



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**

**CAMPUS CERRO LARGO**

**CURSO DE AGRONOMIA**

**DENER DAMIÃO**

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM GERADORES COM DIFERENTES  
SOLUÇÕES**

**CERRO LARGO**

**2017**

**DENER DAMIÃO**

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM GERADORES COM DIFERENTES  
SOLUÇÕES**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção de  
grau de Bacharel em Agronomia da  
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador Prof. Dr. Marcos Antônio Zambillo  
Palma

**CERRO LARGO**

**2017**

, Dener Damião  
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM GERADORES COM DIFERENTES  
SOLUÇÕES / Dener Damião . -- 2017.  
34 f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Zambillo Palma.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de  
AGRONOMIA , Cerro Largo, RS, 2017.

1. INTRODUÇÃO. 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . 3. MATERIAS  
E MÉTODOS . 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES . 5.  
CONSIDERAÇÕES FINAIS . I. Palma, Prof. Dr. Marcos  
Antônio Zambillo, orient. II. Universidade Federal da  
Fronteira Sul. III. Título.

DENER DAMIÃO

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM GERADORES COM DIFERENTES  
SOLUÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Marcos A. Z. Palma

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

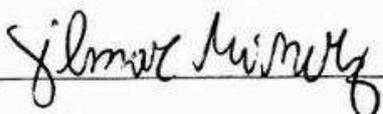
07/12/2017

BANCA EXAMINADORA



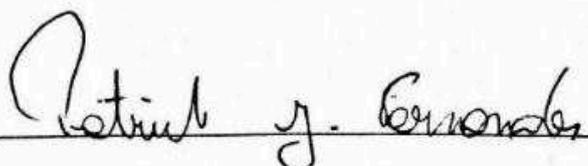
---

Prof. Dr. Marcos Antônio Z. Palma – UFFS



---

Prof. Dr. Gilmar Roberto Meinerz – UFFS



---

Eng. Agr. Patrick J. Fernandes

## RESUMO

Os motores Ciclo Diesel são os mais empregados no segmento da produção agrícola e dos transportes. Sua economia impacta no preço de quase todos os demais setores, sejam eles produção de alimentos, roupas, equipamentos, eletrodomésticos ou qualquer outro setor que dependa de algum transporte. Quanto maior for a injeção de hidrogênio em um motor maior pode ser a economia alcançada por este. O objetivo do presente trabalho foi adaptar uma célula eletrolítica capaz de produzir hidrogênio na forma de HHO (Gás produzido por uma célula eletrolítica), a partir de água destilada com hidróxido de sódio (NaOH) ou bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>), através da eletrólise, a fim de testar qual desses solutos é mais eficiente na produção de HHO. Onde foram avaliados a quantidade de gás (HHO) que a célula pode produzir, utilizando hidróxido de sódio (NaOH), a quantidade de gás (HHO) que a célula pode produzir, utilizando bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>) e qual solução produz mais HHO. Como resultado concluiu-se que o uso de hidróxido de sódio, como potencializador da condutividade elétrica da água, é mais eficiente comparando com o uso de bicarbonato de sódio, uma vez que, consumindo a mesma quantidade de corrente elétrica o hidróxido produziu mais que o dobro de gás HHO.

Palavras-chave: Ciclo diesel; Hidrogênio; Produção de gás; Célula eletrolítica; Reagentes.

## ABSTRACT

Cycle Diesel engines are the more used in the agricultural production and in the transportation sectors. Its economy impacts on the price of almost all the other sectors, be them production of foods, clothes, equipment, appliances or any other sector that depends of some transport. As big as the injection of hydrogen is, bigger will be the economy achieved by it. The objective of the present paper was to develop an electrolytic cell capable of producing hydrogen in the form of HHO(Gas produced by an electrolytic cell), from distilled water with sodium hydroxide (NaOH) or sodium bicarbonate (NaHCO<sub>3</sub>), through electrolysis, with the objective of testing which of these solutes is more efficient in the production of HHO. Where was evaluated the amount of gas (HHO) that the cell can produce, using sodium hydroxide (NaOH), the amount of gas (HHO) that the cell can produce, using sodium bicarbonate (NaHCO<sub>3</sub>), and which solution produces more HHO. As a result it was concluded that the use of sodium hydroxide, as a booster of the electrical conductivity of the water, is more efficient comparing with the use of sodium bicarbonate, once, consuming the same amount of electric current, the hydroxide produced more than double the amount of gas HHO.

Keywords: Diesel cycle; Hydrogen; Gas production; Electrolytic cell; Reagents.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de funcionamento do Ciclo Diesel.....	13
Figura 2 – Representação de um sistema para eletrólise da água .....	19
Figura 3 – Esquema de montagem de uma célula eletrolítica.....	20
Figura 4 – Placa de aço inoxidável.....	23
Figura 5 – Isolante de borracha 3mm.....	23
Figura 6 – Placa de polietileno .....	24
Figura 7 – Conexão metálica.....	24
Figura 8 - Borbulhador .....	24
Figura 9 – Esquema de funcionamento do Gerador de Hidrogênio .....	26

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de Variância - ANOVA .....	29
Tabela 2 - Teste de Tukey .....	290

