da quantidade de alumínio produzido mundialmente na Figura 4.

Figura 4 - Maiores produtores mundiais de alumínio e média de produção**Fonte:** (ABAL, 2015).

A indústria do alumínio é uma grande consumidora de energia elétrica. Assim, a energia é um fator decisivo na competição das empresas no Brasil mais de 6% da energia elétrica gerada é consumida por essa indústria. Representando cerca de 29% do custo de

produção, na Figura 5 tem-se o custo de produção médio mundial de alumínio no primeiro trimestre de 2009 (CARDOSO, 2011).

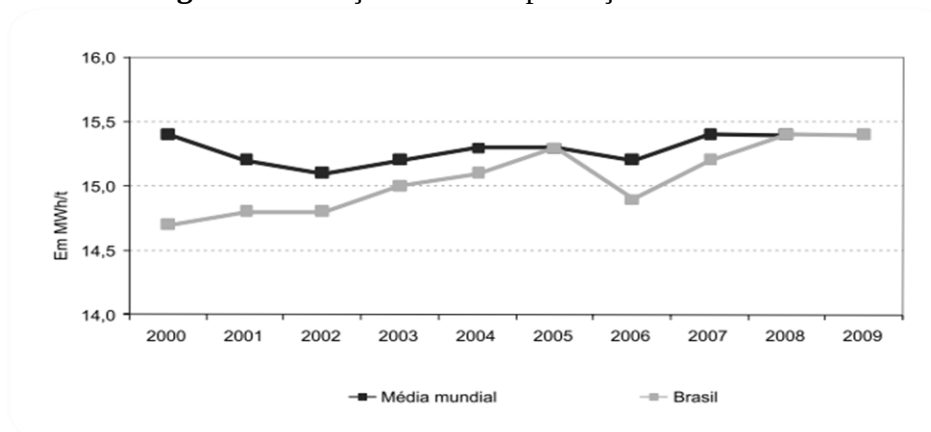
Figura 5 - Custo de produção médio mundial de alumínio



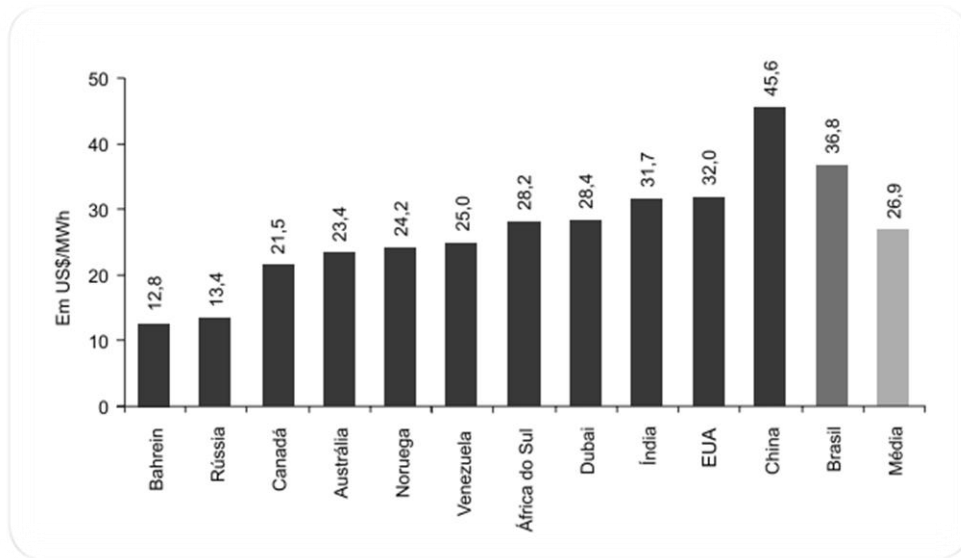
Fonte: (CARDOSO, 2011).

Os produtores de alumínio que se abastecem com energia autogerada, 55% os utilizam recursos hídricos, o restante utiliza energia de fontes fósseis. Na Figura 5 e 6 tem-se o consumo médio específico de energia elétrica na produção de alumínio primário e o custo da energia na Figura 6.

Figura 6 - Relação consumo produção de alumínio

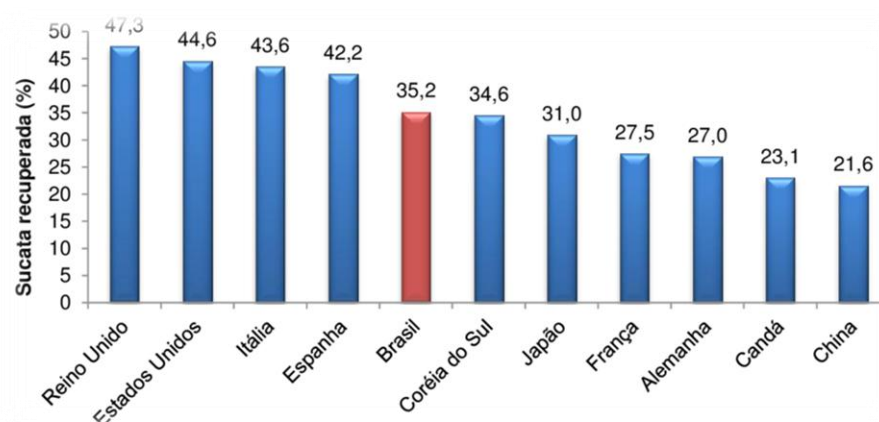


Fonte: ABAL (2015).

Figura 7 - Tarifa de energia elétrica dos produtores de alumínio em 2007

Fonte: ABAL (2015)

Verificando os gráficos percebe-se o elevado custo da produção de alumínio primário oriundo da bauxita, mas é um processo de energia carbono livre verifica-se que a maioria dos produtores utilizam energia de fonte renovável como no caso de hidrelétricas, mas apesar disso é muito mais barato do ponto de vista energético apenas refundir o alumínio chamado secundário, via processos de reciclagem, pois a temperatura de fusão do alumínio é 660°C, com potencial de reciclagem na Figura 8.

Figura 8 - Relação entre sucata de alumínio recuperada e consumo doméstico 2011

Fonte: (ABAL, 2015).

Portanto aproximadamente 65% do alumínio produzido atualmente no Brasil não estão sendo reciclados, abrindo assim espaço para o incentivo da proposta deste estudo, Figura 8.

Todo tipo de alumínio e resíduos podem ser aproveitados, inclusive em locais isolados caso não haja produção de lixo de embalagens no local, pode-se transportar o alumínio que está entre os mais leves dos metais, até mesmo por isso é transportado para todo local de permanência humana, como embalagens para nossos alimentos e bebidas.

Na Figura 9, tem-se os diferentes tipos de alumínio que pode ser utilizado no presente estudo, o que permitem avaliar a oportunidade de aplicação e as diferentes formas de obtenção de alumínio descartado.

Figura 9 - Total Alumínio, Relação entre Sucata Recuperada e Consumo Doméstico 2013



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto às cooperativas de catadores de lixo ou comunidades isoladas, qualquer tipo de alumínio é válido, podendo o reator ser alimentado com latas de toda espécie, embalagens de alumínio, frisos de portas e janelas, peças de carro, como cabeçotes de alumínio duro em seu estado natural, sem a necessidade de fundição ou preparação.

Na Figura 10 tem-se o método de prensagem em blocos de latas de embalagens que dão direcionadas às fundições para o processo de reciclagem, lembrando-se que estas embalagens são todas de alumínio puro sem contaminantes ou ligas.

No caso de outras fontes de alumínio como as liga leves, e blocos de motor e rodas automotivas ocorre a adição de outros metais e aditivos durante a fundição para que o alumínio tenha mais resistência ou dureza, nestes casos para a empresa de reciclagem, é um alumínio de menor valor comercial devido à maior dificuldade de separação e utilidade. O processo defendido neste estudo resolve parte do problema, pois como a reação para a remoção de hidrogênio retorna o alumínio metálico ao estado anterior de óxido de alumínio, pode se tornar uma nova rota no sentido de reciclar materiais de alumínio que anteriormente seriam desprezados, e fornecendo diretamente à indústria de transformação o seu componente primário o óxido de alumínio de forma direta da recicladora de metais.

Figura 10 - Latas de embalagem e fardos prensados em centro de reciclagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NA ROTA ALCALINA

No presente estudo, a reação proposta, utiliza uma solução aquosa de hidróxido de sódio (soda cáustica) a 20%. A adição do metal alumínio a esta solução, promove a reação de simples troca do alumínio em óxido de alumínio Al_2O_3 e libera o gás H_2 no processo de conversão do alumínio. A reação é exotérmica, limitada à temperatura de ebulição da água em 100°C . Além do calor produzido e do gás hidrogênio e do óxido de alumínio (alumina), este último não sendo nocivo ao meio ambiente desde que se neutralize o nível pH antes do descarte com um ácido, como o ácido clorídrico – HCl por exemplo de baixo custo.

A quantidade de gás produzido tem relação aproximada de 9:1 (nove quilos de alumínio para um quilo de Hidrogênio) que, por sua vez, tem a energia de 119,56 MJ, que equivale aproximadamente a 40,5 kWh teórico, não se contabilizando a perda de conversão e o sistema.

A proposta é gerar o hidrogênio em ambiente de baixa pressão, sendo suficiente apenas para o deslocamento satisfatório do gás na ordem de 40 libras/pol²(PSI), a mesma pressão da linha de combustível pressurizada para a injeção nos motores de explosão. Esta pressão é obtida pela própria reação química ao passo em que o hidrogênio é produzido, para vasos metálicos esta é uma pressão segura, uma vez que esta pressão dificilmente conseguirá romper este tipo de material, (TILLMAN, 2013).

Em caso de escape do gás para o meio ambiente, o hidrogênio volatiliza e se miscigena muito rapidamente por ser muito mais leve do que o ar atmosférico, não correndo o risco de se tornar propagador de chama acumulando-se em ambientes fechados como os gases oriundos dos hidrocarbonetos.

A água alcalina pode ser neutralizada com ácidos onde já não causa queimaduras em tecidos orgânicos, quando se libera água com sabão no esgoto também se está liberando uma parte de NaOH ou hidróxido de sódio ou simplesmente reutilizada no reator pois este catalizador não é consumido na reação.

Outras tecnologias de queima deste gás produzido, o H_2 , também são possíveis, como turbina de queima direta, movimento termodinâmico como o motor de *Stirling*, mas o presente estudo prioriza tecnologias mais acessíveis e principalmente o baixo custo de

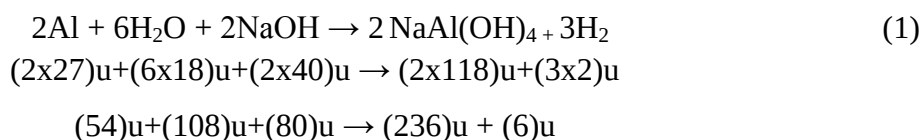
produção, do protótipo e da geração de energia, com objetivos grande escala e simplicidade do uso, exigindo apenas treinamento inicial ou capacitação.

3.1 CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS DA REAÇÃO E RENDIMENTOS ESPERADOS DA SOLUÇÃO

3.1.1 Valores teóricos esperados para a reação química de Alumínio x Água;

A reação do metal puro com a água só não acontece de forma espontânea, pois forma-se por oxidação uma película superficial de óxido de alumínio que protege o metal (WANG, 2009).

A reação inicial é dada por 1:



Massas (Peso Molar):

Alumínio (Al) = 27u

Água (H₂O) = 18u

Hidróxido de Sódio = NaOH=40u

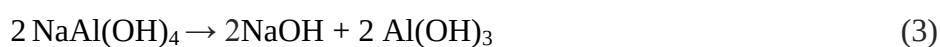
Hidrogênio (H₂) = 2u

Aluminato de sódio (NaAl(OH)₄) = 118u

A presença de uma base forte age no sentido de destruir esta camada de passivação e com a manutenção da reação do alumínio com a água, mantendo a reação e a formação do intermediário NaAl(OH)₄. Neste estágio a reação é inicial e produz H₂ gasoso, vapor de água e aluminato de sódio em 2 (R. LI, 2011):

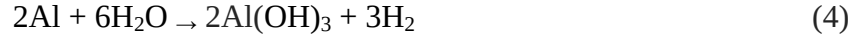


A continuação da reação ocorre da decomposição do intermediário em 3:



Durante o processo meia vida da reação, ocorre a decomposição do intermediário o aluminato de sódio NaAl(OH)₄ em NaOH hidróxido de sódio original e diluído na fase líquida

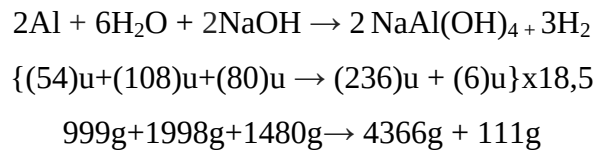
e hidróxido de Alumínio III, a reação passa ao seu estágio final na equação [4] (G. CHOI, 2010):



Verifica-se que o hidróxido de sódio não é consumido pela reação, sendo reutilizado, os produtos finais são o H_2 gasoso e hidróxido de alumínio III, também chamado de alumina hidratada ou gibsita quando desidratada, que é um estágio inicial de mineral, retornando para o fechamento do ciclo do alumínio. O oxido é reciclável pelo método de Harold-Herald ao estado sólido metálico com a adição de criolita e calor via arco voltaico.

Na estimativa de produção de hidrogênio partindo-se de aproximadamente 1kg de alumínio, multiplica-se a reação por 18,5x.

3.1.2 Valores teóricos e proporções do material da reação de simples troca



Portanto, na reação de 999g de alumínio mais 1998g de água resulta em aproximadamente 4366g de aluminato de sódio, e 111g de hidrogênio gasoso. Para o presente cálculo da reação, com o alumínio nas condições normais de temperatura e pressão - CNTP, onde 1 mol de H_2 ocupa 22,4L à 25°C, e pesa 2g, para 1Nm³ tem-se 1000/22,4 = 44,64 x 2,0158g tem-se 89,8g de H_2 por Nm³, então 111g corresponde a 1,247 Nm³, como 1Nm³ tem 120kJ/g x 89,8 g/Nm³ = 10,77MJ/Nm³ do poder calorífico inferior, tem-se então 13,43 MJ/kg_{AL} para cada quilo de alumínio (MIGUEL, 2005), relações na Tabela 6.

Tabela 5 - Relações de grandezas do hidrogênio

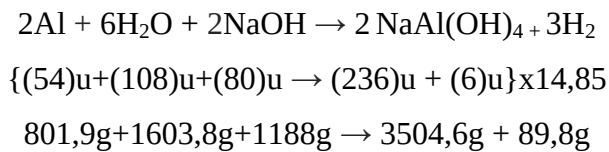
Descrição	Valores
Poder calorífico hidrogênio	10,77MJ/Nm ³
Densidade do hidrogênio	89,8 g/Nm ³
Poder calorífico hidrogênio	120MJ/kgH ₂
Poder calorífico alumínio	13,43 MJ/kgAL

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Conclui-se que 112g de H₂ multiplicado pelo fator de 9 tem-se: 1008g_{AL}, aproximadamente 1kg, então 9kg de alumínio produz 1kg de hidrogênio com energia de 120MJ/kg_{H2} (GAGNON, 2016).

Devido à densidade de 89,8 g/Nm³, que 1kg_{H2} de ocupa 11,13Nm³, repetindo a equação para encontrar 89,9g de H₂, tem-se:

(Reação de simples troca)



Portanto 0,802kg de alumínio produz 1Nm³ de H₂ que tem 10,77MJ/Nm³ pela equação utilizada neste estudo do rendimento do alumínio e produção de H₂. (SOLER, 2009).

3.1.3 Valores energéticos

Valores de referência citados para 13,43 MJ/kg_{AL}:

Equivale à:

- ✓ 3,73kWh;
- ✓ 5,00HP/h;
- ✓ 5,07CV/h;
- ✓ 12.719,00BTU;
- ✓ 3.207,70kCal.

Correspondência energética de valores:

- 9kg de alumínio para 1kg de hidrogênio gasoso;
- 1 latinha de alumínio tem 15g corresponde a 1,68g H₂;
- 1,68g H₂ sendo 120kJ/g que corresponde a 201,6kJ ou 56 Wh;
- 1 latinha produz aproximadamente o volume de 0,018m³ de gás H₂;
- 54 latinhas de 15g tem 802g de alumínio;
- 802g de alumínio produz 1Nm³H₂.

Portanto, uma latinha de 15g que seria jogada no lixo tem a capacidade energética de 56W, o que equivale a 5 lâmpadas fluorescentes compactas de 10W acessas pelo período de 1

hora considerando um fator de rendimento de 100%. Assim serão necessárias aproximadamente 67 latinhas para somar 1 kg de alumínio.

Cálculo de valor aproximado de reciclagem de alumínio em hidrogênio na Tabela 7 comparado com a eletrólise convencional:

Tabela 6 - Comparativo da rota do alumínio com a rota eletrolítica.

Estimativa teórica proposta no presente estudo					
Hidrogênio (Eletrólise Grande produção compra em MWh)	119,56	10,77 MJ/m ³	$0,28 \times 5,6 =$ 1,568	6,86	07/2017
Hidrogênio (Eletrólise)	119,56	10,77 MJ/m ³	$0,80 \times 5,6 =$ 4,48	2,40	07/2017
Hidrogênio (Água X Alumínio proposto no presente estudo)	119,56	10,77 MJ/m ³	$1,50 \times 0,802 =$ 1,203	8,952	07/2017

Nota: preço médio da CCEE 0,28 R\$/kWh para consumidor grande porte e 0,8 R\$/kWh consumidor final cálculos no presente estudo.

Fonte: Adaptada de ANP-SLP (2017).

Para o cálculo da antepenúltima e penúltima linha da Tabela 7 utiliza-se o valor de mercado da energia calculado pela CCEE que realiza mensalmente o cálculo da média mensal do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) em R\$ 0,28/kWh (CCEE, 2017). E o residencial com impostos no valor atual de 0,80 R\$/kWh e para cada metro cúbico de H₂ por eletrólise convencional com rendimento de 65% consumindo 5,6 kWh (FERREIRA, 2011).

Valor de reciclagem do alumínio varia de R\$1,50 a R\$2,50 por kg (valores atuais), sendo portando entre as três opções de produção de hidrogênio a mais viável economicamente. Neste comparativo o alumínio e água o decapante NaOH, são utilizados como vetores energéticos, pois podem ser renovados, e como insumos armazenados e transportados fisicamente ao contrário do insumo da energia elétrica para a eletrólise que precisa de um longo meio de transporte, e diferente dos combustíveis fósseis que, apesar de ainda apresentarem vantagem financeira, não se renovam e têm ação no efeito estufa além de um risco muito maior no transporte e estocagem.

Os valores obtidos no cálculo do alumínio na última linha da Tabela 7 são valores encontrados em pesquisa nas recicladoras, mas no caso do consumidor final pode ser sem custo, devido ao reaproveitamento do lixo próprio. Em casos de consumo de grande escala o custo é mais baixo.

Além disso, o alumínio como combustível é apenas convertido numa reação de simples troca transformando-se em óxido de alumínio (alumina), que tem valor comercial. Similar ao alumínio que precisa apenas de uma reação de eletrolise ígnea processo *Hall-Hérault*, para retornar ao alumínio, iniciando novamente sua função como vetor do hidrogênio (BARROSO, 2013). Bem diferente dos outros combustíveis da tabela 7 na eletrólise que é consumido material não renovável. (SILVA, 2012).