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS .....	11
<b>1.1.1 Objetivo geral</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 MOTORES CICLO DIESEL .....	12
2.2 COMO FUNCIONA O CICLO DIESEL .....	12
2.3 IMPORTÂNCIA DOS MOTORES CICLO DIESEL NA AGRICULTURA .	14
2.4 HIDROGÊNIO .....	16
2.5 HIDROGÊNIO + DIESEL .....	17
2.6 OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO .....	18
<b>2.6.1 Eletrólise</b> .....	<b>18</b>
<b>2.6.2 Célula eletrolítica</b> .....	<b>20</b>
<b>2.6.3 Eletrólitos</b> .....	<b>21</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>22</b>
3.1 GERADOR DE HIDROGÊNIO .....	22
3.2 COMPONENTES DO GERADOR DE HIDROGÊNIO .....	22
<b>3.2.1 Célula eletrolítica</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2.2 Borbulhador</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.3 Mangueiras</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2.4 Conexões elétricas</b> .....	<b>25</b>
3.3 MONTAGEM DO GERADOR DE HIDROGÊNIO .....	25
3.4 FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE HIDROGÊNIO DO EXPERIMENTO .....	25
3.5 TRATAMENTOS .....	26
<b>3.5.1 Determinação dos tratamentos</b> .....	<b>26</b>

<b>3.5.2 Avaliação dos tratamentos .....</b>	<b>27</b>
<b>3.5.3 Testes com os tratamentos .....</b>	<b>27</b>
<b>3.6 AVALIAÇÃO DOS DADOS .....</b>	<b>28</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>29</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

Os motores Ciclo Diesel são os mais empregados no segmento da produção agrícola e dos transportes. Sua economia impacta no preço de quase todos os demais setores, sejam eles produção de alimentos, roupas, equipamentos, eletrodomésticos ou qualquer outro setor que dependa de algum transporte.

O aumento da população, juntamente com o crescimento de suas necessidades faz com que cada vez busquem-se fontes energéticas mais eficientes e ecologicamente mais interessantes, sendo que quanto melhor a matriz energética mais produtiva se torna a sociedade e melhor pode ser sua qualidade de vida.

Tal busca é focada em fontes que se adaptem ao nosso atual sistema de produção, neste ponto é que surgem as pesquisas com o uso do hidrogênio, o qual pode ser empregado na forma de combustível auxiliar em motores Ciclo Diesel gerando economia do mesmo, dessa forma causando menor impacto ambiental que o uso do combustível isolado.

### **1.1 OBJETIVOS**

#### **1.1.1 Objetivo geral**

Adaptar uma célula eletrolítica capaz de produzir hidrogênio na forma de HHO(Gás produzido por uma célula eletrolítica), a partir de água destilada com hidróxido de sódio (NaOH) ou bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>), através da eletrólise, a fim de testar qual desses solutos é mais eficiente na produção de HHO.

#### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Determinar a relação entre reagentes;
- Avaliar qual solução produz mais HHO;
- Determinar a utilidade dos reagentes para melhorar a condutividade elétrica da água.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 MOTORES CICLO DIESEL**

Em 1894, o engenheiro alemão, Rudolf Diesel, desenvolveu o motor ciclo diesel. Tal motor proporcionara uma alta eficiência térmica e eliminara o circuito elétrico relativamente complicado que era usado, até então, nos motores Ciclo Otto(gasolina).

Rudolf Diesel em sua invenção, o motor de ciclo diesel, conseguiu para a época resolver as questões inerentes à funcionalidade de um motor que gerasse energia suficiente capaz de movimentar o que lhe fosse proposto.

O motor de Diesel detinha de uma compressão mais elevada em relação aos motores ciclo otto, dessa forma, o combustível(no caso um óleo de amendoim) era adicionado de forma direta à câmara de combustão, sendo que, então, entra em combustão devido a alta pressão e alta temperatura. Assim eliminando a utilização de velas para a ignição do combustível.

“O motor de ignição comandada funcionando segundo o ciclo de Otto apresenta alguns inconvenientes, como sejam necessitar de um combustível de qualidade especial(vaporizável), estar limitado a um valor máximo da taxa de compressão (limitado pelo aparecimento de combustão anormal) e necessitar de que a mistura ar-combustível esteja dentro de limites apertados (impondo uma restrição à entrada de ar para cargas baixas). Todas estas limitações se traduzem em abaixamentos do rendimento térmico. Rudolf Diesel concebeu um ciclo cuja aplicação prática permite resolver os problemas atrás enumerados, sendo portador, no entanto, de outras deficiências. Basicamente, este motor (de ignição por compressão) utiliza os mesmos componentes que o vulgar motor a gasolina, mas o seu funcionamento difere sensivelmente deste último”. (MARTINS, 2006. p 08)

Tal motor, logo foi empregado em instalações industriais e na produção de veículos pesados, como locomotivas, grandes caminhões e navios. Tudo em decorrência de seu rendimento, tempo de vida útil, segurança de funcionamento e um baixo custo de manutenção.