Fazendo a comparação entre o diesel 36kJ/L ou 42,4kJ/kg que tem mais energia por litro entre os hidrocarbonetos, e a quantidade de energia no alumínio:

- A densidade o diesel é 0,853kg/l, então 60 litros pesam 51,18kg;
- 1 Tanque de 60litros de diesel tem $36 \times 60 = 2160$ kJ;
- 1 Quilograma de diesel tem $42,4 \text{Mj/kg} \times 51,18 \text{kg} = 2160$ kJ;
- O hidrogênio tem 119,6 kJ/kg;
- $2160 \text{kJ} / 119,6 \text{kJ Molar de H}_2$, tem-se 18 kg de H₂;
- Com a relação de 9x1 tem-se 162kg de alumínio para a equivalência;
- O Al tem densidade 2,7 kg/l, portanto ocupa volume de 60l ou dm³ de alumínio.

Com estes comparativos verifica-se que é mais pesado o combustível solido alumínio, mas ocupa o mesmo volume, dentre as várias tecnologias de estocagem e transporte de hidrogênio esta é a mais viável, pois tem-se um volume de estocagem, extremamente menor, para 60l de alumínio tem-se que 18kg de H₂ com 89,8g/Nm³ que equivale a 200Nm³ de H₂. Considerando que os cilindros para gás são da ordem de 10Nm³, tem-se uma grande vantagem neste método, como o armazenamento sólido em alumínio.

4 RESULTADOS COM DIFERENTES MÉTODOS DE TESTE E PROCESSAMENTO DO HIDROGÊNIO

Nesta parte do texto apresentam-se séries de experiências realizadas para a comprovação prática dos princípios apresentados. Foram elaboradas experiências ao longo do tempo de pesquisa e de acordo com os resultados obtidos foram propostos melhoramentos, ao final dos resultados tem-se comentários e discussões.

4.1 ENSAIO DE SISTEMA PARA A VERIFICAÇÃO DA VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE EMBALAGEM DESCARTÁVEL (Valores para uma lata convencional de 15g de alumínio esmaltado picotado).

Inicialmente foram recolhidas latas de diferentes modelos, mas padronizadas com aproximadamente 15g cada, foram picotadas sem a remoção de sua pintura original, Figura 11.

Figura 11 - Tipo de lata utilizada para o ensaio de H_2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Executaram-se duas experiências simultâneas para comparação, onde o início da experiência na imagem na Figura 11 e 12 com a colocação dos balões para a comparação do gás produzido.

Figura 12 - Início da reação: em solução alcalina fechada por balão de ensaio de H_2 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13 vê-se a reação em destaque, apesar da tinta que apenas retarda o processo no início, uma vez que a reação atinge a temperatura de 60° por ser exotérmica a liberação de H_2 se intensifica.

Figura 13 - Reação em solução alcalina formação de bolhas de H_2 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Avanço da reação que consome os componentes da solução, transformando o alumínio em aluminado de sódio e posteriormente em alumina, na Figura 14.

Figura 14 - Avanço da reação formação de bolhas e aparecimento de alumina e H_2 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se o enchimento dos balões do experimento, quanto mais hidrogênio é liberado maior o volume dos balões, na Figura 15 atinge-se o volume total desta experiência após 2hs de reação.

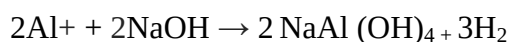
Figura 15 - Volume máximo alcançado com o total de H_2 produzido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo total para o consumo de todo o material da lata de 15g foi de aproximadamente 2hs sem nenhuma fonte de calor externa que possa acelerar a reação e também sem isolamento térmico a temperatura ambiente aproximadamente de 30°C.

No fim do experimento restam apenas cascas de tinta flutuando na água, e aluminato de sódio de coloração escura metálica cinza, devido à etapa de formação do intermediário NaAl(OH)_4 , (1 PORCIUMCULA, 2013):



Sendo diluída em água para neutralização do pH a alumina não é toxica ou nociva ao meio ambiente, podendo ser recolhida para beneficiamento em alumínio novamente, composta de óxido de alumínio, água e resíduos de NaOH. Quando a solução esfriar e decantar o líquido fica translúcido novamente com o pó banco de alumina decantado ao fundo esta solução de soda cáustica pode ser utilizada novamente bastando se necessário apenas acrescentar mais água ou NaOH para atingir novamente a concentração desejada.

A alumina se forma depois que a reação se completa e decanta ao fundo como um pó abrasivo de coloração branca, a Figura 16.

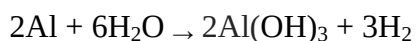


Figura 16 - Aspecto final da reação completa com alumina ao fundo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

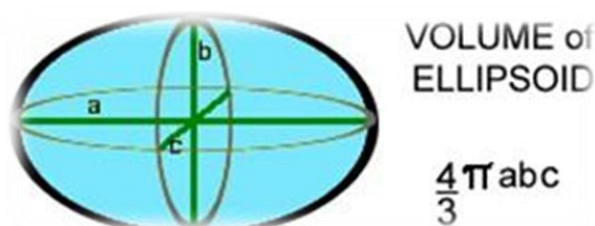
4.1.1 Cálculo das quantidades utilizadas na experiência

Resultados práticos: 250 ml de água + 36g de hidróxido de sódio.

Produção de gás esperada: 18,5l com 15g de latinha.

Cálculo do balão equação do volume da elipse, de acordo com a Figura 17.

Figura 17 - Volume do Elipsoide.



Fonte: Web formulas (2017).

Valores medidos no balão obtido medindo o perímetro externo e encontrando os respectivos raios:

$$a = 0,158m$$

$$b = 0,158m$$

$$c = 0,173m$$

Resultado= 0,01809 Nm³ ou 18,09 litros, aproximadamente.

4.1.2 Procedimento Experimental em Laboratório com a contribuição Prof.^a Dr. ^a

Maria Ângela de Moraes Cordeiro departamento de Química Unesp – FEIS

Após reação completa, um resíduo sólido obtido foi filtrado, lavado com água destilada, seco em estufa e submetido à análise por Difração de Raios X. O pó branco tinha aspecto homogêneo e finamente pulverizado.

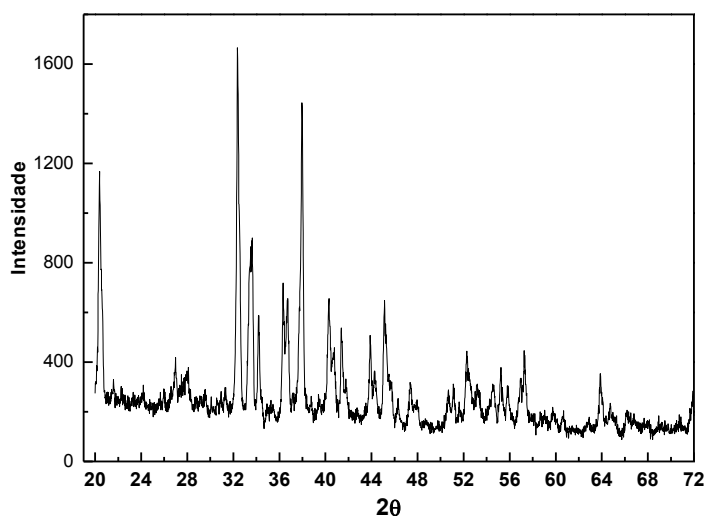
Sobre o aparelho e análise:

Foi utilizado o método do pó empregando-se um difratômetro Shimadzu XRD-6000 com radiação CuK α ($\lambda=1,54056 \text{ \AA}$), tensão de 40 KV, corrente elétrica de 30mA, tamanho do passo de 0,010 2 θ e tempo por passo de 1,000 s, com velocidade de varredura de 1° (2 θ) min, com ângulo 2 θ percorrido de 5 a 90° (I. LEVIN,1995).

Discussão:

A difração de raios X da amostra apresentado na Figura AA, indica a formação final de $\text{Al}(\text{OH})_3$ como gibsita ($\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$), a bayerita ($\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$) confirmando que o hidróxido de sódio atua como catalisador da reação (T.C. ALEX,2011).

Figura 18 - Difratoograma da gibsita em forma natural.



Fonte: LAB – Química - FEIS (2018).

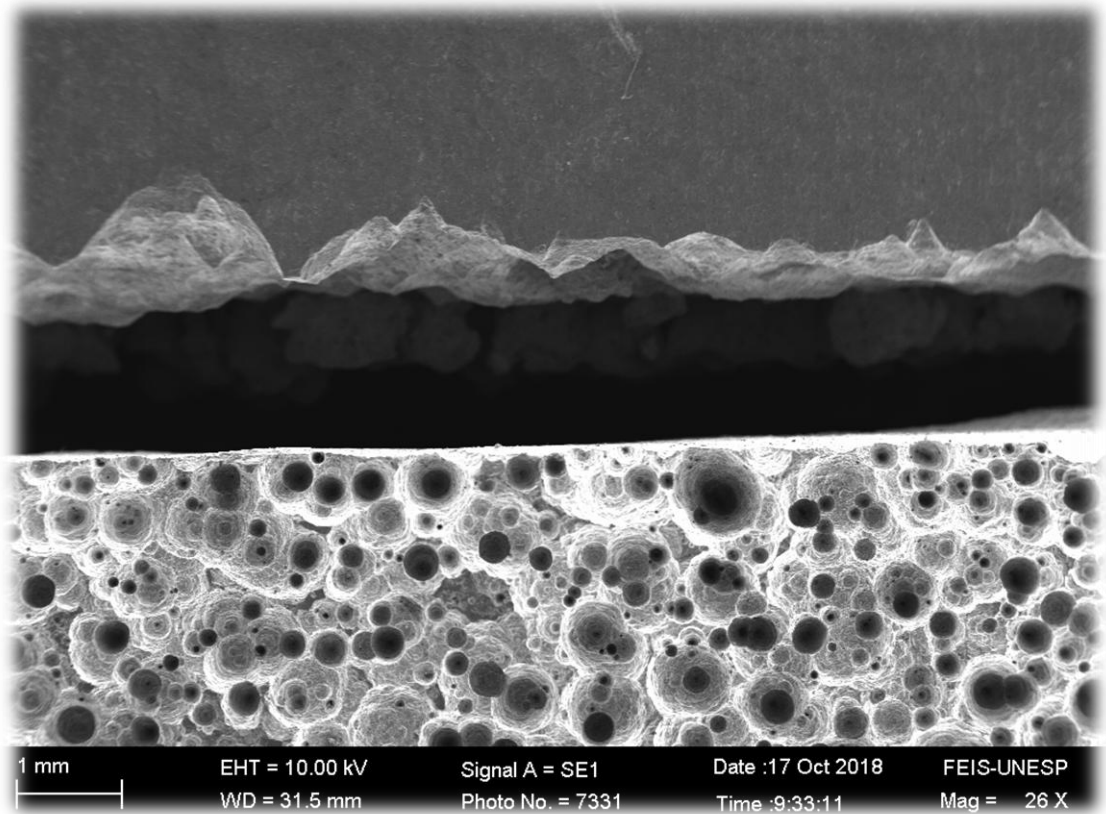
Na Figura 18, está apresentado o difratograma da Gibsita em sua forma natural. Conforme a biblioteca do International Center for Diffractional Data (JCPDS) (A. AMIRI, 2013), o DRX obtido para a Gibsita Natural (Registro JCPDS: 33-0018) revela a presença de um material monoclinico, característico da Gibsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) cujos picos identificados em $2\theta = 18,28, 20,3, 26,89, 28,98^\circ$, e os picos entre $30 - 80^\circ$, são atribuídos a este material (H. WANG, 2006), (B.ZHU,2010), (A. AMIRI, 2013). Pode-se verificar na Figura 18, que todos os picos detectáveis são atribuídos aos picos da Gibsita a partir das análises com os resíduos da reação (A. MALKI, 2014).

4.1.3 Microscopia eletrônica realizada em laboratório UNESP

Com o objetivo de confirmar e conhecer o aspecto da decomposição do alumínio pela reação obteve-se os seguintes resultados em microscopia ótica de corpos de prova utilizados em reações pela presente pesquisa. Na Figura 19 tem-se na face superior o alumínio não

atacado com a superfície lisa já na parte inferior observa-se a corrosão que forma estruturas em cavidade.

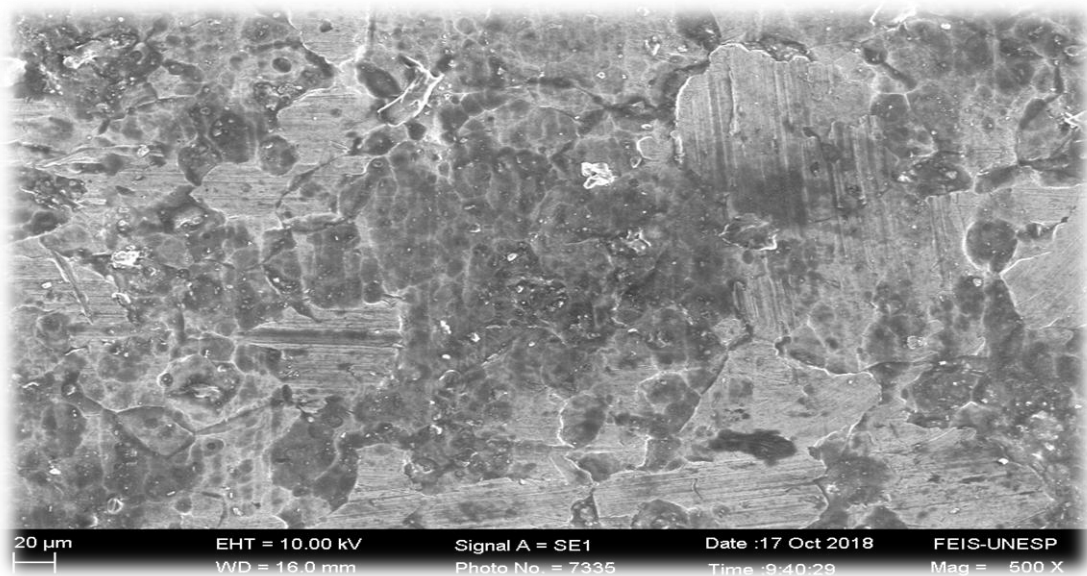
Figura 19 - Microscopia eletrônica realizada em laboratório de mecânica



Fonte: LAB Mecânica – Unesp FEIS (2018).

Na Figura 20, tem-se o aspecto inicial da superfície do alumínio metálico com camadas de aluminato que posteriormente com a inclusão do NaOH como catalizador dissolve esta proteção natural do alumínio iniciando a reação com a água (ZHU, 2010).

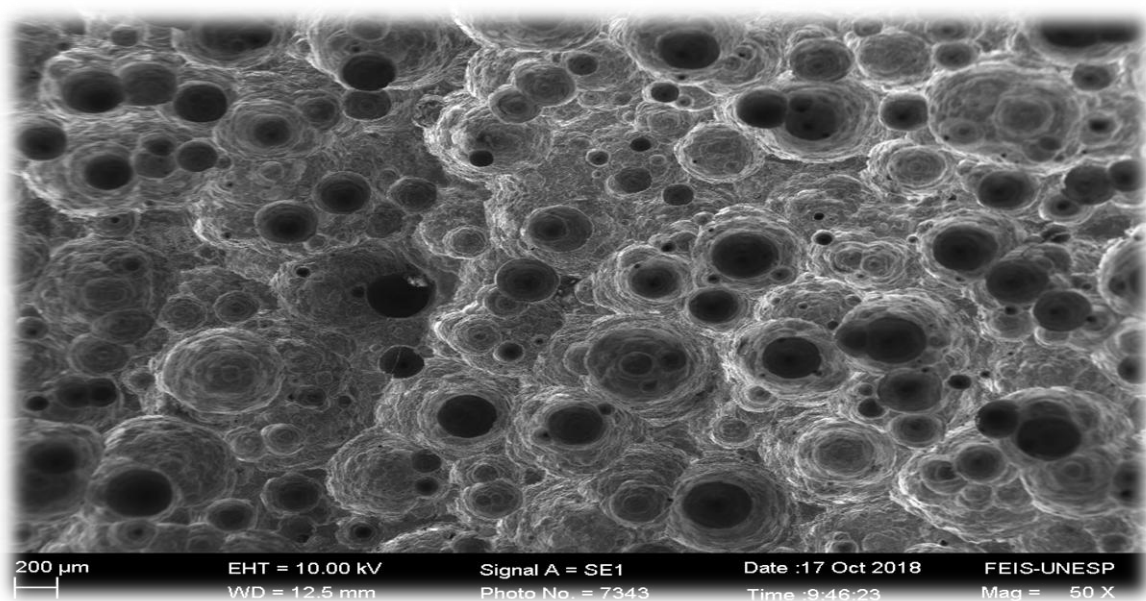
Figura 20 - Microscopia eletrônica camada inicial antes da reação



Fonte: LAB Mecânica – Unesp FEIS (2018)

A Figura 21 apresenta a superfície atacada pelo NaOH, é claramente possível verificar a formação de cavidades formadas pela conversão do material metálico em óxido, na comparação com outros métodos de obtenção do hidrogênio em meio alcalino podendo ser utilizado em comparação com outros meios alcalinos com o KOH não experimentado no segue.

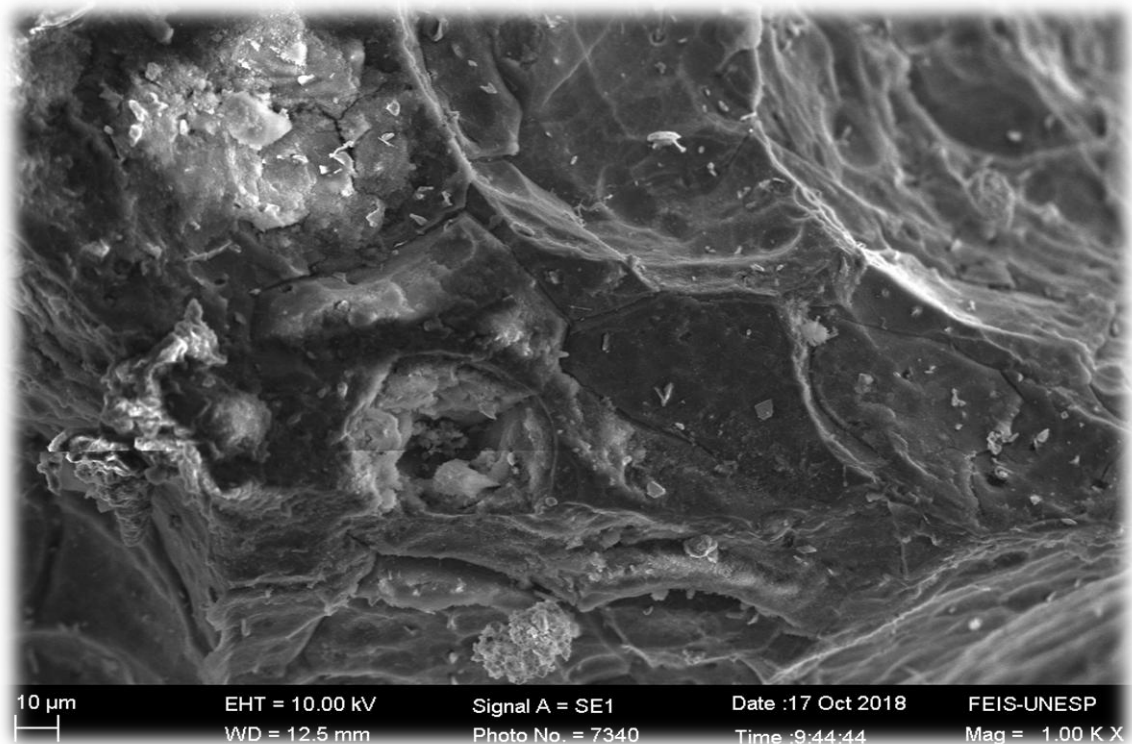
Figura 21 - Formação de cavidades na superfície, conversão alumínio metálico em óxido.