### **2.2 COMO FUNCIONA O CICLO DIESEL**

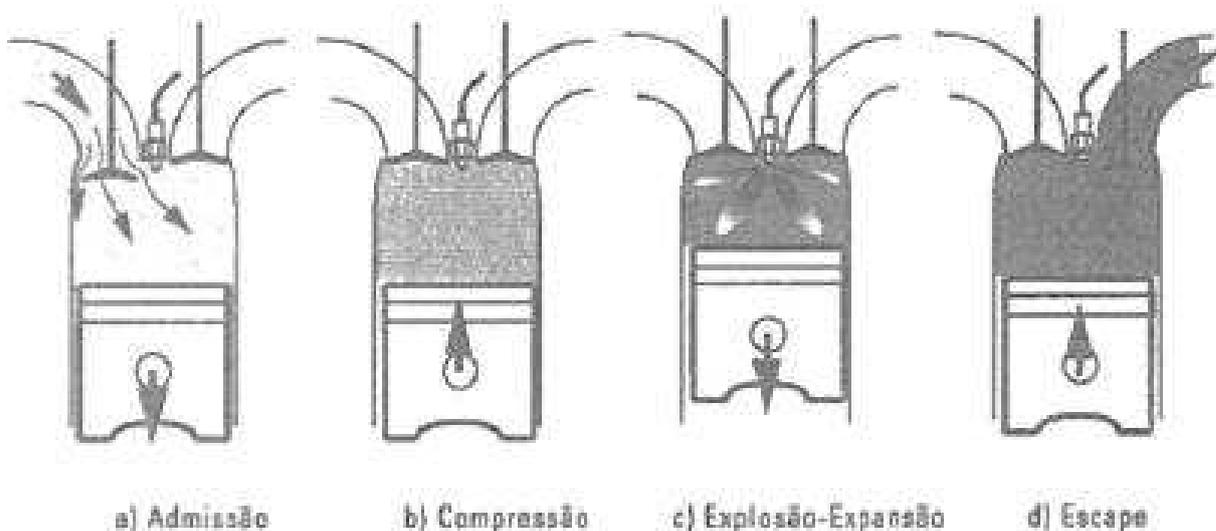
O funcionamento do Ciclo Diesel assemelha-se muito ao Ciclo Otto, sendo composto pelos mesmos quatro tempos (admissão, compressão, combustão e escape) de funcionamento.

Na primeira etapa (admissão), o ar puro entra no cilindro enchendo-o por completo. Seguindo, o pistão comprime este ar, numa relação que vai de 14:1 até 25:1, esta é a segunda etapa (compressão).

Na terceira etapa (combustão) o diesel é injetado diretamente na câmara de combustão, neste momento há tanta pressão e temperatura elevada dentro do cilindro que o óleo entra em combustão sem a necessidade de um mecanismo extra gerar uma faísca. É nesta única etapa que o motor gera trabalho, quando o combustível explode forçando o pistão a deslocar-se para baixo fazendo o virabrequim girar.

A última etapa (escape), corresponde à exaustão dos gases provenientes da queima do diesel que estão dentro do cilindro. Esses gases são conduzidos através de tubos metálicos para fora do motor.

Figura 1 – Esquema de funcionamento do Ciclo Diesel



Fonte: MARTINS, 2006

Cabe aqui salientar a principal característica do Ciclo Diesel, a qual torna este tão eficiente, a injeção direta de combustível. Esta peculiaridade (uma vez que é aspirado apenas ar na admissão) permite uma maior taxa de compressão, que acarreta em maior eficiência térmica no momento da combustão. Tal vantagem não evidencia-se no Ciclo Otto, pois nesse o ar e o

combustível são misturados antes da compressão, tornando esta menos eficiente.

### 2.3 IMPORTÂNCIA DOS MOTORES CICLO DIESEL NA AGRICULTURA

O óleo diesel, que é amplamente utilizado na agricultura como fonte energética, é um combustível fóssil originado do petróleo, sendo usado em motores presentes em tratores, colhedoras, caminhões, geradores de luz, etc.

Conforme BRASIL(2016), o nosso país consumiu mais de 62 mil metros cúbicos de diesel no ano de 2015, sendo o setor agrícola e agropecuário o responsável por 13% desse consumo, perdendo apenas para o setor de transportes (81,7%), o qual é intimamente ligado à agricultura no transporte desde insumos até a produção do setor (valores calculados com base no Quadro 1).