Fonte: LAB Mecânica – Unesp FEIS (2018)

A visão microscópica da Figura 22, apresenta o detalhe do óxido ainda em estado de desprendimento do corpo metálico, criando ponto de penetração no material e posterior desprendimento, com a liberação do espaço e formação das cavidades até o consumo total do material metálico atacado pela solução.

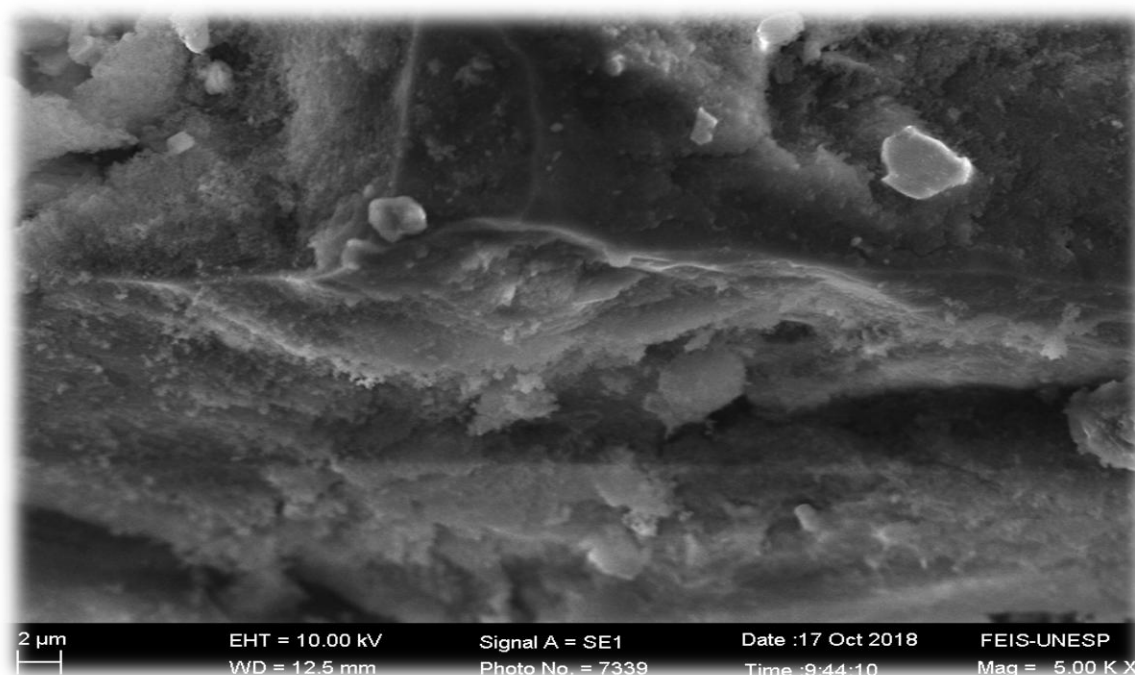
Figura 22 - Microscopia eletrônica com ponto de conversão evidente de alumínio em alumina hidratada, ou gibsita quando desidratada



Fonte: LAB Mecânica – Unesp FEIS (2018)

Na Figura 23, tem-se o aspecto da formação dos pólipos e escamas de gibsita, com a formação de estruturas em cristalização, muito característico dos óxidos, este tipo de formação pode ser prejudicial pois pode limitar a velocidade da reação, mas em ensaios posteriores verificou-se que a reação em temperatura acima de 60° a corrosão da peça metálica ocorre totalmente.

Figura 23 - Microscopia Eletrônica ampliação da formação de camadas de gibsita.



Fonte: LAB Mecânica – Unesp FEIS (2018).

Comprovou-se que o método de produção é estável e confiável, sendo, portanto, de fácil obtenção bastando apenas o contato do material metálico com a solução catalítica, não observou-se nenhuma dificuldade quanto ao início da reação, pois utilizaram-se os mais diversos materiais, que mesmo pintados ou esmaltados como latas de embalagem, foram corroídos completamente em poucos minutos, sendo portanto possível e plausível a utilização para a produção em larga escala na conversão de lixo metálico de alumínio em hidrogênio de forma direta sem a necessidade de qualquer preparação.

5 SÉRIE DE ENSÁIOS DE REATORES PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM MOTOGERADOR À 100% DE HIDROGÊNIO

Nesta parte dos resultados apresentam-se, ensaios de reatores de hidrogênio confeccionados de diferentes materiais para a utilização em motogeradores elétricos adaptados para a utilização com hidrogênio à taxa de 100%.

5.1 EXPERIÊNCIA PARA A ALIMENTAÇÃO DE UM MOTOGERADOR DE ENERGIA DE 2HP

(Com 67 latas de alumínio picotadas 1kg em reator para acionamento de moto motogerador adaptado).

Para a reação de produção sobre demanda, foi escolhido um recipiente de material que não fosse corroído com as seguintes características, veja na Figura 24:

Capacidade do tanque: 7,6 litros

Capacidade útil: 6 litros

Peso Vazio: 1,6 kg

Pressão Máxima: 3,5 bar ou 51 psi (libra/pol²)

Embalagem: 215x215x475 mm

Tipo material: Polipropileno.

Figura 24 - Aspecto do vaso de pressão de reação utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

De modo semelhante ao ensaio anterior foram picotadas as 67 latas e adicionado 5 litros de água com a mesma concentração de NaOH, 200g por litro de H₂O.

A Figura 25 apresenta um motogerador genérico convertido para a utilização com hidrogênio à taxa de 100%, esta finalidade de uso produz eletricidade e calor sem a contaminação do meio ambiente com o carbono, comumente presente em motogeradores movidos à hidrocarbonetos, como neste caso não utiliza-se um hidrocarboneto, está-se livre de resíduo com a queima de hidrogênio em câmara de explosão ocorre a reação entre o oxigênio do ar e o hidrogênio, resultando no escape do motor apenas vapor de água e calor.

A utilização deste método não é orientada em função da eficiência da conversão de hidrogênio em eletricidade, mas sim em um método que possa ser utilizado em escala e utilizando tecnologia amplamente disponível, com o fim de reciclagem de materiais anteriormente sem destinação ou baixo valor comercial (sucata). Prioriza-se então a disponibilidade de tecnologias de baixo custo e que pode ser utilizado em grande escala no próprio local de necessidade ou aplicação, utilizando também equipamentos portáteis e que pode ser utilizado em local remoto ou como apoio de geração auxiliar.

Na Tabela 8. As características do motogerador monofásico de 2HP utilizado têm as seguintes características.

Tabela 7 - Características do motogerador.

Potência Máxima	750W
Potencia Nominal	650Wh
Voltagem Nominal	127V
Velocidade	3600rpm
Amperes de Saída	8,3A
Peso	15,5kg

Fonte: Elaborado pelo autor.

Teste de queima de H_2 para a verificação do combustível a ser introduzido no carburador, observa-se a chama na ponta da agulha de injeção de combustível na Figura 25.

Figura 25 - Motogerador de energia e agulha para injeção do combustível no carburador

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente o motogerador foi ligado com gasolina, depois de aquecido em ritmo normal de operação com a carga de um ventilador de 200W para demonstração, depois de um minuto de operação foi introduzida a agulha de injeção no carburador e fechada a torneira de gasolina. Na Figura 26, o motogerador inicialmente com fumaça na exaustão devido ao CO_2 .

Figura 26 - Motogerador soltando fumaça, palma da mão com névoa branca



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se a ausência de fumaça CO_2 , no escapamento depois de alguns segundos da mudança de gasolina para H_2 , conforme a Figura 27 a reação passa a ser:

Figura 27 - Sem fumaça, palma da mão sem a névoa branca



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 28, tem-se o motogerador funcionando, em regime permanente com H_2 como combustível.



Figura 28 - Acionamento com o H_2 injetado no carburador sem CO_2 na saída



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29, tem-se a alumina e tinta de latas de alumínio que restam no reservatório.

Figura 29 - Óxido de alumínio – alumina e restos de alumínio não consumido.

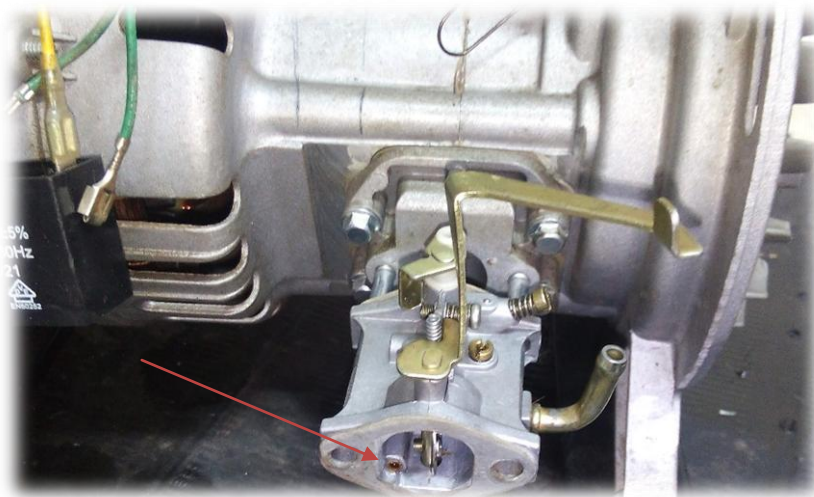


Fonte: Elaborado pelo autor.

Concluiu-se com a experiência, que o reator e o motogerador funcionam como o esperado sendo capaz de sustentar um ventilador de 200W. Utiliza-se a adaptação de uma agulha de aço inox na ponta da mangueira do reator para injetar o gás sob pressão, e

direcionando o combustível para o misturador do carburador convencional a gasolina para o funcionamento a gás H_2 produzido sob demanda, na Figura 30 verifica-se o ponto de entrada do hidrogênio.

Figura 30 - Carburador do motogerador de 2 HP ponto de entrada do hidrogênio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Defende-se nesta pesquisa a utilização de tecnologias de baixo custo, apesar do motogerador a gasolina ter um rendimento térmico de aproximadamente 25% (TILLMANN, 2013), mas com custo relativamente baixo de aproximadamente 1,00 R\$/W, um motogerador com maior capacidade pode ter um custo menor por Watt (DE SOUZA, 2006).

O presente motogerador produz até 750W pico, foi adquirido por R\$ 300,00 o alumínio custo zero, utilizou-se resíduos anteriormente destinados ao lixo doméstico, sendo reciclado com o experimento, a soda cáustica com o custo médio de R\$ 10,00(dez reais) por Kg, custo do reator e acessórios abaixo de R\$ 200,00. A água pode ser de qualquer origem inclusive salgada ou sem tratamento, portanto desconsidera-se o custo por ser muito baixo e abundante.

Como esta experiência foi fortemente exotérmica, necessitou-se parar a reação antes do final do combustível alumínio, após 20 minutos, pois o reator de polipropileno atingiu temperaturas próximas a 100°C, chegando ao limite da temperatura suportada pelo vaso utilizado, e produzindo uma quantidade de gás H_2 em excesso e sem controle.

Para solucionar, elaborou-se um novo sistema.

5.2 SISTEMA DE CONTROLE DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR MEIO DE BOMBEAMENTO DA SOLUÇÃO ALCALINA COM OBJETIVO DE ALIMENTAÇÃO DE MOTOGERADOR DE ENERGIA

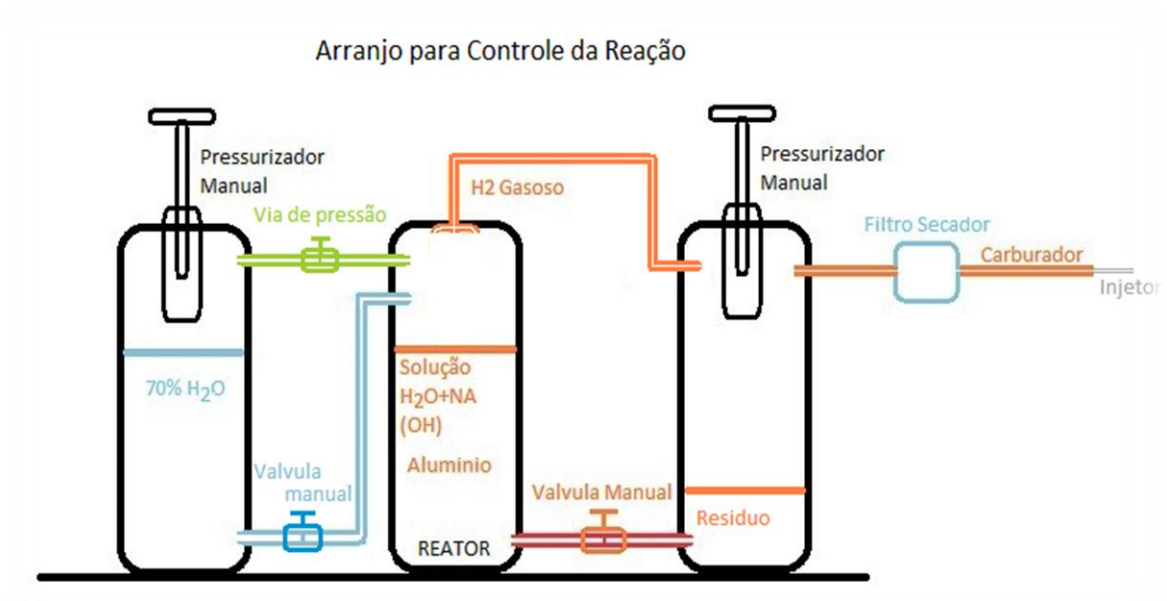
(Com 67 latas de alumínio picotadas 1kg em reator controlado mecanicamente com auxílio de reservatórios auxiliares e válvulas).

Devido à necessidade de controle do processo concebeu-se um sistema com 3 reservatórios interligados:

- 1 - Reservatório com 7 litros de água pura para diluição da solução, tendo um efeito de freio na reação;
- 2 - Reservatório onde a reação ocorre controlada manualmente;
- 3 - Reservatório vazio onde com a pressão de saída do segundo reservatório, funciona preferencialmente como filtro secante da reação onde qualquer líquido que saia do segundo reservatório caia no terceiro;

Eventualmente, conforme a demanda da reação pode ser utilizada como depósito de líquido diminuindo-se a quantidade de líquido em contato com o alumínio freando-se a reação novamente, como no esquema da Figura 31.

Figura 31 - Esquema de controle manual da reação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A via de pressão permite que a bomba do reator 1 faça pressão positiva no reator 2 possibilitando o esvaziamento do reator 2 para o 3 reator.

A via que sai abaixo do primeiro tanque, permite a diluição da solução com água, já a válvula entre o segundo e terceiro tanque, permite o esgotamento da solução para o reservatório 3 que não contém alumínio e freia reação.

No caso da utilização experimental onde o controle da reação pode ser acompanhado por um operador, este sistema é recomendado em detrimento do uso de um único vaso como no caso anterior, pois com um único vaso não há possibilidade de controle e a produção fica descontrolada sendo muitas vezes abortada, esgotando-se a solução do reator pela mangueira de H₂, que sai aquecido e com pressão, abaixo se observa o modelo utilizado na experiência prática, na Figura 32.

Figura 32 - Sistema de controle mecânico manual para controle da reação H_2 com 3 vasos de pressão



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado obtido com este sistema de controle foi mais satisfatório e mais seguro do que no primeiro ensaio, pois não houve a necessidade de abertura de emergência sobre pressão. Foi possível diluir quando necessário e remover parte da solução para o controle da temperatura da reação exotérmica, controlando-se até o fim do alumínio.

Apesar de funcionar conforme o planejado foi descartada a possibilidade de automação deste processo pois ocorrem depósitos significativos de alumina e tinta ao longo da tubulação, sendo muito provável o entupimento das mangueiras durante a operação, inviabilizando o controle do processo de forma automática, podendo levar a uma situação de emergência indesejável, e de difícil resolução.

5.3 CONSTRUÇÃO DE MOTOGERADOR DE HIDROGÊNIO MICROCONTROLADO PARA A PRODUÇÃO SOB DEMANDA DE HIDROGÊNIO PARA ALIMENTAÇÃO DE MOTOGERADOR DE ENERGIA DE 6,5 HP

(Com 67 latas de alumínio picotadas, 1kg Al em reator controlado por microcontrolador, com sistema de elevador do combustível alumínio na solução).

Os parâmetros de estanqueidade são detalhados na norma técnica NR13 caldeiras, vasos de pressão e tubulações, o vaso utilizado é classificado como classe B e Grupo IV com a pressão de trabalho inferior a 1Mpa (NR13, 1978).

A Figura 33 representa a forma do vaso principal do primeiro reator de 30 litros de volume, com controle por imersão de bandeja com sistema motorizado;

O Item 1, trata de microcontrolador, programado para a leitura dos sensores de temperatura, controle de nível de solução, controle de temperatura da solução via resistência de aquecimento inicial, o Item 16, gera sinal de telemetria e comunicação serial com dispositivos remotos;

O Item 2, trata de motor de alto torque com parafuso de inox helicoidal de grande precisão, pertencente ao mecanismo de controle de profundidade da bandeja de rejeitos de alumínio;

O Item 3, trata de sensor de pressão com o objetivo de monitoramento da pressão do vaso, com *set point* para definição de pressão de trabalho do reator;

O Item 4, refere-se ao vaso de pressão, confeccionado em material especial Inox-316, com camada de espessura de 2mm, testado em pressão 2 vezes a pressão de trabalho, na ordem de 2 Bar. Com cordões de solda em material equivalente de tecnologia TIG;

O Item 5, representa o posicionamento do sensor de nível alto, responsável pelo controle do nível máximo da solução;

O Item 6, representa o posicionamento do nível do sensor de nível baixo de solução interrompendo o processo de produção e solicitando o enchimento do vaso do reator, nesta posição, o algoritmo controlador do sistema de elevação da bandeja de solução há um intertravamento para não permitir o início da reação com de tanque abaixo do nível permitido por questão de segurança;

O Item 7, apresenta válvula de esvaziamento e limpeza do tanque, existe também possibilidade de abertura sob pressão em caso de emergência, onde a parte líquida é expelida protegendo o reator em caso de alta pressão monitorada pelo microcontrolador;

O Item 8, apresenta tela de monitoramento de dos parâmetros de segurança temperatura estágio de produção e rendimento – IHM – que pode ser desativado de modo automático permitindo o controle da reação e a movimentação da bandeja da reação a qualquer tempo.

Item 9, eixo rosqueado de posicionamento do sistema de elevação;

Item 10, tampa de abertura ou flange de abertura do vaso de pressão, apresenta mecanismo diferenciado de vedação e fechamento apropriado;

Item 11, Válvula mecânica de alívio de pressão, ao atingir pressão programada menor que a pressão máxima do reator a mesma libera o hidrogênio, recomenda-se a utilização em ambiente arejado e sem chamas este sistema é redundante com o sistema automatizado;

Item 12, saída de hidrogênio e umidade, este sistema é monitorado por manômetro de pressão na linha de produção com saída em redundância com o sistema de monitoramento digital, visa a segurança geral do sistema de saída feito de material inox-316 com acoplamento de serpentina de resfriamento e posterior filtro secador, que absorve o excesso de umidade;

Item 13, nível de solução no vaso de reação, representa mais da metade do volume do vaso para o acúmulo de hidrogênio em sua parte não líquida, com o consumo do hidrogênio durante o processamento do material este nível tende a baixar, sendo monitorado pelo sensor quando ao nível mínimo;

Item 14, Eixo de elevação, suporta todo o peso do combustível alumínio e a bandeja de elevação;

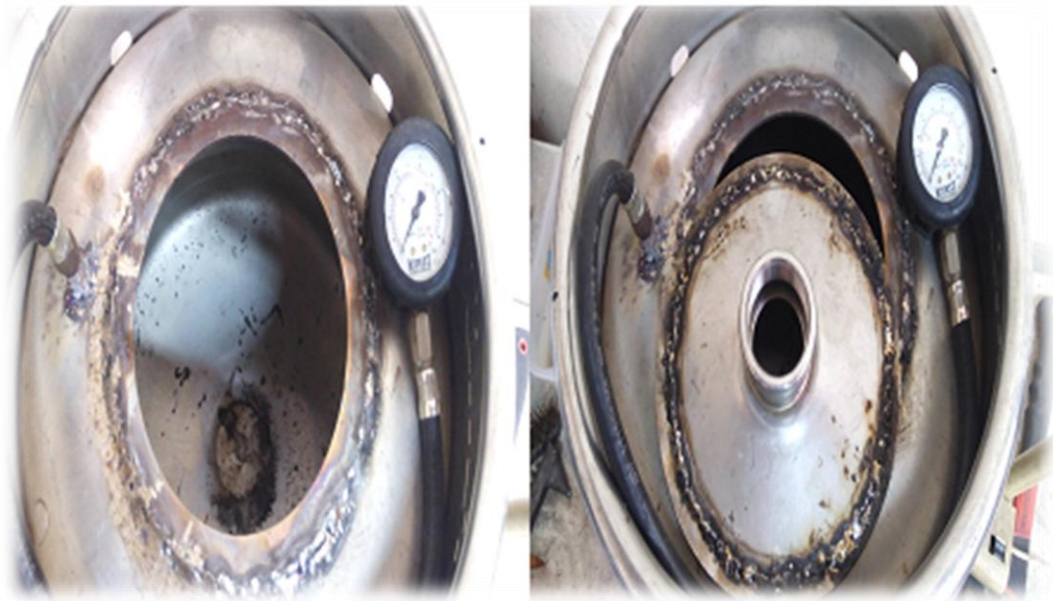
Item 15, cesto lateral de suporte do combustível alumínio, é encaixável em formato de tela destacável facilita o processo de colocação dos mais variados formatos de alumínio;

Item 16, resistência elétrica que permite o controle da reação por aquecimento da solução, foi utilizado com o objetivo de aumentar a velocidade inicial da reação em ensaios, com consequente aumento da produção;

Escolheu-se como base para o protótipo um barril de Chopp de 30L – Aço inox-316L, a partir deste recipiente foi montado todos os outros componentes da automação como pode ser observado na Figura 34. O vasilhame de aço inox-316L antes da instalação dos flanges para a vedação do mesmo.

Além da parte mecânica, no reator está embarcado motor elétrico em eixo parafuso e placas de controle que, por meio de algoritmo controlador no microcontrolador, permite um controle automático efetivo da reação por elevador que abaixa e eleva o combustível alumínio dentro da solução. Na Figura 34 tem-se os aspectos iniciais da solta dos flanges no tanque de inox.

Figura 34 - Soldagem dos flanges para a vedação do tanque de pressão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 35 vê-se os detalhes dos flanges utilizados e parte do processo de construção do reator também é apresentado um manômetro de pressão convencional por questão de segurança.

Figura 35 - Vasilhame de aço inox-316L de 30l em processo de fabricação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1 Automação do reator de hidrogênio

Neste sistema está previsto que o microcontrolador, mantenha a pressão do tanque em aproximadamente 40PSI de pressão para os primeiros ensaios, caso o gás H_2 seja utilizado o alumínio é imerso progressivamente dentro da solução. Caso o consumo seja menor que a produção a pressão subirá dentro do tanque, e assim o micro controlador perceberá por meio do sinal proveniente do sensor de pressão, e de forma autônoma retira progressivamente o alumínio da solução, até mesmo pode retirar o alumínio totalmente da solução, aguardando novamente a demanda de pressão, ou seja, que a pressão baixe.

Além disso, o sistema de controle está fixado ao tanque de pressão, prevendo, portanto, um sistema de backup para que o controle se preserve de uma eventual falta de energia com alimentação em 12Vdc - 7Ah fornecido de uma bateria estacionária selada.

Lista de partes componentes do reator inteligente:

- Sensor de nível baixo;
- Sensor de temperatura;
- Sensor de pressão;
- Indicador LED de nível baixo;

- Placa de controle de potência do motor 12V 8A;
- Sensor do nível de profundidade e altura na rosca sem fim;
- Circuito de redundância micro controlador e botoeira manual;
- Placa *Arduino* como micro controlador *Atmega328*;
- Sistema de backup de energia - 12Vcc – 7AH;
- Filtro de sílica na saída de hidrogênio - Secar e Filtrar o H_2 ;
- Medidor de vazão para gás em LPM após o filtro de sílica;
- O aspecto geral do protótipo completo apresenta-se na Figura 36.

A seguir tem-se a aparência final do reator, com toda a eletrônica embarcada e dispositivos citados acima na Figura 36.

Figura 36 - Aspecto do geral protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o avanço dos ensaios, foi necessário aprimoramento do reator como a produção de uma placa de circuito impresso para melhorar a confiabilidade do circuito e desenvolvimento da IHM da visualização digital do processo, assim como a indicação de temperatura e pressão no cristal líquido. A Figura 37 com a apresentação do aspecto final deste reator.

Figura 37 - Aspecto final deste protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor.

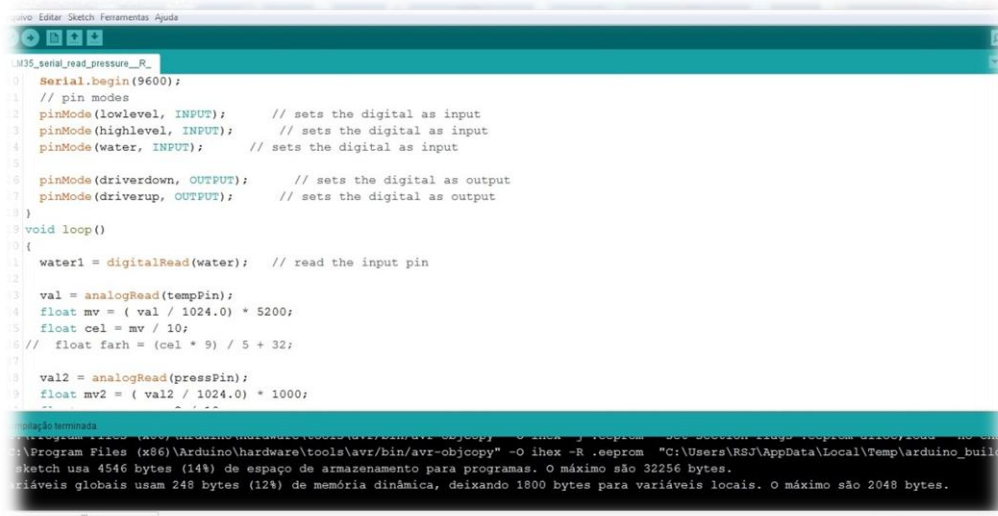
5.3.2 Circuito de controle do reator de hidrogênio

O Arduino[®] é uma plataforma aberta (*open-source*), de desenvolvimento de protótipos com microcontrolador Atmega328[®], este sistema computacional se baseia na flexibilidade, *hardware* e *softwares* interativos com programação em linguagem C++ estruturada (ARDUINO, 2016). Devido à facilidade de conseguir estes materiais no mercado brasileiro e a sua compatibilidade com as demandas de simulação e controle foi a tecnologia escolhida.

5.3.3 Programação algoritmo de controle

A programação do Arduino, que compõe o módulo do elevador é em linguagem C++, desenvolvida em código *open-source*, amplamente discutida pela comunidade de automação que desenvolve protótipos para esta plataforma, na Figura 38 apresenta o trecho do código no ambiente computacional Arduino 1.0[®] fornecido pelo desenvolvedor do kit Arduino UNO (ARDUINO, 2016). Segue, na Figura 38, demonstrando a o ambiente de programação da plataforma utilizada.

Figura 38 - Layout da janela de programação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra característica muito interessante desta plataforma de programação é a capacidade de gravar o módulo na mesma placa onde é executado, pois possui *bootloader*, chip que permite a gravação do programa na placa de utilização sem a necessidade de *hardware* externo, como um gravador de eeprom (ARDUINO, 2016).

O algoritmo desenvolvido permite monitorar os valores de temperatura e pressão do reator de hidrogênio. Para tanto, utilizou-se a princípio o monitor serial, apresentado na Figura 39. Percebe-se que os sinais dos sensores de pressão e temperatura estão sendo indicados remotamente, posteriormente utiliza-se a IHM com cristal líquido para o desenvolvimento do sistema definitivo.

O sistema de controle conta com um circuito de chaves permitindo o acionamento do elevador tanto de forma manual a qualquer tempo por interrupção do operador assim como pelo microcontrolador de forma automática, permitindo habilitar tanto um modo de operação como outro simultaneamente.

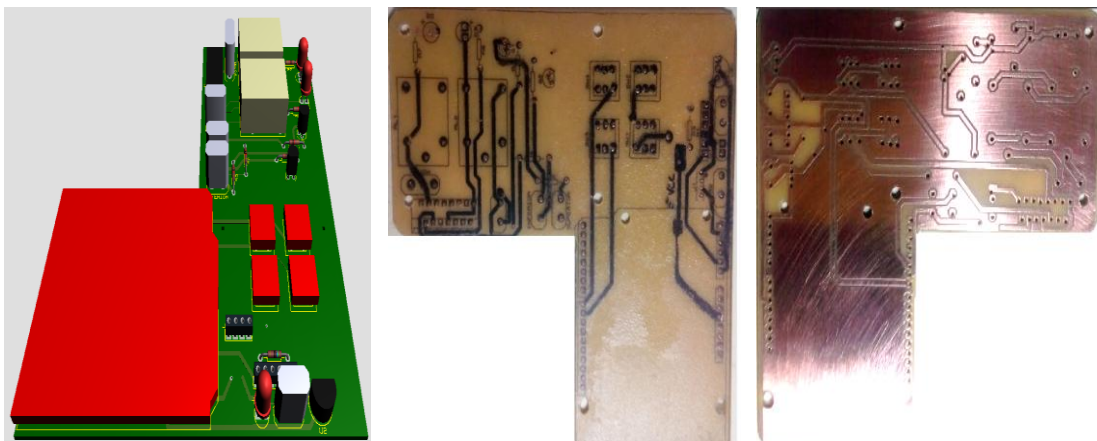
O circuito de controle conta com um driver de potência para acionamento de motor de vidro elétrico automotivo com torque suficiente para elevação de 10 kg de peso, utilizando o controlador L298N que permite o acionamento de motores de até 4A, que pode ser consultado no anexo B. Junto à ponte H tem-se um par de relés que permite a reversão do motor do elevador a qualquer tempo da operação.

Os transistores Q1 e Q2 funcionam como retentores de posição para o acionamento das chaves de fim de curso cortando ao sinal de habilitação da etapa de potência, ou seja, garantem que mesmo que haja um erro de processamento o motor seja desabilitado eletricamente de forma redundante para evitar esmagamento no fim de curso dos motores, determinado pelos sensores de posição ajustáveis.

O sensor de temperatura U2 – LM35 e o medidor de pressão M1 - Mpx5700, foram montados e acoplados ao reservatório e, portanto, foi conectado via cabo de multivias à placa principal de controle e microcontrolador onde maiores detalhes nos anexos C e A respectivamente.

As chaves SW7 e SW6 são especificamente as chaves de fim de curso superior e inferior monitoradas em tempo real pelo microcontrolador. Na Figura 41 apresenta-se o circuito impresso integrando a etapa de potência e o circuito microcontrolador.

Figura 41 - Placa de circuito eletrônico de controle do reator de hidrogênio

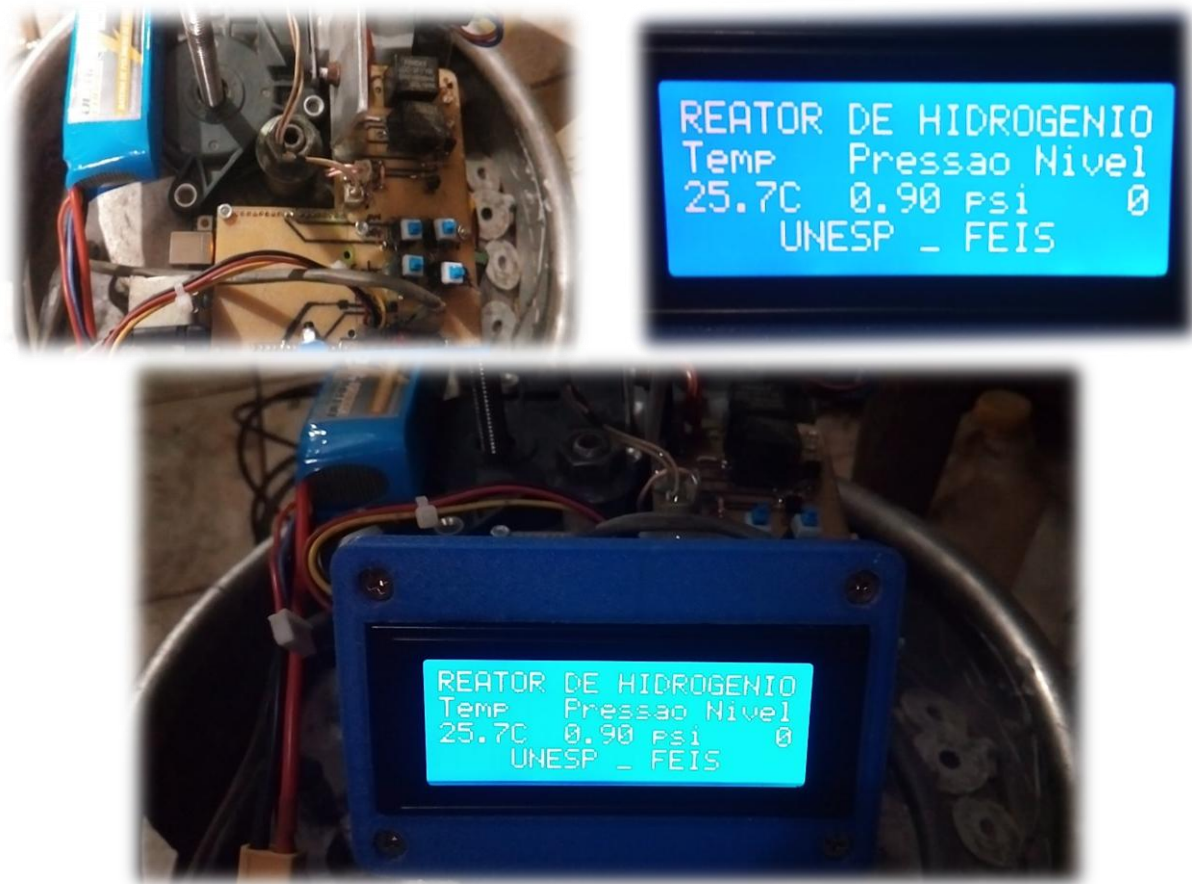


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.4 Algoritmo comentado

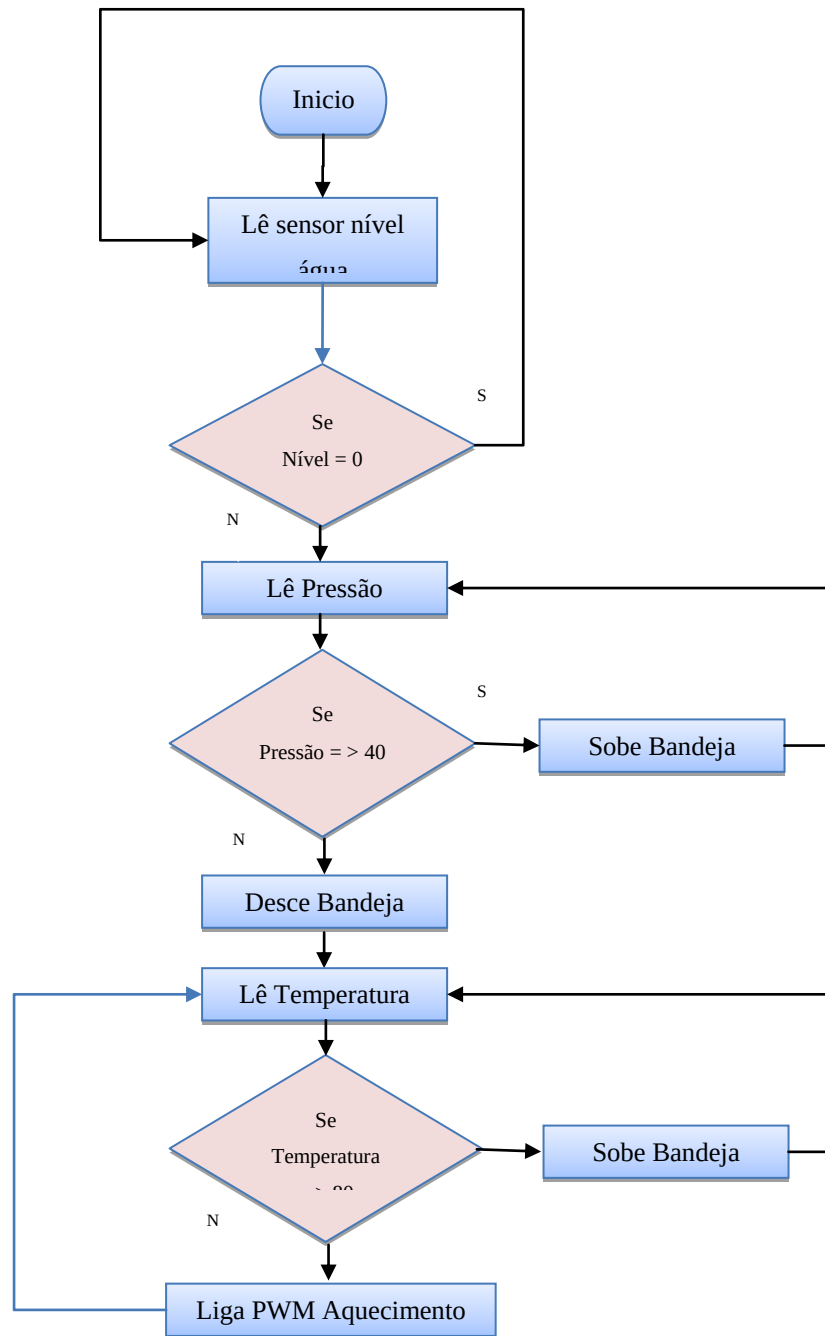
O algoritmo controlador verifica em tempo real a pressão, nível de fluido e a temperatura e toma decisões para manter o nível de produção estável. Figura 42 apresenta detalhes do protótipo.