Quadro 1 - Balanço Energético brasileiro no ano de 2015

Fluxo	Petroleo	Gás natural	Carvão vapor	Carvão metal	Urânio	Hidráulica	Lenha	Prod. Cana	Outr. Prim.	Total primarios	Oleo diesel
PRODUÇÃO	126.127	34.871	3.066	0	512	30.938	24.519	50.424	16.013	286.471	0
IMPORTAÇÃO	15.377	16.198	5.638	7.625	2.159	0	0	0	0	46.997	5.885
VARIAÇÃO DE ESTOQUES	-1.165	0	-337	56	-1.701	0	0	0	8	-3.139	313
OFERTA TOTAL	140.339	51.069	8.367	7.681	971	30.938	24.519	50.424	16.021	330.329	6.199
EXPORTAÇÃO	-38.050	0	0	0	0	0	0	0	0	-38.050	-651
NAO APROVEITADA	0	-1.377	0	0	0	0	0	0	0	-1.377	0
REINJEÇÃO	0	-8.722	0	0	0	0	0	0	0	-8.722	0
OFERTA INTERNA BRUTA	102.288	40.971	8.367	7.681	971	30.938	24.519	50.424	16.021	282.180	5.548
TOTAL TRANSFORMAÇÃO	-101.841	-21.737	-4.503	-7.676	-971	-30.938	-7.849	-21.757	-9.008	206.278	42.511
REFINARIAS DE PETROLEO	-99.972	0	0	0	0	0	0	0	-3.783	-103.755	42.248
PLANTAS DE GAS NATURAL	0	-3.727	0	0	0	0	0	0	245	-3.482	0
USINAS DE GASEIFICAÇÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
COQUERIAS	0	0	0	-7.676	0	0	0	0	0	-7.676	0
CICLO DO COMBUSTIVEL NUCLEAR	0	0	0	0	-971	0	0	0	0	-971	0
CENTRAIS ELET. SERV. PUBLICO	0	-13.704	-4.265	0	0	-29.126	-66	0	2.001	-49.162	-2.031
CENTRAIS ELET. AUTOPROD.	0	-2.706	-238	0	0	-1.812	-354	-5.959	3.881	-14.951	-399
CARVOARIAS	0	0	0	0	0	0	-7.429	0	0	-7.429	0
DESTILARIAS	0	0	0	0	0	0	0	-15.798	0	-15.798	0
OUTRAS TRANSFORMAÇÕES	-1.869	-1.600	0	0	0	0	0	0	412	-3.056	2.692
PERDAS DISTRIB. ARMAZENAGEM	0	-464	-7	-5	0	0	0	0	0	-477	0
CONSUMO FINAL	0	18.765	3.855	0	0	0	16.670	28.667	7.013	74.971	48.033
C.F. NAO ENERGETICO	0	685	0	0	0	0	0	0	0	685	0
C.F. ENERGETICO	0	18.060	3.855	0	0	0	16.670	28.667	7.013	74.286	48.033
SETOR ENERGETICO	0	6.112	0	0	0	0	0	13.155	0	19.266	1.338

RESIDENCIAL	0	312	0	0	0	0	6.334	0	0	6.645	0
COMERCIAL	0	114	0	0	0	0	94	0	0	208	4
PUBLICO	0	43	0	0	0	0	0	0	0	43	3
AGROPECUÁRIO	0	0	0	0	0	0	2.814	0	0	2.814	6.327
TRANSP/TOTAL	0	1.553	0	0	0	0	0	0	0	1.553	39.244
RODOVIÁRIO	0	1.553	0	0	0	0	0	0	0	1.553	38.033
FERROVIÁRIO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	971
AÉREO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HIDROVIÁRIO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	240
INDUSTRIAL+TOTAL	0	9.947	3.855	0	0	0	7.428	15.512	7.013	43.756	1.117
CIMENTO	0	12	70	0	0	0	70	0	330	482	60
FERRO-GUSA E AÇO	0	1.223	2.124	0	0	0	0	0	0	3.348	29
FERRO LIGA	0	6	0	0	0	0	63	0	0	69	6
MINERAÇÃO E PELOTIZAÇÃO	0	657	417	0	0	0	0	0	0	1.075	695
NÃO FERROSOS E OUTROS	0	593	689	0	0	0	0	0	0	1.282	10
QUIMICA	0	2.222	172	0	0	0	48	0	85	2.527	18
ALIMENTOS E BEBIDAS	0	834	65	0	0	0	2.171	15.485	10	18.565	239
TEXTIL	0	215	0	0	0	0	62	0	0	277	2
PAPEL E CELULOSE	0	805	86	0	0	0	1.833	27	6.529	9.279	173
CERAMICA	0	1.324	62	0	0	0	2.312	0	59	3.757	24
OUTRAS INDUSTRIAS	0	2.057	168	0	0	0	871	0	0	3.096	162
CONSUMO NÃO IDENTIFICADO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AJUSTES ESTATISTICOS	-447	-4	-3	0	0	0	0	0	0	-454	-25

Fonte: Ministério de Minas e Energia(BRASIL, 2016)

Reis et al.(2005 apud ALBIERO, 2011) defende que metade do diesel consumido pela agricultura brasileira é utilizado nos tratores agrícolas. Tal consumo dá-se em função da necessidade de operações que quase sempre são realizadas em meia ou plena carga, utilizando sempre uma grande demanda de torque. Dessa forma os motores ciclo diesel são mais adequados ao uso na agricultura, evidenciando assim o uso generalizado de motores diesel nos tratores. O restante é utilizado em outros equipamentos que participam dos processos produtivos, como colhedoras e autopropelidos.

Usar tais equipamentos gera custos elevados com combustível, tornando interessante a ideia de uma alternativa para a diminuição destes, contribuindo com maior viabilidade na agricultura.

Enfrentamos um novo desafio em termos energéticos em função deste combustível, com base nisso, tem-se procurado uma forma eficaz de produzir energia que possa vir a substituir ou economizar estes combustíveis, tais como

o biogás, o gás natural, o óleo vegetal, ésteres de álcoois e também combustíveis hidrogenados. Neste contexto, então que surge como uma alternativa o uso do hidrogênio.

## 2.4 HIDROGÊNIO

O elemento químico hidrogênio é o mais abundante no universo, sendo o gás mais leve e possuindo um poder calorífico de 120kJ/g, o qual é o maior de todos os combustíveis conhecidos sendo também, muito inflamável (DE SOUZA et al., 2010).