Figura 42 - Sistema elevador e controle de pressão e display LCD



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente ao habilitar a função automática, caso o nível da solução estiver de adequado, e a temperatura abaixo de 80°C com a pressão do vaso baixa, o elevador desce até o fim de curso inferior, continua o monitoramento, assim que a pressão atinge o valor programado e o elevador sobe até o fim de curso superior e aguarda a pressão diminuir, para começar todo o processo novamente baixando o elevador e, portanto, o alumínio na cesta submerge na solução catalítica. Na Figura 43, apresenta-se o fluxograma lógico. No anexo D, verifica-se o algoritmo na íntegra.

Figura 43 - Fluxograma lógico de funcionamento do reator de imersão

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ensaios práticos com o motogerador, percebeu-se que o tempo da reação não é tão rápido ao ponto de precisar controlar pontos intermediários de posição do elevador sendo suficientes os mergulhos completos na solução, onde parte do líquido fica na superfície dos materiais expostos, este escoa e é consumido rapidamente. Reduzindo a reação em alguns minutos. O tempo de subida no protótipo é de aproximadamente 40 segundos e descida 35

segundos, tempos pequenos comparados com a parada total da produção onde a estabilização demora vários minutos para estabilizar e atingir a pressão de trabalho.

Caso haja a necessidade de implementação de um controle mais sofisticado o microcontrolador tem capacidade para um algoritmo muito maior como, por exemplo, biblioteca de lógica de controle fuzzy, se houver a necessidade de controle por meio de mais de um parâmetro no caso de decisões de acordo com a temperatura e pressão para este reator. A figura 44 apresenta demonstração da quantidade de chama de hidrogênio produzida.

Figura 44 - Fogareiro a 100% hidrogênio aquecendo a massa de 1kg de água 8 lpm H_2



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 ENSAIO COM MOTOGERADOR DE 6,5 KW OU 13HP E REATOR DE IMERSÃO MICROCONTROLADO

(Com 67 latas de alumínio picotadas 1kg em reator controlado por micro controlador, sistema de elevador do combustível alumínio na solução).

Com a conclusão deste novo reator foi possível o ensaio de longa duração, que permite a determinação de vários parâmetros como:

- Rendimento global desta forma de utilização;
- Custo real prático do kWh gerado neste tipo de aplicação;

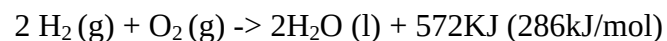
A Figura 45 apresenta o motogerador utilizado.

Figura 45 - Aspecto do motogerador utilizado de 6,5 kW



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Verificou-se uma taxa de consumo da ordem de 8 litros por minuto (lpm) do gás hidrogênio sob pressão de 10 libras/pol², para estabilizar e manter a geração de energia no motogerador de 6,5kW com meia carga, aproximadamente 3kW.
- Como foi utilizado aproximadamente 810g de alumínio e outras partes componentes da reação na relação estequiométrica que corresponde a 1268 dm³, com o consumo de aproximadamente 8 LPM tem-se 1268/8 resultando em 2,6hs de funcionamento.
- Consumo do motogerador a 50% da carga 1,75l/h de gasolina, O poder calorífico superior da de 1kg de gasolina é de 37,7MJ/kg como a densidade da gasolina é 0,73g/ml tem-se que 1 litro corresponde a 730 kg de gasolina, então 1,27 kg/h de gasolina em meia carga, ou 47,88 MJ/h (POWERMATE, 2016).
- A entalpia de combustão da reação do hidrogênio com o ar atmosférico é de - 286kJ/mol utiliza-se o calor latente superior, ou seja, hidrogênio tem 143MJ/kg.



Comparando-se com o consumo do motogerador em MJ/h, tem-se que são necessários 334g de H₂ para esta mesma quantidade de energia. Ou seja, para 47,88 MJ/h necessários ao funcionamento do motogerador a relação de gasolina e hidrogênio é de 1,27kg/h de gasolina ou 334g/h de hidrogênio para um motogerador de 6,5 kW em 50% de carga.

- Mas como a densidade da gasolina e do hidrogênio são diferentes, além de diferenças como calor latente, diferentes taxas de aumento de pressão em vaso fechado e velocidade de queima, eficiência de queima levando em consideração diferenças entre líquido e gás, obteve-se resultado diferente do teórico calculado apenas considerando as quantidades de energias envolvidas.
- A medida de comparação é em LPM – Litro por minuto tem-se que: $1,27\text{kg}/60\text{min} = 30\text{g}/\text{min}$ de Gasolina – Combustível original do motogerador. Em hidrogênio de $334\text{g}/60 = 5,5\text{g}/\text{min}$ numa relação de 1:3. Considerando a densidade do hidrogênio de $89,9\text{ g/m}^3$, $5,5\text{g}/\text{min}$ ou seja $0,061\text{m}^3\text{ H}_2/\text{min}$.

5.5 ENSAIO COM MOTOGERADOR DE 3 KW E 6,5HP E APRIMORAMENTOS EM ESTABILIDADE E TEMPO DE PRODUÇÃO

(Solução de 15 litros em solução alcalina contato por imersão)

A figura 46 demonstra a montagem do sistema com o motogerador adaptado ao hidrogênio. Sendo o motogerador de hidrogênio com comando microcontrolado, com o filtro secador, medidor de vazão e o motogerador com um bico injetor para a admissão do hidrogênio e ajustes nas válvulas de admissão para a correção da mistura para a razão correta do hidrogênio com o ar atmosférico.

Figura 46 - Sistema de imersão alimentando motogerador de 3KW



Fonte: Elaborado pelo autor.

A maior taxa de produção de hidrogênio alcançada com este motogerador foi com material particulado. Começando o borbulhamento logo em seguida à submersão, Figura 47.

Figura 47 - Apresenta a inserção de folhas de alumínio em cesto móvel.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizaram-se vários ensaios com esta montagem, utilizando-se diferentes materiais para a tipificação em relação aos materiais possíveis provenientes de reciclagem, utilizadas bolas de papel alumínio, alumínio mais grosso proveniente de marmitas, depois utilizaram-se latas de refrigerantes e cervejas de todos os tipos, a padronização foi a utilização de um prensador de latas manual, ficando todas uniformes, foram feitos ensaios com latas desvernizadas e com o verniz característicos e teve-se resultados surpreendentes, pois verificou-se que os vernizes e tintas retardam o início da reação em alguns poucos minutos, mas uma vez que esta reação se estabelece não interfere mais nos demais parâmetros de produção ou com a curva de produção de hidrogênio, utilizados os mais diversos tipos de alumínio como pedaços de blocos de motor e pistões assim como perfis de alumínio de construção, à janelas e utensílios de cozinha, e para comparação final utilizou-se um bloco maciço de alumínio de 6 kg. Têm se um resumo dos resultados na Quadro 2:

Quadro 2 - Tipos diferentes de materiais e descrição.

Tipo de material	Descrição de detalhes observados durante a produção
Papel alumínio	A reação começa rapidamente ao contato com a solução já pré aquecida, dissolve-se completamente e tempo de reação curto dependente da quantidade de material.
Latas	Existe um tempo de 1 a 3 minutos para o começo da reação, mas ao longo da produção teve-se uma estabilização na produção que vai até o fim do material. Grande produção. Grande velocidade de reação.
Peças sucata	Geralmente contaminadas com óleo, mas que é resolvido pela solução de hidróxido de sódio, onde a reação se torna forte em 1 minuto. Produção estável e dependente da quantidade de material e velocidade da reação dependente da área de superfície em contato com a solução.
Perfis de alumínio	Similar às sucatas mas podem estar contaminados com cimento ou materiais de construção não sendo relevantes, com a velocidade da reação dependente da área de superfície de contato com a solução .
Bloco maciço	O bloco mantém a produção inicial estável por toda a reação mas, observa-se uma velocidade de reação muito menor que os materiais particulados pois a área de contato é menor devido à superfície regular.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o rendimento realmente depende do material a ser processado como objetivo deste estudo é a reciclagem de lixo metálico atingiu-se o objetivo com um reator automatizado que permite controlar a produção automaticamente por meio de sensoriamento da reação não dependendo do tipo de material, caso esteja-se processando um material com velocidade de reação inferior ao solicitado em linha é possível aumentar a temperatura da solução, por meio de uma resistência dentro da solução e assim acelerar a produção, como no ambiente confinado de produção não existe oxidante, oficialmente não há limite para a pressão, estabelecendo-se uma critério de pressão (baixa pressão NR-13). Figura 48.

Figura 48 - Bloco de alumínio e o sistema fechado em produção de Hidrogênio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

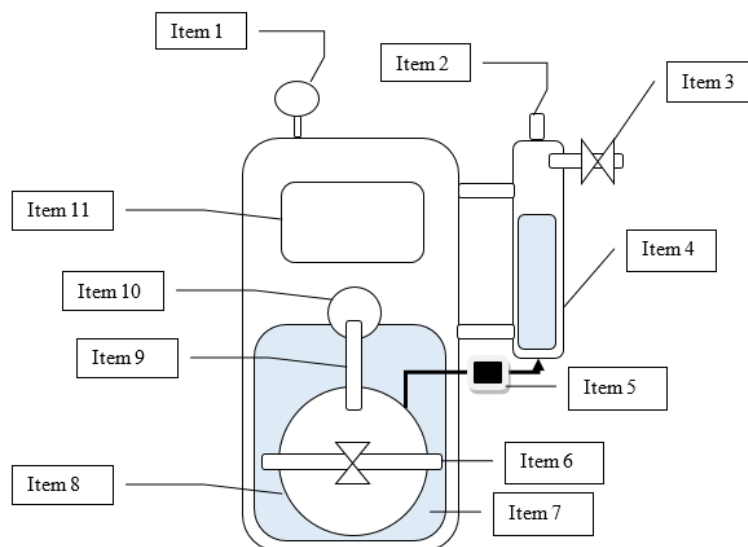
Percebeu-se com os diversos ensaios com este reator que a área de armazenamento em linha dentro do reator comporta apenas 15 litros de hidrogênio, sendo bastante sensível às variações relacionadas à velocidade de reação e chegando ao limite da capacidade deste tanque quanto à temperatura e pressão, desta forma propôs-se um reator com uma capacidade de produção e armazenamento maior.

5.6 ENSAIO COM MOTOGERADOR DE HIDROGÊNIO DE 80 LITROS, MÉTODO DE SOLUÇÃO À SECO

(Solução alcalina seca, reação por gotejamento)

A Figura 49 representa a forma do vaso principal do segundo reator desenvolvido com a técnica de reação à seco onde o metal e o catalizador do processo iniciam a reação por gotejamento de água pura. A mistura dos componentes da reação ocorre no gotejamento com a vantagem de a água atingir temperatura exotérmica rapidamente em função de seu baixo volume, o controle do fluxo de gotejamento e consequente velocidade de reação ocorre por controle via válvula elétrica controlada por um microcontrolador e algoritmos desenvolvidos especificamente para o gerenciamento e monitoramento dos sensores da reação, controla-se a pressão do vaso.

Figura 49 - Detalhamento do reator seco de 80 litros



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Item 1 representa o manômetro de pressão do vaso de pressão, o que corresponde também, à pressão de linha de trabalho deste vaso de pressão.

O Item 2 representa a válvula de segurança e alívio de pressão programado, sendo um sistema mecânico simples com mola comprimindo o eixo com final em agulha, que fecha um orifício, assim o mesmo é mantido fechado pela pressão de uma mola, quando pressão interna do motogerador tem força para empurrar a mola o excesso é expelido.

O Item 3 representa a válvula de controle de abertura da tubulação de saída que alimenta a linha que alimenta o motogerador elétrico.

O Item 4 representa o borbulhador, que é parcialmente preenchido com água assim absorve a umidade da reação e elimina a possibilidade de arrasto de solução alcalina para a tubulação de saída, serve também para o resfriamento do gás H_2 na saída.

O Item 5 representa uma válvula de fluxo unidirecional, não permitindo que a água do reservatório borbulhador retorne para a câmara de reação em nenhum momento.

O Item 6 representa o sistema de travamento da tampa da câmara de reação composto por barra horizontal com parafuso rosqueado que comprime a tampa da câmara de reação vedando-a, onde ocorre a reação exotérmica com o hidrogênio.

O Item 7 representa a água que participa da reação, fica em torno da câmara de reação, mas em ambiente separado, esta água precisa passar pelo tubo de gotejamento para atingir a câmara de reação.

O Item 8 representa tampa da câmara de reação, esta tampa tem um anel de borracha bem afixado em sua borda para o fechamento hermético da câmara de reação tem parede grossa em torno de 10mm de espessura para a perfeita vedação desta câmara.

O Item 9 representa o alimentador do tubo de gotejamento que leva a água da reação ao interior da câmara de reação, proveniente da válvula de controle do gotejamento.

O Item 10 representa a manopla de controle do gotejamento no sentido horário fecha o gotejamento no sentido anti-horário abre o gotejamento para a ocorrência da reação, este item está em duplicidade com válvula de controle automatizada sendo a mesma controlada via microcontrolador, mas que em situação de emergência permite a intervenção de um operador.

O Item 11 representa o painel de controle onde está inserido o microcontrolador e um visor do tipo LCD, funcionando como IHM mostrando o passo do processo e correspondente capacidade de interação, verificação de valores de pressão e temperatura a taxa de produção de H_2 , expectativa de demanda e tempo de operação da produção.

A Figura 50 apresenta a bandeja de reação do reator de 80 litros onde estão posicionadas 30 latas e 200ml de NaOH, antes da reação.

Figura 50 - Bandeja de reação do reator de 80litros em estado inicial



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 51, apresenta-se o final da reação, onde o alumínio já foi completamente consumido restando o verniz das latas flutuando em solução, a cor cinza representa a reação intermediária em processo de decantação, formará alumina ao fundo e água ficará translúcida, caso seja filtrada por processo simples retirando-se o verniz flutuante, esta solução passa e ter somente o NaOH que por sua vez pode ser extraído pela evaporação da água e retornada ao próximo processo (F. M. N, 2012).

Figura 51 - Bandeja de reação do reator de 80 litros em estado final com todo o material consumido pela reação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 52 tem-se o aspecto final da reação com a alumina depositada ao fundo da bandeja da reação.

Figura 52 - Bandeja de reação do reator de 80litros aspecto final da alumina



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 53 tem-se o motogerador de 80 litros com uma demonstração de chama em maçarico do hidrogênio produzido no mesmo, é interessante este uso do hidrogênio também, onde foi feita a mistura com O_2 na ponta do maçarico e obteve-se a dupla chama azul permitindo escolha da temperatura da chama no caso de utilização para solda de chapas finas, as vantagens são imensas, não polui não tem cheiro forte do acetileno e não tem carbono para contaminar tanto o cordão de solda como entupir o bico do maçarico com a fuligem característica do acetileno.

Figura 53 - Reator de hidrogenio 80 litros e chamas de teste



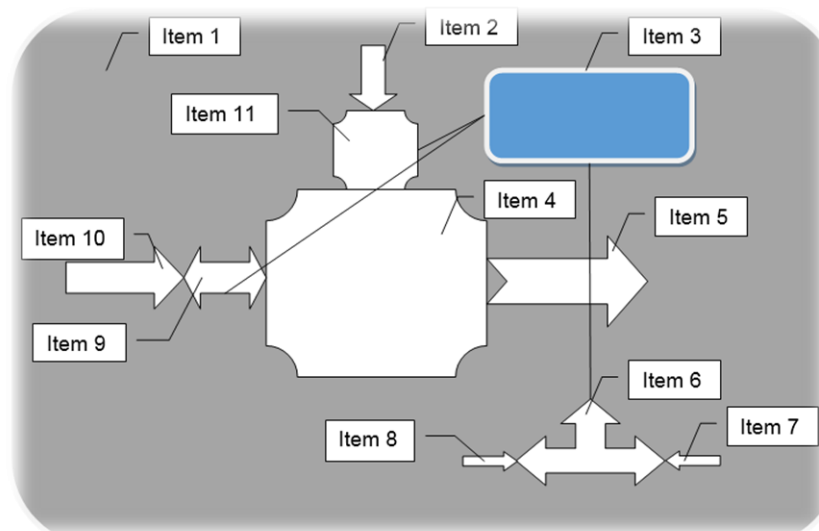
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a automatização deste reator e um fluxo maior de hidrogênio verificou-se a variação da densidade do combustível de acordo com a pressão de linha, estabelecendo uma pressão de aproximadamente 40PSI, obteve-se a variação no consumo medido no fluxômetro do hidrogênio na entrada do motogerador, percebeu-se que com a pressão maior o motogerador estabilizou-se em 8 lpm, mas ao longo da produção, quando esta não consegue mais manter a estabilidade caindo a pressão verificou-se a necessidade de aumentar o fluxo de H_2 para compensar a perda de pressão, desta forma tornou-se relevante um controle de fluxo na entrada do motogerador para a correção, pela eventualidade de uma variação da taxa de produção (VARDE, 1985).

5.7 RELAÇÃO DE POTÊNCIA EM MOTOGERADOR AUTOMATIZADO QUANTO AO FLUXO DE HIDROGÊNIO

Na Figura 54 teve-se um diagrama de funcionamento do módulo de controle de fluxo de hidrogênio para a estabilização do fluxo de combustível para amenizar as variações de demanda em função da perda de produção residual em função da reação e também correções ajustadas em função da variação da carga no eixo do motogerador.

Figura 54 - Diagrama de funcionamento do módulo de controle de fluxo na entrada do motogerador de energia funcionado com hidrogênio à 100%



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Item 1 representa um motogerador de energia convencional com motor e motogerador acoplados de uso convencional em sistema de combustão Otto.

O Item 2 representa a entrada de ar que provém de um filtro de ar convencional do motogerador.

O Item 3 representa o microcontrolador e algoritmo de controle com respectivo IHM – Monitoramento e interface de comunicação homem máquina, este sistema é incorporado ao motogerador para o gerenciamento da mistura Ar X Combustível e conseqüentemente o controle de eficiência do motogerador.

O Item 4 representa o novo carburador que tem o seu funcionamento convertido para o trabalho com o gás Hidrogênio.

O Item 5 representa a mistura ar combustível que adentra à câmara de explosão do motogerador.

O Item 6 representa o barramento de comunicação entre os sensores e o sistema de microcontrole.

O Item 7 representa o sensor de RPM ou rotação por minuto, variações da rotação do eixo do motogerador são sentidos em tempo real e o algoritmo desenvolvido atua na válvula de controle de fluxo de hidrogênio ou nas válvulas de admissão de ar atmosférico.

O Item 8 representa o sensor de nível de tensão de saída, variações da tensão de saída combinadas com valores de variação do eixo do motogerador permitem tomadas de decisão mais apropriadas pelo algoritmo de controle do carburador de hidrogênio desenvolvido neste pedido.

O Item 9 representa a válvula de injeção de hidrogênio na câmara de mistura do novo carburador do motogerador controlada totalmente pelo sistema microcontrolado.

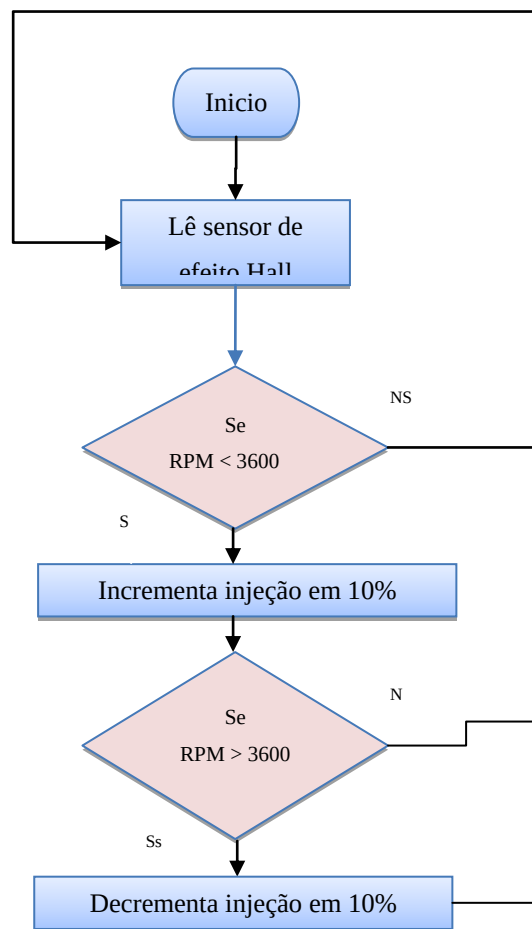
O Item 10 representa a linha de hidrogênio pressurizado em função dos sistemas de controle independentes dos motogeradores 1 ou 2 apresentados anteriormente no presente pedido.

O Item 11 representam as válvulas de controle fino da razão estequiométrica da proporção de oxigênio x combustível ideal para cada faixa de potência desenvolvida pelo motogerador em consonância com o regime de carga aplicada ao consumo de energia produzida pelo motogerador (VARDE, 1985).

5.8 LÓGICA DE CONTROLE DO MOTOGERADOR EM RELAÇÃO À LINHA DE PRODUÇÃO RELACÃO DE POTÊNCIA X RPM

Durante a produção de hidrogênio pelo reator obteve-se variações na taxa de produção e também variação da quantidade de hidrogênio consumido de acordo com a carga aplicada no eixo do motogerador, para resolver este problema utilizou-se lógica de controle, Figura 55.

Figura 55 - Fluxograma lógico de funcionamento do sensor de efeito Hall.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 56 apresenta o fluxo medido de consumo do motogerador alimentando uma carga de 1kW, o injetor entrada de gás hidrogênio diretamente no carburador do motogerador de energia. Inicialmente utilizou-se apenas o controle proporcional integral para o controle da geração e de graus de incremento de potência deste ajuste torna-se importante devido à variação de pressão no fornecimento do hidrogênio pela linha de alimentação e também devido à concentração de hidrogênio gasoso ser proporcional à pressão do vaso motogerador

(GOVIND, 2012).

Dos combustíveis testados neste motogerador o hidrogênio difere, pois tem a velocidade de detonação mais rápida e sensível à variação de torque no eixo do motogerador com a mudança dos estepes de geração é necessário ajustar o bico injetor assim como o combustível pelo carburador, em todas as experiências utilizou-se o carburador apenas para o controle do ar atmosférico e o controle do gás pelo sistema de injeção, a parte do carburador que controle a injeção de combustível líquido não funciona corretamente para o controle do hidrogênio.

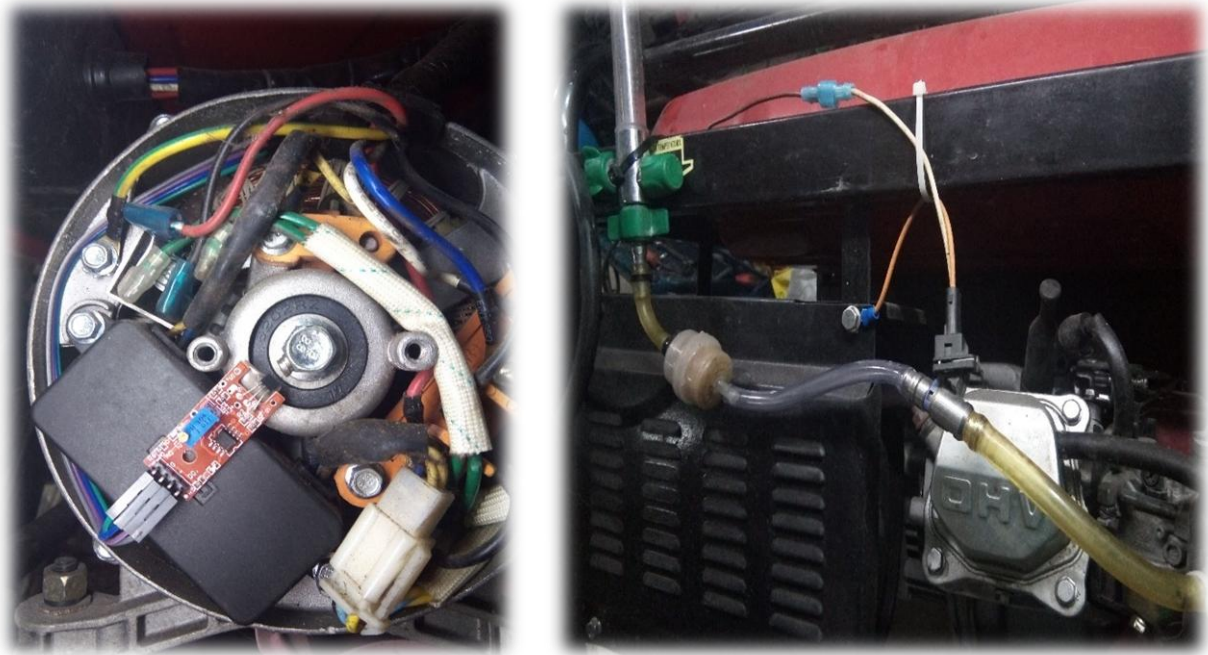
Figura 56 - Fluxo medido estavel para 1KW, injetor desenvolvido para a entrada de hidrogênio a 100% eversão já instalada junto ao carburador original



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 57 apresenta o sensor de efeito *Hall* utilizado para a medida de velocidade do eixo do motogerador e o bico injetor utilizado com abertura por modulação PWM.

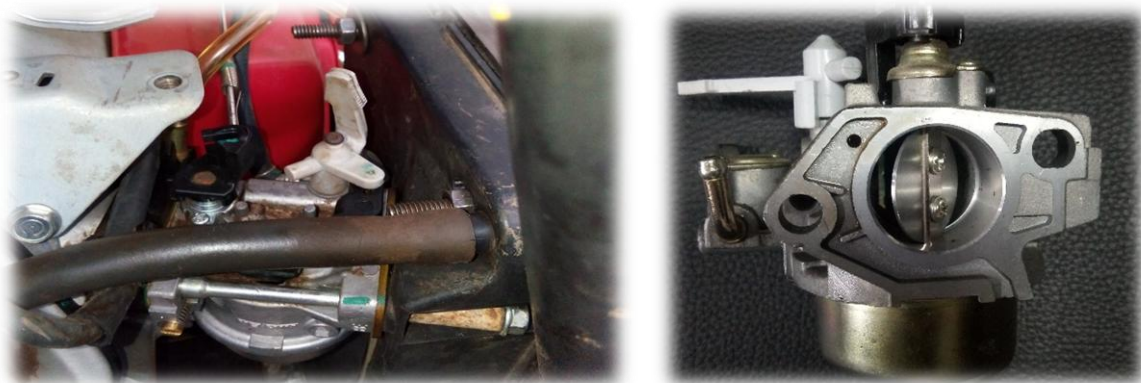
Figura 57 - Sensor de efeito *hall* no eixo do motogerador e bico injetor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 58 tem-se um carburador de motogerador a gasolina, portanto ao controle PI mecânico do eixo do motogerador em relação ao fluxo de ar ficou controlado pelo sistema original do motogerador. Apenas a injeção de Gás Hidrogênio pelo bico injetor para o ajuste PI Microcontrolado para o gerenciamento de consumo do motogerador de acordo com a solicitação da carga.

Figura 58 - Carburador do motogerador



Fonte: Elaborado pelo autor.

O carburador original à gasolina, tem uma porta de controle do ar frontal para o momento de partida onde deve estar fechada chamada de “lenta”, quando entra em funcionamento esta é aberta e com o aumento do fluxo é levado ao funcionamento em plena carga, no caso dos ensaios com o hidrogênio, foi encontrado um ponto ideal de abertura desta

válvula que passou a permanecer fixa tanto para a partida como para o regime de trabalho. Quanto à segunda válvula a posterior permanece inalterada sendo controlada mecanicamente pelo eixo de torção a ele conectada e demais ajustes de posição para ajuste fixo por potência de geração e riqueza da mistura ar combustível, o hidrogênio é adicionado imediatamente após esta válvula por meio de um dispersor, favorecendo a miscigenação combustível e comburente.

Na Figura 59 Apresenta-se o orifício por onde sai o hidrogênio após a válvula de ajuste de mistura por controle PI mecânico.

Figura 59 - Carburador e orifícios de saída do hidrogênio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após os ajustes iniciais com o motogerador, o ajuste de injeção de combustível passou totalmente ao bico injetor externo controlando o fluxo de hidrogênio conforme a demanda do motogerador.

No anexo E apresenta o código de controle do circuito montado para o controle PWM do bico injetor, baseado nas leituras do eixo do motogerador como exibido no algoritmo de controle. Na Figura 60 tem-se o circuito de controle com o Arduino para o controle do bico injetor de hidrogênio no motogerador.

Figura 60 - Circuito de controle do injetor de hidrogênio

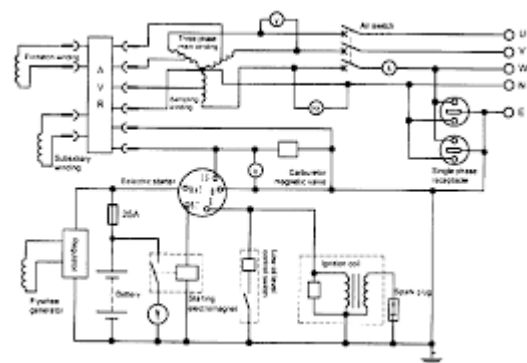


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.9 - Conclusões deste estudo quanto ao desempenho do motogerador gasolina adaptado para o uso com hidrogênio direto e ajustes de desempenho relacionados à densidade do combustível.

Mantendo o motogerador em funcionamento nominal com 3600rpm no eixo, o controle de tensão é mantido pelo motogerador e sistema de controle do próprio motogerador, o que se utilizou para os ensaios apresentados possui o controle via circuito do AVR como na Figura 61.

Figura 61 - Circuito AVR.

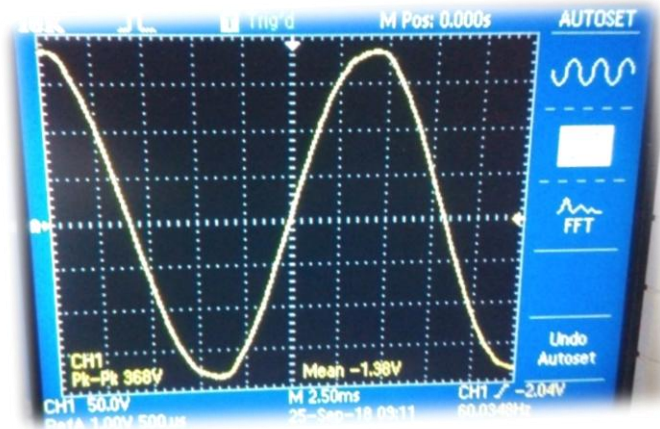


Fonte: (NAGANO, 2019).

O circuito da Figura 62 é o circuito do motogerador completo, à esquerda acima vê-se resistências ligadas ao AVR que são acionadas quando necessário ao controle de tensão.

Com o auxílio de osciloscópio, verificou-se os sinais de saída do motogerador utilizando uma carga resistiva de 1000W, obteve-se uma onda senoidal dentro dos parâmetros adequados para o uso de qualquer equipamento convencional como na Figura 62.

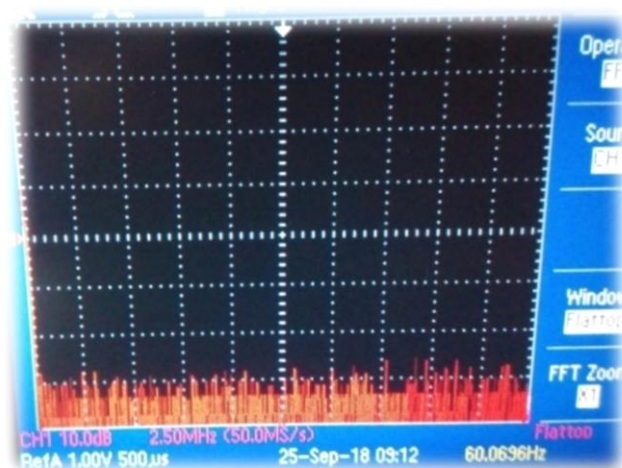
Figura 62 - Sinal senoidal de saída do motogerador carga de 1000W



Fonte: Elaborado pelo autor.

Complementando o estudo da tensão de saída tem-se o sinal FFT em 10dB em 60.0696Hz, verificou-se a tensão correta e frequência sem a presença de harmônicos significativos, uma vez que as tensões provem de motogerador com entreferro e rotor do tipo capacitivo não possuindo escovas, sendo uma vantagem em relação a inversores de frequência, Figura 63.

Figura 63 - Sinal senoidal de Saída do motogerador, harmônicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.10 CONCLUSÕES FINAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS

- Como a reação química é fortemente exotérmica pode ser incorporado um trocador de calor para utilização como fonte térmica, para aquecimento de água para outros fins, e ao mesmo tempo controlar a temperatura máxima de funcionamento.
- Ensaio de diferentes fontes de alumínio como recortes e frisos ou blocos de motor, ou até mesmo alumínio fundido, podem ser picotados e quanto menor a granulação mais rápida a taxa cinética da reação cujo limite teórico é de $2 \times 10^{-4} \text{g H}_{2/\text{g de Al}}$ (DOE, 2008).
- Com os resultados obtidos no ensaio, poder-se-á estimar melhor a viabilidade e aplicabilidade de instalações em escala social. Uma vez que é preciso dar uma melhor destinação a embalagens e sucatas de alumínio.
- A grande vantagem do processo é a utilização de um combustível renovável de alta energia, a mais alta energia possível e a baixo custo, mesmo em métodos experimentais tem um custo razoavelmente baixo, caso a utilização em larga escala, estes custos serão menores.
- Uma alta produção de hidrogênio sob demanda pode ser ajustada a qualquer motogerador seja por método de batelada ou de forma contínua o processo se mostrou estável o suficiente para a sua utilização quando bem dimensionada em motores de explosão com modificação mínima.
- A quantidade de energia produzida depende exclusivamente das proporções do reservatório e motogerador podendo ser dimensionadas para qualquer porte não tendo fator limitante, como no caso de materiais raros encontrados em estudos de ligas especiais de alumínio.
- O alumínio vem da bauxita que é extensamente abundante, com jazidas da ordem de 2,500,000 mil toneladas só no Brasil e com produção anual de 1,604 milhão toneladas de alumínio primário (ABAL, 2015).

- A reciclagem com produção de energia do alumínio, queima etapas do processo de purificação do alumínio que não é destinado à fundição.
- Pode ser uma alternativa ao diesel em máquinas de grande porte que necessitam de combustível de alta energia, pois o consumo é muito grande. Por exemplo, o álcool, produto renovável, não é capaz de viabilizar a substituição do diesel por não ter uma densidade de energia suficiente.

6 CONCLUSÃO FINAL E SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Nos ensaios deste estudo com o desenvolvimento do reator de 30L automatizado foi possível produzir o gás H_2 suficiente para o acionamento de motogerador de 3kW e posteriormente de 6kW. Conseguindo-se atingir a escala proposta no seguinte trabalho, verificamos durante os ensaios não haver limitações para a escalabilidade desta tecnologia quanto ao aumento de produção, bastando apenas o dimensionamento adequado à cada motogerador e regime de operação, uma vez que todos os materiais utilizados para a reação e a construção dos sistemas são abundantes e disponíveis.

A principal contribuição deste estudo é um reator automatizado de baixo custo e baixa complexidade, permitindo segurança no processo de geração e, mais facilidade de uso e aplicação junto a comunidades de catadores de lixo ou cooperativas ou cogeração, ou até mesmo o uso em motogerador de baixo custo como sistema de *Backup*, sem necessidade de mudança no projeto do motor. A possibilidade da produção de gás localmente, principalmente com o combustível reciclável, onde não há emissão de gases de efeito estufa, deve ser ampliada e discutida como alternativa ao alto custo das tecnologias renováveis, como painéis solares, grandes instalações eólicas e solares, destacando-se o ciclo de geração em 24hs.

Destacando a possibilidade de cogeração, convertendo alumínio em energia elétrica em usinas térmicas, em empresas de reciclagem para o uso direto inclusive no lugar do gás natural, ou miscigenando-se com outros gases já utilizados em térmicas para o enriquecimento sobre demanda do GLP ou GNV, aumentando o seu poder calorífico a ser levantado em estudos futuros o aumento da taxa de detonação destes gases tornado possível aumento do rendimento nestes casos.

Em visita a empresa de reciclagem no estado de Mato Grosso, na capital Cuiabá, verificou-se o recolhimento de materiais de alumínio de difícil destinação ou comercialização, de pouco interesse financeiro como escória de motores, blocos de motores onde a composição e miscelânea de outros materiais agregados ao alumínio, inviabiliza a comercialização para a destinação de material puro, Sendo necessária a separação do material por tipo de liga, além disso encontra-se contaminado com anéis, bielas, parafusos de ferro ou aço de diferentes origens e outros agregados indefinidos, incorporados ao alumínio, materiais de difícil separação, pois é preciso cortar estes blocos em pedaços para a remoção detalhada com policorte ou serra fita, estes blocos tem preço de mercado menor que o alumínio de latas três

reais (R\$ 3,00) por quilo, e peças automotivas, um real (R\$ 1,00) por quilo, para grandes empresas de beneficiamento de alumínio em toneladas (MEDINA, 2006).

A vantagem deste método alcalino é que todas as ligas podem ser utilizadas no processo aqui exposto, o alumínio é consumido pela reação e outros materiais como ferro, latão, etc.... são separados pelo processo, pois não reagem à reação alcalina, separando com mais facilidade do que os métodos atuais, sendo basicamente separados por corte e quebra das peças, foi levantada a possibilidade de uma nova rota de produção onde a recicladora de metais retorna o material já processado em alumina, agregando e criando novo produto (2 PORCIÚNCULA, 2010).

Este método pode originar o desenvolvimento de tecnologias de aplicações práticas em substituição ao combustível fóssil por combustível reciclado de grande abundância em sistemas de energia, com a possibilidade uso embarcado em veículos à célula de combustível, como exemplo, por meio de cartuchos com alumínio retornável, onde resta valor comercial, a ser trocado em postos de trocas, por “cartuchos carregados” em estado metálico por empresas interessadas no desenvolvimento desta tecnologia, e oferta deste serviço, assim como é feito com as baterias chumbo ácidas (MOREIRA, 2012).

A possibilidade de utilização do processo em substituição ao diesel em equipamentos de grande porte, como caminhões, onde a relação da quantidade de combustível versus volume é muito relevante considerando que o gás hidrogênio é 2,5 vezes mais energético do que o hidrocarboneto citado e o alumínio ocupa um volume menor que o diesel, possibilidade ainda inédita e não atingida por outros combustíveis de fonte renovável (ALMEIDA, 2012).