Na forma molecular, o hidrogênio existe como dois átomos ligados através de uma ligação covalente. A temperatura e pressão normais (0°C e 1atm), apresenta-se como um gás extremamente inflamável, inodoro, insípido, incolor, insolúvel em água e muito mais leve que o ar. O estado líquido é atingido com 253 graus negativos, acima desta temperatura, pode ser armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão (ESTÊVÃO, 2008).

“O hidrogênio tem a mais alta energia por unidade de peso comparativamente com qualquer combustível, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais leve e não tem os pesados átomos do carbono. É por esta razão que o hidrogênio tem sido usado intensamente nos programas espaciais onde o peso é crucial. Especificamente a quantidade de energia libertada durante a reação do hidrogênio é cerca de 2,5 vezes do poder de combustão de um hidrocarboneto (gasolina, gásóleo, metano, propano, etc...). Assim, para satisfazer um consumo energético, a massa de hidrogênio necessária é apenas aproximadamente uma terça parte da massa de um hidrocarboneto. A alta energia contida no hidrogênio também implica que a energia de explosão do gás hidrogênio seja aproximadamente 2,5 vezes a dos hidrocarbonetos normais” (SANTOS F. M., SANTOS F. A, 2005, p. 253).

A maior parte do hidrogênio produzido mundialmente é utilizada como matéria-prima na fabricação de produtos como os fertilizantes, na conversão de óleo líquido em margarina, no processo de fabricação de plásticos e no resfriamento de geradores e motores (CONELHEIRO & LUCIANO, 2012). Devido a sua versatilidade, as pesquisas sobre hidrogênio estão concentradas na geração de energia viabilizando sua produção de forma limpa, uma destas formas pode ser via eletrólise da água.

Tais estudos fazem-se interessantes para a substituição dos combustíveis utilizados atualmente, uma vez que possui uma enorme energia em sua combustão e libera apenas vapor d'água como subproduto (MEDEIROS & BOTTON, 2013).

Al-rousan (2010) afirma que o gás HHO ou gás de Brown é o nome dado ao gás hidrogênio e oxigênio produzido juntos em um Eletrolisador ou Célula eletrolítica. Este tem a capacidade de ser utilizado em motores num sistema dual, de forma conjunta a um combustível fóssil, para a redução do consumo.

## 2.5 HIDROGÊNIO + DIESEL

Na década de 70, Houseman e Cerini (1974) publicaram um trabalho que foi o pioneiro no estudo do uso de hidrogênio como combustível auxiliar em motores a combustão interna. Nos anos seguintes outros autores deram continuidade às pesquisas desse ramo, demonstrando vantagens no uso dessa tecnologia nos quesitos de aumento da eficiência térmica e na redução da emissão de gases poluentes. Esta redução de poluentes é um dos grandes objetivos da sociedade moderna. Melhorando o rendimento termodinâmico dos motores é possível alcançar parte deste, minimizando impactos gerados pela queima de combustíveis fósseis.

A mistura de combustível com HHO pode potencializar o rendimento, além de outras características vantajosas, como a maior homogeneidade na queima, maior eficiência e propagação mais rápida da chama, resultando em um aumento global da eficiência termodinâmica do motor (DE SOUZA et al., 2010)

Um motor que funcione apenas com hidrogênio produzido pela eletrólise, que por sua vez seria alimentada pela energia produzida pelo próprio motor, é algo muito complexo e caro, porém, o que pode ser feito facilmente e com baixo custo é um dispositivo que irá aumentar a eficiência do motor denominado célula eletrolítica (KELLY,2016). O resultado do uso de uma tecnologia como esta, associada a ajustes de controladores eletrônicos de um motor, é a possibilidade do uso de uma menor injeção de combustível fóssil, acarretando economia.

“Muitos defendem mudanças na matriz energética, como se substituir os combustíveis fósseis fosse a única solução, no entanto, se esquecem de que esta transição é gradativa. Talvez o caminho mais fácil seja a adaptação a estas mudanças, entretanto, deve-se discriminar a cultura do desperdício e priorizar que o investimento em energias alternativas seja imprescindível e que a verdadeira mudança esteja no modo de vida, na conduta, na utilização mais racional da energia.” (TEIXEIRA; TAOUIL, 2010, p. 18)

## 2.6 OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO

### 2.6.1 Eletrólise

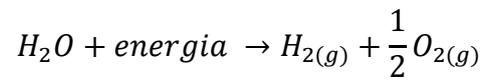
A história do uso da eletrólise da água, segundo Zoulias & Varkaraki (2004) começou na primeira revolução industrial, no ano de 1800, quando Nicholson e Carlisle foram os primeiros a descobrir a possibilidade de decomposição eletrolítica da água.

E eletrolise em água (Hidrólise) consiste na separação de H<sub>2</sub>O em oxigênio e hidrogênio pela indução de corrente elétrica que passa pela água (Figura 2). Este método baseia-se na utilização da energia elétrica, separando os componentes da água (hidrogênio e oxigênio), sendo o rendimento global do processo da ordem dos 95% (SANTOS, SANTOS, 2005).

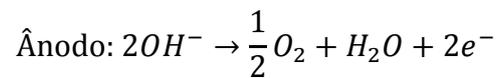
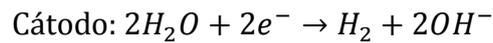
O método foi notoriamente esquecido nos meios industriais, pois há uma maneira mais fácil de produzir o hidrogênio, que é pela queima de combustível fóssil. Atualmente existe uma linha de pensamento que busca utilizar a eletrólise de água para, de uma forma geral, diminuir o consumo de combustíveis fósseis e impactos ambientais. O maior obstáculo do processo está no fato da água ser um eletrólito muito fraco, não conseguindo conduzir muita corrente elétrica, então para aumentar seu poder de decomposição por meio da eletrólise são adicionados solutos iônicos podendo ser um sal, um ácido ou mesmo uma base.

O termo eletrólise vem do grego *electro* + *lýsis* e significa decomposição por eletricidade. Basicamente é a separação de H<sub>2</sub>O em oxigênio e hidrogênio pela indução de corrente elétrica. É um processo eletroquímico em que os íons de um eletrólito de carga elétrica positiva e negativa são transportados pela corrente elétrica e transformados em

partículas não carregadas eletricamente (ESTÊVÃO, 2008). Segundo Neto & Moreira (2007) a reação total do processo é a seguinte:

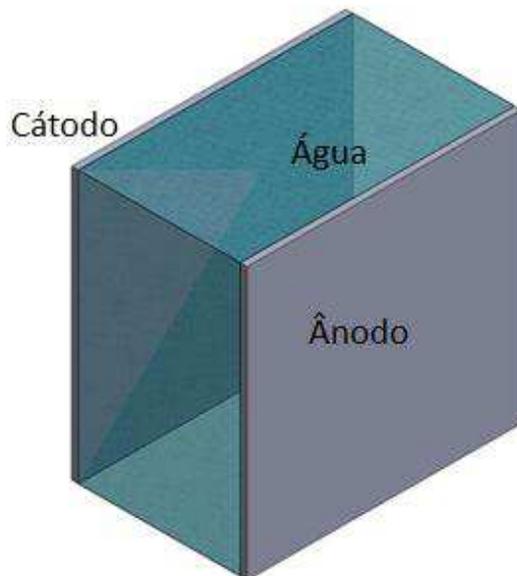


A energia envolvida no processo é convertida em calor e energia química na forma de hidrogênio. As reações nos eletrodos são descritos como:



O gás proveniente deste método pode ser chamado de “gás HHO”, uma vez que é composto não apenas por gás hidrogênio, mas também por gás oxigênio.

Figura 2 – Representação de um sistema para eletrólise da água

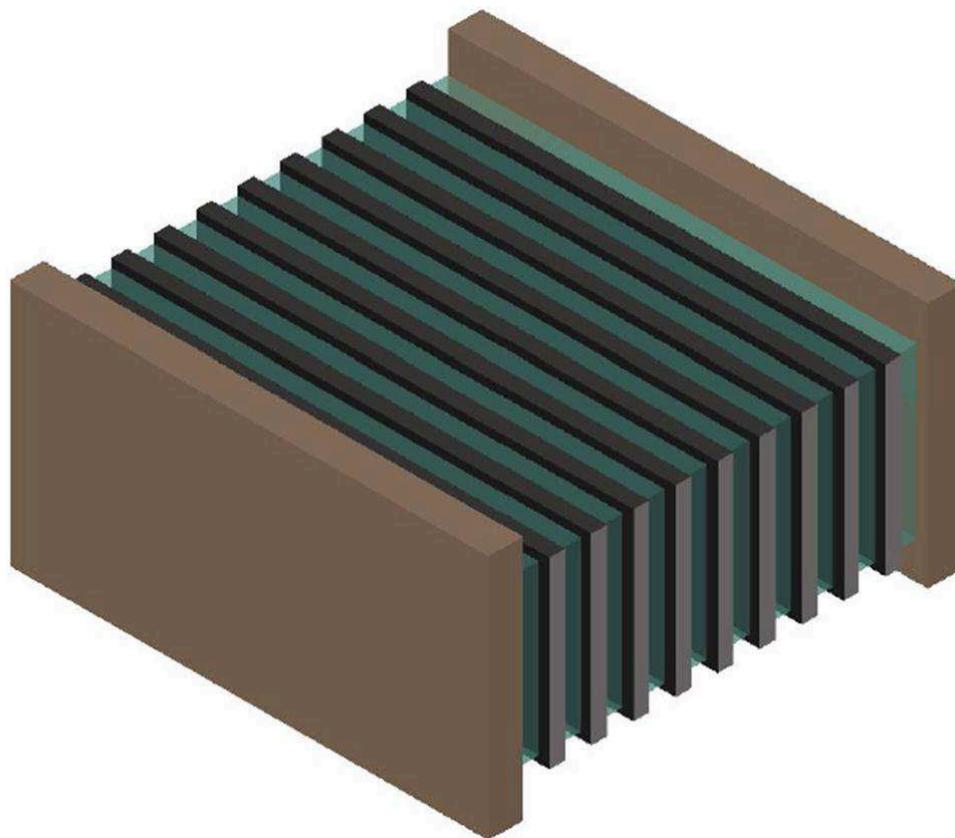


Fonte: Elaborado pelo autor

### 2.6.2 Célula eletrolítica

Dentre as formas de obtenção de hidrogênio destaca-se o uso de uma célula eletrolítica, a qual utiliza a energia provinda do sistema de conversão de energia cinética em elétrica do motor (alternador), a qual fica armazenada na bateria e possibilita a partida elétrica e o funcionamento dos componentes eletrônicos de automotores. Sendo composta por placas de aço inoxidável, com algumas sendo ligadas no polo positivo e outras no negativo da bateria. A mistura de água e de um reagente fica entre estas placas, gerando uma corrente elétrica que quebra a molécula de água produzindo o HHO (Figura 3).