Tratado como commodity, uma quantidade de alumínio pode ser pertencente a um proprietário que o recicla em ciclos de utilização, adicionando-se as perdas de conversão de alumínio em alumina e alumina em alumínio sendo convertido infinitamente, bastando para isso apenas energia para a reação de eletrólise ígnea no processo de Hall-Héroult.

Existe a possibilidade de trabalhos futuros para a configuração da reação alcalina x alumínio com o objetivo da geração de hidrogênio em velocidade extrema, violenta, possibilitando a produção do H_2 durante o voo de mísseis e ou veículos lançadores de satélites ou até mesmo no espaço uma vez que os combustíveis podem ser armazenados em estado sólido e em grande quantidade e baixo peso, sendo produzidos sob demanda de acordo com os estágios de lançamento ou em viagens espaciais.

Estudos complementares e futuros, são necessários quanto à estabilidade do processo e rendimento em testes de ultralonga duração para a verificação do desgaste das peças no final da vida útil do gerador, a expectativa é que esta vida útil seja alongada uma vez que não temos a produção de fuligem e não há acúmulo de resíduos dentro do motor de explosão, mas pode haver um desgaste maior devido à detonação mais acentuada do hidrogênio, forçando bielas e anéis de vedação, uma alternativa caso isso se comprove é apresentada pelo sistema GEET de Paul Pantone adaptado para o uso com hidrogênio (PAUL, 2019), com a mistura dos gases da exaustão com o hidrogênio para a diluição na razão de 2,5:1 para a redução da velocidade da reação e calor específico emulando a gasolina do projeto original no motor, estudos de vida útil deste motor em comparação com o projeto original do mesmo citado também em (MEYER, 1994).

REFERÊNCIAS

- ALEX, T. C.; KUMAR, R.; ROY, S. K.; MEHROTRA, S. P. Anomalous reduction in surface area during mechanical activation of boehmite synthesized by thermal decomposition of gibbsite. **Powder technology**, Lausanne, v. 208, n. 1, p. 128–136, 2011.
- ALMEIDA, A. T. **Hidrogênio como Combustível**. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005.
- ALMEIDA, V. T. P. **Simulação computacional de emissões e desempenho de um motor diesel operando com óleo diesel e hidrogênio**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- AMIRI, A.; BEKKER, A. V.; INGRAM, G. D.; LIVK, I.; MAYNARD, N. E. A 1-D non-isothermal dynamic model for the thermal decomposition of a gibbsite particle. **Chemical Engineering Research and Design**, Amsterdam, v. 91, n. 3, p. 485–496, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. *Site*. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.abal.org.br/estatisticas/nacionais/reciclagem/latas-de-aluminio/>. Acesso em: 21 dez. 2015.
- AZOM. **Alumina (Aluminum Oxide)**: the different types of commercially available grades. the a to z of materials. [S. l.], 2007.
- ARDUINO. Bootloader Development. **Software burned onto the chips that come with your Arduino boards**. [S. l.], 2016. Disponível em: <http://arduino.cc/en/Main/Bootloader>. Acesso em: 07 jul. 2016.
- BARROS, L. F. **Densidade do combustível**. Aracruz: Aracruz Celulose, 2003.
- BARROSO DE CASTRO, J. B.; MONTINI, A. A. Análise comparativa de modelos de previsão: aplicação do model confidence set para preços de alumínio. **Revista ADM. MADE**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, p. 68-86, 2013. Disponível em: <http://revistadireitobh.estacio.br/index.php/admmade/article/view/511>. Acesso em 05 ago. 2013.
- BASTOS, V. D. **Etanol, álcoolquímica e biorrefinarias**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2007.
- BRASIL alumínio. **Processo de redução da alumina de produção de alumínio**. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://brasilaluminio.com.br/pt/processos.php?id=1> Acesso em: 20 jul. 2017.
- CABRAL, M. **Hidrogênio é o futuro**. São Paulo: Galileu, 2017. <http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI112846-17774,00-HIDROGENIO+E+O+FUTURO.html>. Acesso em: 20 jul. 2017.
- CARDOSO, J. G. R. *et al.* **A indústria do alumínio: estrutura e tendências**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2499>: Acesso em: 21 ago. 2017.

CAVENDISH, H. **The scientific papers of the honorable Henry Cavendish**. Cambridge: Cambridge University, 2011. v. 2.

CHOI, G.; ZIEBARTH, J. T.; WOODALL, J. M.; KRAMER, R.; SHERMAN, D.; ALLEN, C. R. **Mechanism of hydrogen generation via water reaction with aluminum alloys**. In: BIENNIAL UNIVERSITY/GOVERNMENT/INDUSTRY MICRO/NANO SYMPOSIUM, 18th., 2010, West Lafayette. Proceedings [...] [S. l.: s. n.], 2010. p. 1-4. Acesso em: 16 out. 2017.

CLARK, W. W.; RIFKIN, J. A green hydrogen economy. **Energy Policy**, Guildford, v. 34, n. 17, p. 2630-2639, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421505001722>. Acesso em: 21 out. 2018.

DAS, B. R. *et al.* Production of η -alumina from waste aluminum dross. **Minerals engineering**, Oxford, v. 20, n. 3, p. 252-258, 2007.

DE SOUZA, R. G. **Desempenho do conjunto motogerador adaptado a biogás**. 2006. 40 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/3572>. Acesso em: 21 out. 2018.

EMERSON. **Processo de produção de alumina**. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://www2.emersonprocess.com/pt-br/brands/rosemount/level/solids-measurement/3d-solids-scanners/industries/metals-industries/alumina-production/pages/index.aspx>. Acesso em: 20 jul. 2017.

FERNANDES, B. S. **Produção de hidrogênio em reator anaeróbico de leito fixo**. 2008. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

FERNANDES, E.; GUIMARÃES, B. A.; GLÓRIA, A. M. S. **O setor de soda-cloro no Brasil e no mundo**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2009.

FERREIRA, P. F. *et al.* **Produção de hidrogênio utilizando energia vertida turbinável de Itaipu**: cálculo de custos e comparação com o gás natural na cidade de São Paulo. Disponível em: <http://seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CBPE2004/Artigos/PRODU%C7%C3O%20DE%20HIDROG%C3%A9nio%20UTILIZANDO%20ENERGIA%20VERTIDA%20TURBIN%C3%A1vel.pdf>, 2011. Acesso em: 15 out. 2017.

FRONTIN, S. O. **Alternativas não convencionais para a transmissão de energia elétrica**: Estado da arte. Brasília, DF: Teixeira, 2011.

FURLAN, A. L. **Análise comparativa de sistemas de armazenamento de energia elétrica fotovoltaica por meio de baterias e hidrogênio em localidades isoladas da região Amazônica**. 2008. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <http://libdigi.unicamp.br/document>. Acesso em: 15 out. 2017.

GAGNON, S. **The element hydrogen**. [S. l.]: Jefferson Lab, 2017. Disponível em: <http://education.jlab.org/itselemental/ele001.html>. Acesso em: 15 out. 2017.

GOMES NETO, E. H. **Hidrogênio, evoluir sem poluir**: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba: Brasil H₂ Fuel Cell Energy, 2005.

GRJOTHEIM, K.; KVANDE, H. **Understanding the hall-héroult process for production of aluminium**. Dusseldorf: Aluminum-Verlag, 1986.

GOVIND, D. R.; PUTTAIAH, P. E.; TIMOTHY, A.; DRENNEN, M. R.; BRUNETTI, S. C.; TRAYLOR, C. M. **Conversion of a gasoline internal combustion engine to a hydrogen engine**. Vitgínia: West Virginia University, 2012.

LEVIN, I.; BRANDON, D. Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences. **J. Am. Ceram. Soc.**, Westerville, v. 81, 1995.

LI, R.; FANG, Y.; YANG, T.; SUN, Y.; LI, Y. Influence factor of hydrogen generation from aluminum-water reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER DISTRIBUTED CONTROL AND INTELLIGENT ENVIRONMENTAL MONITORING, 2011, Changsha. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2011. p. 852-855. Doi: 10.1109/CDCIEM.2011.58.

LILLO-RÓDENAS, M. A.; CAZORLA-AMORÓS, D.; LINARES-SOLANO, A. Understanding chemical reactions between carbons and NaOH and KOH: an insight into the chemical activation mechanism. **Carbon**, Elmsford, v. 41, n. 2, p. 267-275, 2003.

MALKI, A.; MEKHALIF, Z.; DETRICHE, S.; FONDER, G.; BOUMAZA, A.; DJELLOUL, A. Calcination products of gibbsite studied by X-ray diffraction, XPS and solid-state NMR. **Journal of Solid State Chemistry**, Maryland Heights, v. 215, p. 8–15, 2014.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MARQUES, A. R.; AUGUSTO, A. F.; MONTEIRO, P. T. O Hidrogênio como Vector Energético nos Transportes. In: SEMINÁRIOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, Lisboa. **Anais** [...] Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2004.

MEDINA, H. V. **Eco concepção para a qualidade da reciclagem do aço e do alumínio automotivos**. Brasília, DF: Cetem, 2006. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/575/1/siq-01.pdf>. Acesso em: 20 out. 2017.

MEYER, S. **Hydrogen gas fuel and management system for an internal combustion engine utilizing hydrogen gas fuel**. [S. l.], 1994. Disponível em: <https://www.google.com/patents/US5293857>. Acesso em: 05 out. 2016.

MOREIRA, M. F. **Ligas de alumínio para fundição**. [S. l.], 2012. Disponível em: http://www.pmt.usp.br/pmt3402/material/ligas_aluminio_fundidas.pdf. Acesso em: 18 out. 2017.

NR13. **Condicionar inspeção de segurança e operação de vasos de pressão**. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.normaslegais.com.br/legislacao/trabalhista/nr/nr13.htm> Acesso em: 12 jun. 2018.

OLIVEIRA, A. C. R. *et al.* O uso do hidrogênio como fonte energética. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2011, [S. l.]. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_WIC_143_902_18877.pdf. Acesso em: 18 out. 2011.

OSTERMAYER, F. **Estudo das emissões de gases formadores do efeito estufa e balanço resultante da conversão de motores à gasolina, de uma frota de veículos leves, para gás natural e álcool hidratado.** 2004. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/5642>. Acesso em: 09 nov. 2017.

PAUL, P. **This is a shareware release for "Private Use Only" to convert small gasoline stationary electric generators up to 10 kW.** [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <http://www.teslatech.info/ttstore/articles/geet/geet.htm>. Acesso em: 09 maio 2019.

PERES, C. R. G.; GRANADA, L. J. S. **A competição pelo uso do gás natural:** geração termelétrica, uso industrial, uso em transportes e uso como matéria-prima petroquímica. Disponível em: http://www.academia.edu/download/37928203/O_gas_natural_rev2.doc – 2015. Acesso em: 18 out. 2017.

PETROVIC, J.; THOMAS, G. **Reaction of aluminum with water to produce hydrogen:** a study of issues related to the use of aluminum for on-board vehicular hydrogen storage. Version 1.0. [S. l.]: DOE - U. S. Department of Energy, 2008.

PORCIÚNCULA, C. B. **Simulação e operação de célula de combustível com geração in situ de hidrogênio através da corrosão alcalina do alumínio.** 2013. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/72908>, 12/1/2013. Acesso em: 12 ago. 2019.

PORCIÚNCULA, C. B.; MARCILIO, N. R.; TESSARO, I. C. Produção de hidrogênio para células de combustível via corrosão alcalina de alumínio. In: SEMINÁRIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA, 9., 2010, Porto Alegre. **Anais eletrônicos [...]** Porto Alegre: UFRGS/PPGEQ, 2010.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. **Bauxita.** Brasília, DF: CETEM/MCT, 2017. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1049/1/13.BAUXITA%20novo.pdf>. 2015. Acesso em: 18 out. 2017.

SANTOS, F. M.; SANTOS, F. A. **Combustível" hidrogênio".** [S. l.]: Millenium, 2005. Disponível em: <http://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/435>. Acesso em: 18 out. 2017.

SILVA, A.; CEREZOLLI, P. Mostuário didático do alumínio: de onde vem e para onde vai? **Revista Técnico Científica do IFSC**, Florianópolis, v. 1, n. 4, p. 43, 2012. Disponível em: <http://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/rtc/article/viewFile/909/590>. Acesso em: 18 out. 2017.

SILVA, F. M. N.; LIMA, E. G.; RODRIGUES, M. G. F. Influência da calcinação nas transformações de fase da Gibsita-Boemita-Gama/Alumina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERAMICA, 2016, Águas de Lindóia. **Anais [...]** Águas de Lindóia: [s. n.], 2016. p. 69-79.

SOLER, L. *et al.* In situ generation of hydrogen from water by aluminum corrosion in solutions of sodium aluminate. **Journal of Power Sources**, Lausanne, v. 192, n. 1, p. 21-26. 2009.

SOUZA, S. N. M. **Aproveitamento da energia hidroelétrica secundária para produção de hidrogênio eletrolítico**. 1998. 211 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 1998.

STAFF. **Hydrogen (H₂) properties, uses, applications**: hydrogen gas and liquid hydrogen. universal industrial gases. [S. l.], 2008.

TILLMANN, C. A. C. **Motores de combustão interna e seus sistemas**. Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2017. Disponível em: http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas.pdf, 2013. Acesso em: 23 maio 2017.

TOLMASQUIM, M. T. (org.), **Fontes renováveis de energia no Brasil**: interciência. [S. l.]: CENERGIA, 2003.

TORTORA, G. J.; DERRICKSON, B. **Corpo humano**: fundamentos de anatomia e fisiologia. Porto Alegre: Artmed, 2016.

NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING – US. Committee on alternatives and strategies for future hydrogen production and use, us national research council. **The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs**. National Academies, 2004. 240 p. ISBN 0-309-09163-2.

U. S. GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Aluminum statistics and information**. [S. l.], 2010. Disponível em: Acesso em: 7 dez. 2010.

VARDE, K. S.; FRAME, G. A. Development of a high-pressure hydrogen injection for SI engine and results of engine behavior. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 10, n. 11, p. 743-748, 1985.

VERHELST, S. *et al.* Electricity powering combustion: hydrogen engines. **Proceedings of the IEEE**, Piscataway, v. 100, n. 2, p. 427-439, 2012. Doi: 10.1109/JPROC.2011.2150190.

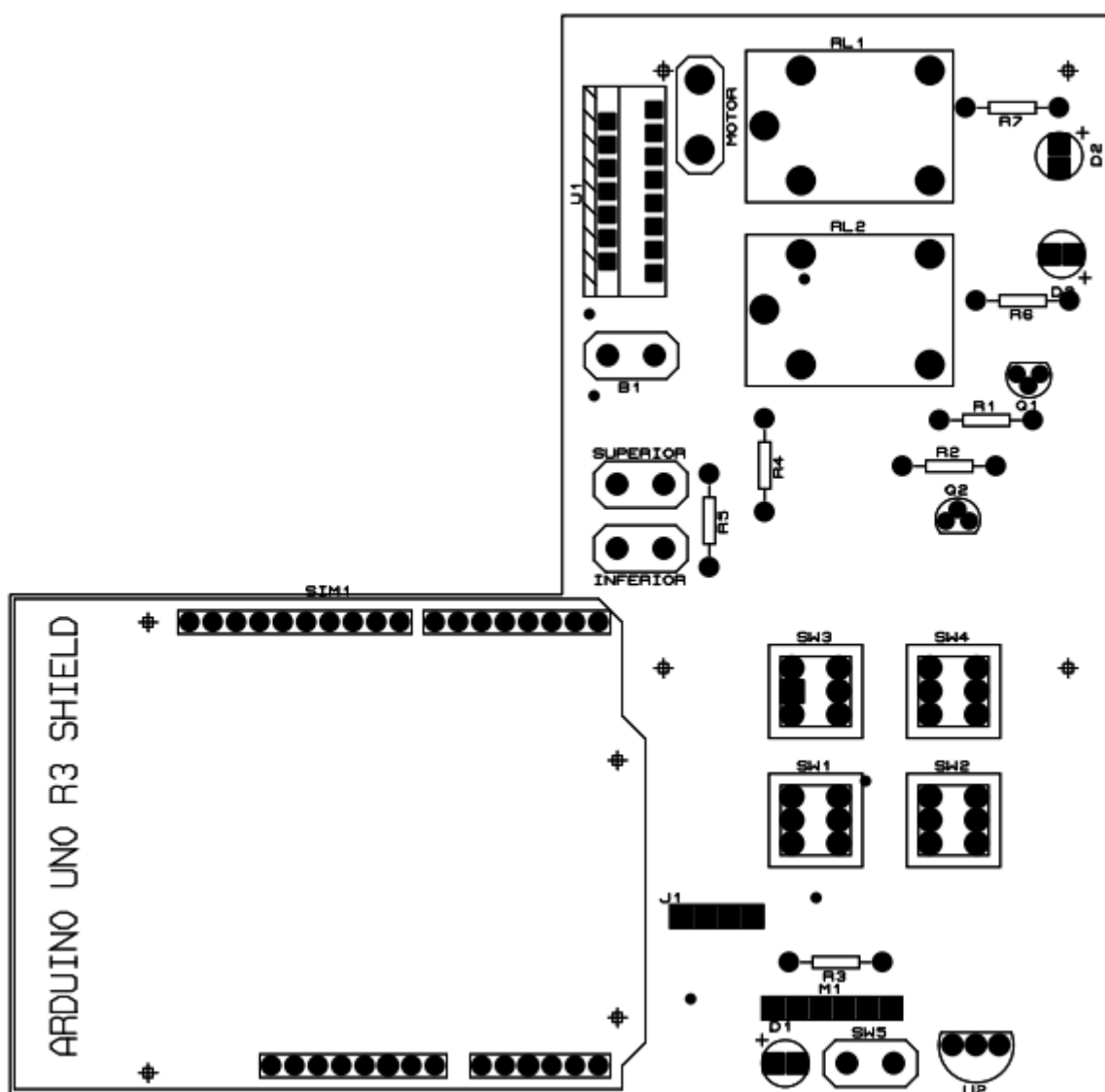
WANG, H. Z. *et al.* A review on hydrogen production using aluminum and aluminum alloys. **Renewable and sustainable energy reviews**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 845-853, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403210800035X>; Acesso em: 18 maio 2018.

WANG, H.; XU, B.; SMITH, P.; DAVIES, M.; DESILVA, L.; WINGATE, C. Kinetic modelling of gibbsite dehydration/amorphization in the temperature range 823–923 K. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, New York, v. 67, n. 12, p. 2567–2582, 2006.