Figura 3 – Esquema de montagem de uma célula eletrolítica



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o desenvolvimento dessa célula adaptada a um motor ciclo diesel sera possível que o gás HHO seja adicionado a mistura de combustível-ar do motor, uma vez que este é muito inflamável e ao entrar em combustão gera apenas água como resíduo, gerando conseqüentemente uma menor necessidade de combustível, o que acarreta em menor emissão de poluentes.

### 2.6.3 Eletrólitos

A água pura (destilada) por si só apresenta uma baixa condutividade elétrica, dessa forma a eletrólise desta é muito lenta e não gera uma produção de H<sub>2</sub>O considerável, necessitando, assim, de uma base forte para que sejam fornecidos íons H<sup>+</sup> à solução, os quais melhoram a condutividade elétrica da água (RUSSELL, 1929).

#### 2.6.3.1 NaOH

O hidróxido de sódio (NaOH) é, em condições ambientes, um sólido branco bastante higroscópico, ou seja, absorve a água presente no ar. Apresenta densidade de 2,13g cm<sup>-3</sup> e ponto de fusão a 322° Celsius. Caracteriza-se por ser uma base muito forte, portanto, é utilizada para neutralizar ácidos fortes ou tornar rapidamente alcalino um meio reacional, mesmo este sendo utilizado em baixas concentrações.

#### 2.6.3.2 NaHCO<sub>3</sub>

O bicarbonato de sódio ou hidrogenocarbonato de sódio ou carbonato ácido de sódio, é composto da fórmula NaHCO<sub>3</sub>, sendo um sólido cristalino de cor clara/branca, solúvel em água, com um sabor ligeiramente alcalino. Possui densidade de 2,15g cm<sup>-3</sup> e ponto de fusão em 50° Celsius.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Serão apresentados neste tópico os experimentos realizados a fim de comparar os dados de produção de hidrogênio do gerador alimentado com os tratamentos. No desenvolvimento do experimento foram necessários alguns equipamentos descritos a seguir.

#### **3.1 GERADOR DE HIDROGÊNIO**

O termo “Gerador de Hidrogênio” será utilizado para o equipamento desenvolvido e adaptado com base na literatura que fará a eletrólise da água, produzindo o gás composto por hidrogênio e oxigênio(HHO).

Este equipamento é um dispositivo eletro químico que, através da eletrólise de uma solução de água, juntamente com um eletrólito como hidróxido de sódio ou bicarbonato de sódio, transforma hidrogênio e oxigênio ligados e em forma de líquido em gás.

O gás HHO(proveniente de um gerador de hidrogênio) é direcionado para a entrada de ar de um motor onde entrará na câmara de combustão, servindo como um gás auxiliar de queima, desta maneira substituindo em parte o combustível comumente utilizado no motor.

#### **3.2 COMPONENTES DO GERADOR DE HIDROGÊNIO**

O Gerador de Hidrogênio é composto por uma célula eletrolítica, mangueiras, um borbulhador, e um sistema de conexões elétricas, estes descritos a seguir.

##### **3.2.1 Célula eletrolítica**

Principal componente do gerador, onde é realizada a eletrólise propriamente dita. Composta por placas de aço inoxidável de 150 mm por 200 mm com furos nas extremidades mais estreitas (Figura 4), a célula mantém separadas essas placas por isolantes de borracha com espessura de 3 mm (Figura 5) a fim de evitar um curto circuito e promover espaço para armazenar a solução.

Figura 4 – Placa de aço inoxidável



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5 – Isolante de borracha 3mm

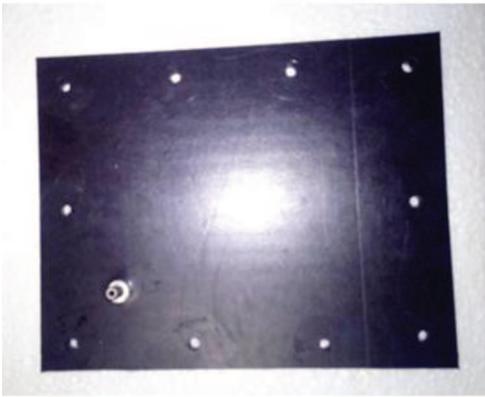


Fonte: Elaborado pelo autor

A estrutura é prensada por duas placas de polietileno resistente com espessura de 10 mm, onde em uma delas são feitos furos nas extremidades mais estreitas para a entrada de solução e saída do gás produzido (Figura 6), tal conjunto é fixado por 10 parafusos e porcas que tem a finalidade de promover a sustentação e a completa vedação do sistema.

Na placa de polietileno que recebe a entrada de solução e a saída de gás são afixados conexões metálicas (Figura 7) estas tem por função permitir a conexão com mangueiras.