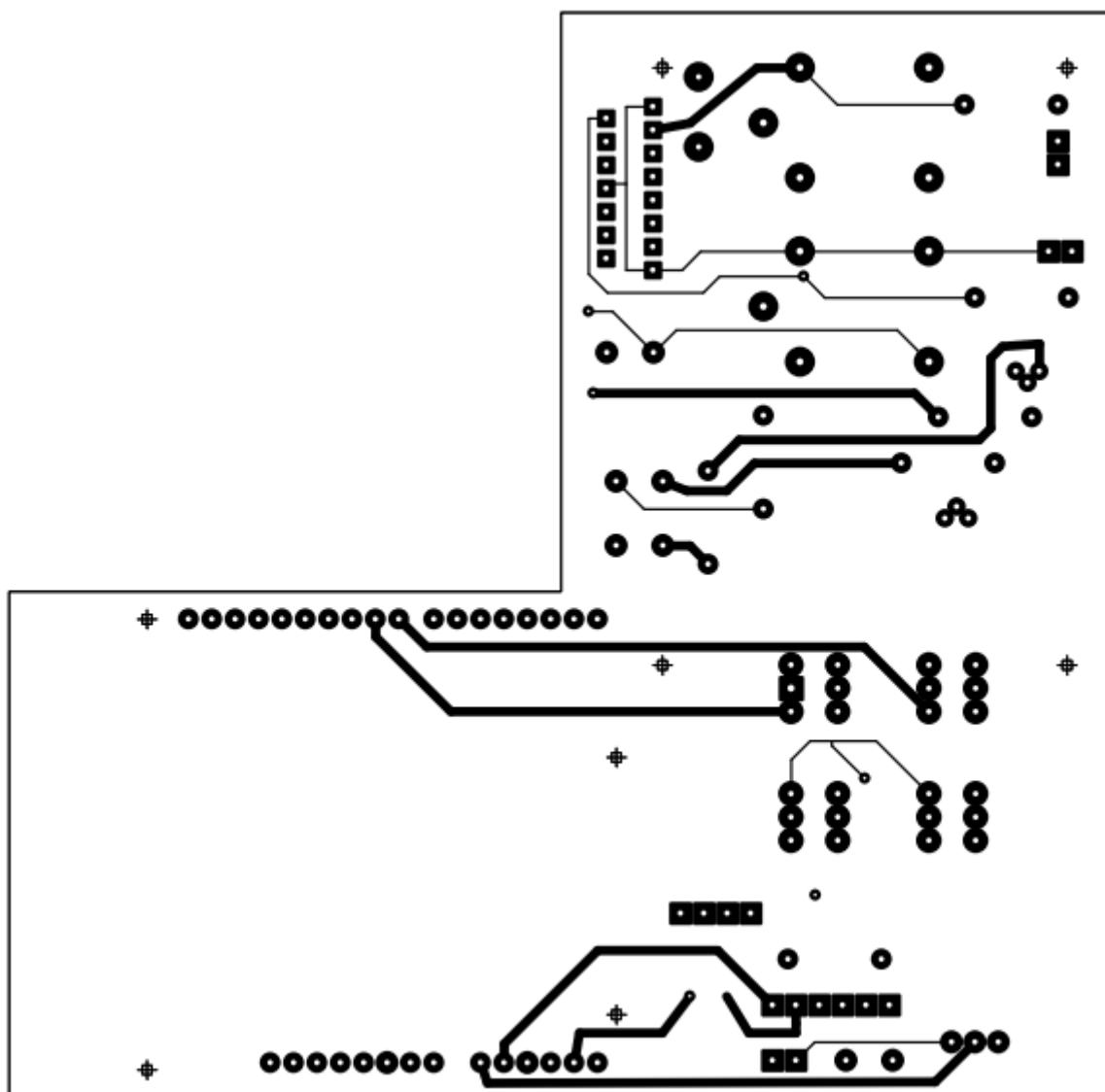
ZHU, B.; FANG, B.; LI, X. Dehydration reactions and kinetic parameters of gibbsite. **Ceramics International**, Faenza, v. 36, n. 8, p. 2493–2498, 2010.

ANEXO A – MASCARA DA PLACA DE CONTROLE DE IMERSÃO

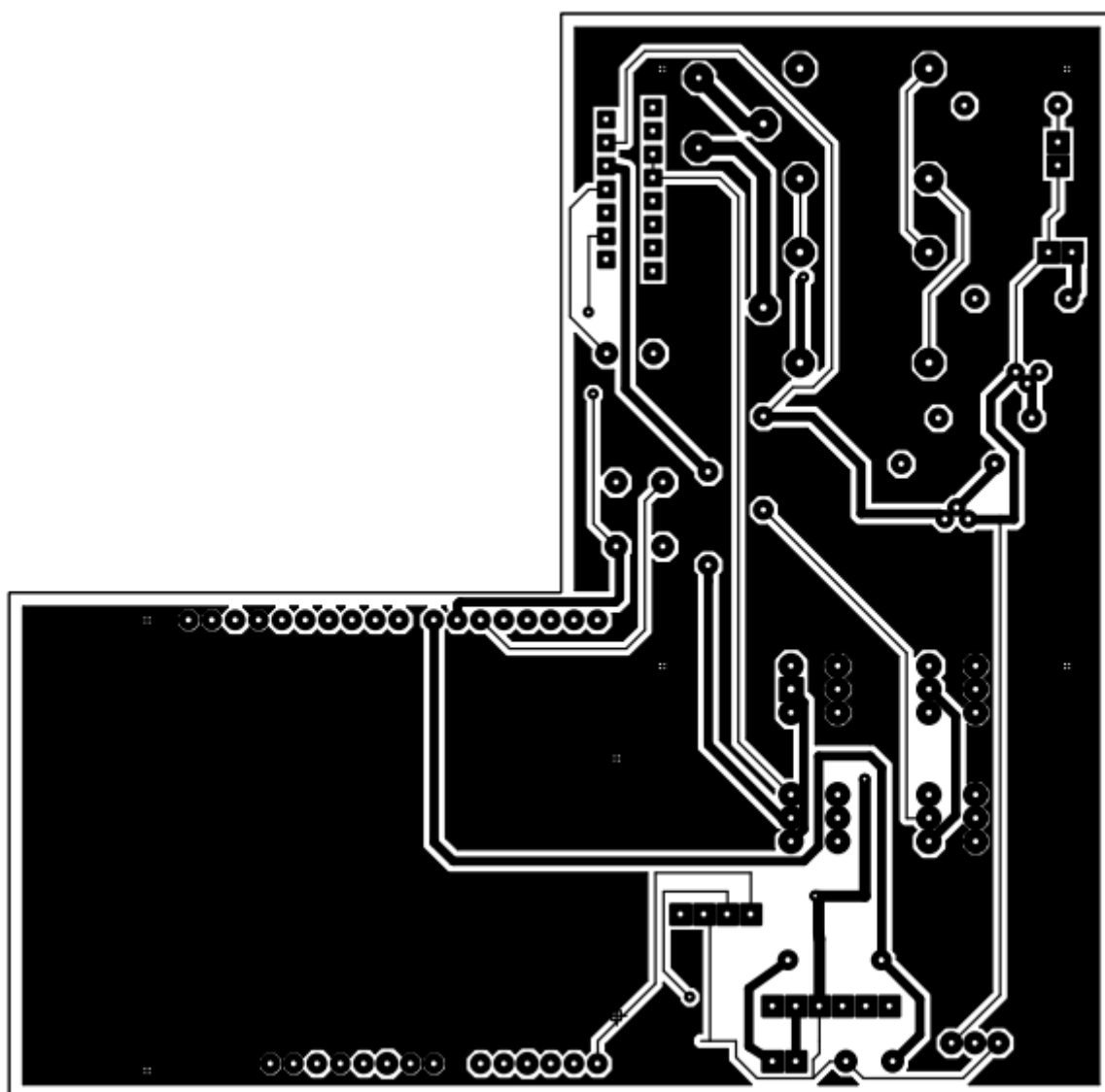
A.1 – Posição dos componentes.



A.2 – Cobre superfície superior - tamanho real.



A.3 – Cobre superfície inferior - tamanho real.



ANEXO B – LISTA DE MATERIAIS DA PLACA DE CONTROLE REATOR DE IMERSÃO

Bill Of Materials for REATOR ALUMINIO AGUA

Design Title REATOR ALUMINIO AGUA
Author
Document Number
Revision
Design Created domingo, 30 de julho de 2017
Design Last Modified sexta-feira, 21 de setembro de 2018
Total Parts In Design 29

1 Modules				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
1	M1	MPX4115 - pressão		
Sub-totals:				R\$0,00
0 Capacitors				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
Sub-totals:				R\$0,00
7 Resistors				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
6	R1-R2,R4-R7	10k		
1	R3	560		
Sub-totals:				R\$0,00
2 Integrated Circuits				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
1	U1	L298		
1	U2	LM35 temperatura		
Sub-totals:				R\$0,00
2 Transistors				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
2	Q1-Q2	BC548		
Sub-totals:				R\$0,00
3 Diodes				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
1	D1	LED-RED		
2	D2-D3	LED-BLUE		
Sub-totals:				R\$0,00
14 Miscellaneous				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Stock Code</u>	<u>Unit Cost</u>
2	B1-B2	5V		
1	INFERIOR	Fim superior		
1	J1	25630401RP2	NorComp 25630401RP2	
1	MOTOR	12V		
1	RL1	Sobe 12V		
1	RL2	Desce 12V		
1	SIM1	SIMULINO UNO		
1	SUPERIOR	Fim inferior		
1	SW1	Sobe manual		
1	SW2	Desce manual		
1	SW3	On Off auto		
1	SW4	on off auto		
1	SW5	SW-SPST Chave boia		
Sub-totals:				R\$0,00
Totals:				R\$0,00

ANEXO C - PARÂMETROS SENSOR DE PRESSÃO MPX5700DP



Freescale Semiconductor
Data Sheet: Technical Data

Pressure

MPX5700
Rev 10, 10/2012

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5700 series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 2.5% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Available in Absolute, Differential and Gauge Configurations
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Durable Epoxy Unibody Element

MPX5700 Series

0 to 700 kPa (0 to 101.5 psi)
15 to 700 kPa (2.18 to 101.5 psi)
0.2 to 4.7 V Output

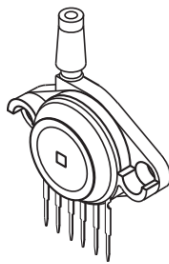
ORDERING INFORMATION								
Device Name	Case No.	# of Ports			Pressure Type			Device Name
		None	Single	Dual	Gauge	Differential	Absolute	
Unibody Package (MPX5700 Series)								
MPX5700A	867	*					*	MPX5700A
MPX5700AP	867B		*				*	MPX5700AP
MPX5700AS	867E		*				*	MPX5700A
MPX5700ASX	867F		*				*	MPX5700A
MPX5700D	867	*				*		MPX5700D
MPX5700DP	867C			*		*		MPX5700DP
MPX5700DP	867C			*		*		MPX5700DP
MPX5700GP	867B		*		*			MPX5700GP
MPX5700GP1 ⁽¹⁾	867B		*		*			MPX5700GP
MPX5700GS	867E		*		*			MPX5700D

1. MPX5700GP1 has 90 degree lead form.

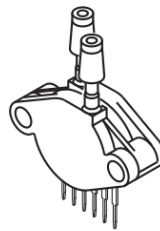
UNIBODY PACKAGES



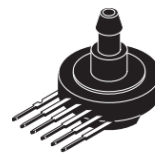
MPX5700A/D
CASE 867-08



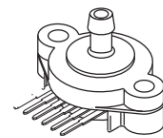
MPX5700AP/GP/GP1
CASE 867B-04



MPX5700DP
CASE 867C-05



MPX5700AS/GS
CASE 867E-03



MPX5700ASX
CASE 867F-03

ANEXO D – PARÂMETROS DO DRIVER DE POTENCIA L298 4A 2 CANAIS



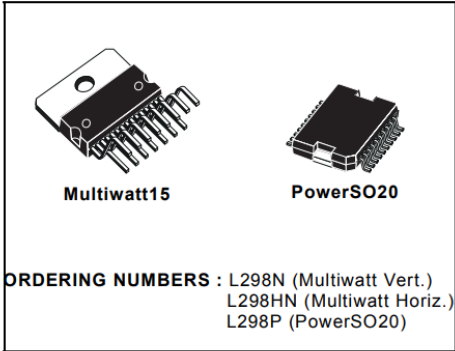
L298

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

L298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_I, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_O	Peak Output Current (each Channel)		
	– Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	– Repetitive (80% on –20% off; $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	– DC Operation	2	A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_J	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

ANEXO E – PARÂMETROS DO SENSOR DE TEMPERATURA LM35

OBJETIVO

Realizar la caracterización y conexión de un sensor de temperatura LM35, para profundizar en el entendimiento de su principio de funcionamiento y su modo de operación.

INTRODUCCIÓN

El sensor de temperatura LM35 es un sensor de circuito integrado con una salida lineal proporcional a la escala Celsius. Tiene un alcance de -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$ y una exactitud aproximada de 0.25°C . En la Figura 1 se muestran sus conexiones y su carcasa.

Especificaciones:

- Rango de Medida: $-55^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$.
- Función de transferencia: $10.0\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.
- Rango de trabajo: -55° a 150° Celsius.
- Voltaje de alimentación: $4 \sim 30\text{VDC}$.
- Consumo de corriente: $60\text{ }\mu\text{A}$.
- Auto calentamiento: menor a 0.08 en espacios sin flujo de aire.
- Resolución: $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$.



Fig. 1. representación de LM35

ANEXO F – ALGORITMO COMENTADO DA PRODUÇÃO DE HIDROGENIO MÉTODO REATOR AUTOMATIZADO DE IMERSÃO

```

int tempPin = 0;
int pressPin = 1;
int val;
int val2;

int lowlevel = 5;
int highlevel = 6;
int water = 7;
int driverdown = 8;
int driverup = 9;

int water1 = 1;
int lowlevel1 = 0;
float cel = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  pinMode (lowlevel, INPUT);
  pinMode (highlevel, INPUT);
  pinMode (water, INPUT);
  nível

  pinMode (driverdown, OUTPUT);
  pinMode (driverup, OUTPUT);
}

```

// Variaveis analógicas
// Variável de temperatura
// Variável de pressão
// Guardar valor em cálculo
// Guardar valor em cálculo em
outra instância

// Variáveis digitais
// Sensor em baixo
// Sensor em cima
// Sensor nível de água
// Output o elevador desce
// Output motor subir
// Variable to store the read value
// Controle do nível mínimo
// Guarda valor
// Variável de nível zero

// Inicia programa

// Inicia comunicação serial rs232
// Pin modes
// Nível baixo
// Sets the digital as input nível alto
// Sets the digital as input leitura do
nível

// Acionamento elevador descida.
// Acionamento elevador subida.

```

void loop()                                // Loop de supervisor interno
{
    water1 = digitalRead(water);           // Read the input pin

    val = analogRead(tempPin);              // Lê temperatura
    float mv = ( val / 1024.0) * 5200;      // Ajuste do valor lido
    float cel = mv / 10;                    // Ajuste complementar
    // float farh = (cel * 9) / 5 + 32;      // Cálculo para fahrenheit

    val2 = analogRead(pressPin);            // Leitura de pressão
    float mv2 = ( val2 / 1024.0) * 1000;     // Ajuste do valor lido
    float pressao = mv2 / 10;                // Ajuste complementar
    pressao = pressao - 1;                  // Ajuste complementar

    Serial.print("TEMPERATURA = ");         // Impressão no terminal de
                                           // comunicação
    Serial.print(cel);                      // Imprime o valor lido temperatura
    Serial.print("°C");                     // Imprime a notação
    Serial.println();                       // Imprime linha
    delay(500);                             // Delay de 500ms

    Serial.print("PRESSAO = ");             // Impressão no terminal de
                                           // comunicação
    Serial.print(pressao);                  // Imprime o valor lido pressão
    Serial.print("psi");                     // Imprime a notação
    Serial.println();                       // Imprime linha
    delay(500);                             // Delay de 500ms

    Serial.print("Nivel = ");               // Impressão no terminal de
                                           // comunicação
    Serial.print(water1);                   // Imprime o valor lido nível água
    Serial.print(".");                       // Imprime a notação
    Serial.println();                       // Imprime linha
    delay(500);                             // Delay de 500ms

```

```

if (digitalRead(water) == LOW){
(cel < 60){

if (pressao < 10 ){
if ( digitalRead(highlevel) == HIGH );{
do{
digitalWrite(driverup, LOW);
digitalWrite(driverdown, HIGH);
delay(100);
}while (digitalRead(lowlevel) == LOW);
}
}
if (pressao > 10 ){

if ( digitalRead(lowlevel) == HIGH ){
do{
digitalWrite(driverdown, LOW);
digitalWrite(driverup, HIGH);
delay(100);
}while (digitalRead(highlevel) == LOW);
}
}
delay (100);
}
}
}

// Bloqueia caso nível baixo  if
// Bloqueia no topo caso temperatura
alta
// Pressão de trabalho
// Lê nível alto
// Faça
// Acionamento elevador subida
// Acionamento elevador Descida
// Delay de 100ms
// Leitura de fim de curso inferior
// Fim
// Fim
// Pressão de trabalho
// Decisão de pressão de trabalho
// Leitura de nível
// Faça
// Descida
// Subida
// 100ms
// Leitura de fim de curso superior

// 100ms
// Fim
// Fim
// Fim

```


ANEXO G – ALGORITMO COMENTADO DA AUTOMAÇÃO DE MOTOGERADOR DE ENERGIA COM EFEITO HALL

```

#include <SPI.h>                                // Biblioteca do SPI
#include <Wire.h>                                // Biblioteca Wire.
#include <Adafruit_GFX.h>                        // Biblioteca Display
#include <Adafruit_SSD1306.h>                   // Biblioteca Comunicação

#define OLED_RESET 4                            // Definição do reset do Oled
Adafruit_SSD1306 display(OLED_RESET);          // Inicializando o Display

volatile byte half_revolutions;                // Meia revolução
unsigned int rpm;                               // Declaração de variável
unsigned long timeold;                          // Declaração de variável

#if (SSD1306_LCDHEIGHT != 64)                  // Mensagem de extrapolação da tela
                                                // do display
#error("Height incorrect, fix Adafruit_SSD1306.h!"); // Mensagem de erro
#endif                                          // Finaliza

void setup()                                   // Declaração de inicialização de
                                                // rotinas
{
    Serial.begin(9600);                        // Inicialização de porta serial com o
                                                // IHM IDE Arduino

    attachInterrupt(0, rpm_fun, RISING);       // Declaração de interrupção

    half_revolutions = 0;                      // Definição de revolução

    rpm = 0;                                   // Valor a ser exibido no início

    timeold = 0;                               // Tempo do início

```

```

display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); // Inicialização do I2C addr 0x3D
                                           // (para o formato 128x64)

display.display(); // Mostra o display

delay(2000); // Tempo de latência

display.clearDisplay(); // Limpeza de memória.

displayRPM(); // Mostra o valor da RPM do Motor.

}

void loop() // Início de Loop do programa

{

if (half_revolutions >= 10) { // Loop de revolução atualiza a
                             // cada 20 passagens para média

rpm = 30*1000/(millis() - timeold)*half_revolutions; // Decremento

timeold = millis(); // Contagem de tempo

half_revolutions = 0; // Zerando half revolutions

displayRPM(); // Mostra valor no Display

}

}

void rpm_fun() // Início de Loop

{

half_revolutions++; // Incremento

}

void displayRPM() // Início de Loop

{

display.clearDisplay(); // Texto para teste do display

display.setRotation(2); // Texto para teste do display

display.setTextSize(5); // Texto para teste do display

display.setTextColor(WHITE); // Texto para teste do display

display.setCursor(0,0); // Texto para teste do display

```

```
display.println(rpm,DEC); // Texto para teste do display

display.setTextColor(BLACK, WHITE); // Inversão de texto
display.setCursor(0,40); // Posicionamento do Display
display.setTextSize(2); // Tamanho do Texto
//display.setTextColor(WHITE); // Cor do texto
display.print(" rpm "); // Rpm do display
display.display(); // Retorno.
}
```