Figura 6 – Placa de polietileno



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 – Conexão metálica



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2.2 Borbulhador

Este componente é um recipiente de polietileno de aproximadamente 600 cm<sup>3</sup> de volume, o qual recebeu três conexões metálicas (idem as descritas no parágrafo anterior que permitem a conexão com mangueiras), sendo uma para trânsito da solução entre o borbulhador e a célula eletrolítica, outra para o recebimento dos gases provindos da eletrólise e a última para o direcionamento desses gases a algum motor de combustão. Conforme Figura 8.

Figura 8 - Borbulhador



Fonte: Elaborado pelo autor

### **3.2.3 Mangueiras**

As mangueiras conduzem os gases e a solução da célula até o borbulhador e vice-versa, essas são de silicone flexível transparente, com diâmetro interno de ¼ de polegada.

### **3.2.4 Conexões elétricas**

São responsáveis por alimentar a célula eletrolítica com energia provinda do sistema de geração de energia elétrica do motor. Essas conexões devem ter a capacidade de 10 amperes de corrente (comumente utilizada nos equipamentos automotores), sendo que esta não deve ser maior, pois isto acarreta em risco de superaquecimento e derretimento dos fios, causando danos aos componentes.

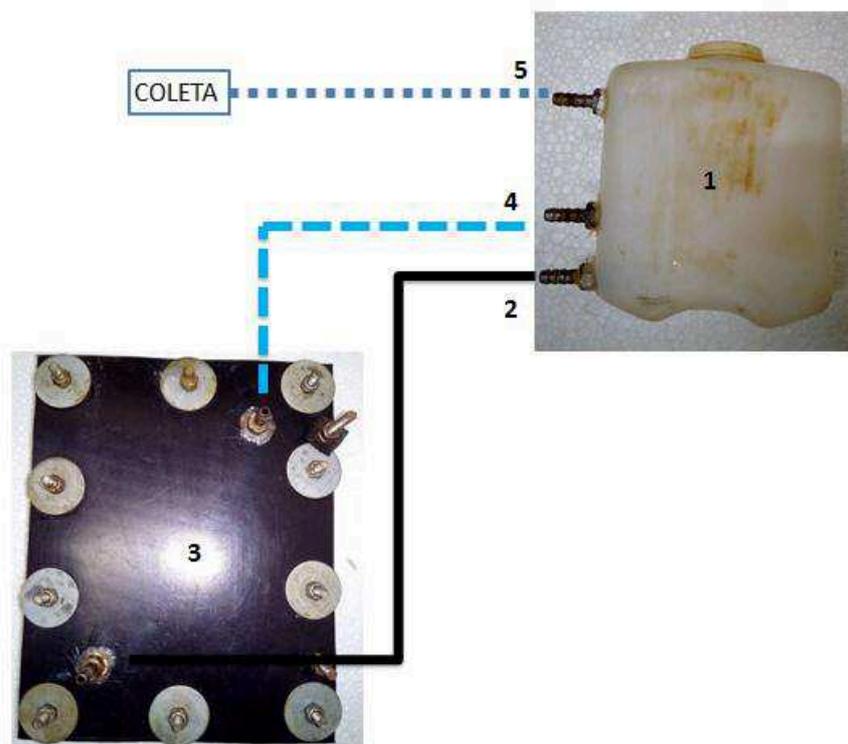
## **3.3 MONTAGEM DO GERADOR DE HIDROGÊNIO**

Para a montagem do gerador segue-se apenas uma regra básica lógica, onde o borbulhador deve estar em um nível pouco mais alto que a parte de cima da célula eletrolítica, permitindo dessa forma que a solução atinja a célula por meio da gravidade e que o gás produzido seja conduzido ao borbulhador por diferença de peso e pressão.

## **3.4 FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE HIDROGÊNIO DO EXPERIMENTO**

Conforme a Figura 9, a solução presente no borbulhador(1) acessa a célula eletrolítica(3) através de uma mangueira que parte da conexão inferior(2), após a solução ser eletrolisada os gases provenientes desse processo retornam ao borbulhador através de uma mangueira acoplada na conexão do meio(4), então o gás HHO é direcionado para fora do Gerador de Hidrogênio pela conexão superior(5), onde então é coletado para amostra.

Figura 9 – Esquema de funcionamento do Gerador de Hidrogênio



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5 TRATAMENTOS

Os tratamentos utilizados serão Água pura + Hidróxido de sódio(T1), Água pura + Bicarbonato de sódio(T2) e, como testemunha, apenas Água pura(T3).

#### 3.5.1 Determinação dos tratamentos

A determinação da relação água pura + reagente dos tratamentos, deu-se empregando um parâmetro de máxima corrente elétrica, sendo que a fiação empregada na indústria de motores e veículos trabalha principalmente com fios de capacidade de 10 amperes de corrente e que quanto mais reagente melhor será a condutividade elétrica e maior será a corrente elétrica utilizada pelo sistema.

Além disso, a capacidade de aumentar a condutividade da água dos dois reagentes é diferente, onde o hidróxido de sódio (por ser uma base muito forte) é muito superior, assim necessitando de uma dose menor que o bicarbonato de sódio.

Assim, a obtenção das dosagens dos reagentes deu-se da seguinte forma:

Acoplou-se um amperímetro analógico ao sistema, o qual mede a corrente elétrica consumida. Feito isto adicionou-se a água pura com diferentes dosagens de reagente ao gerador, iniciando com uma dosagem pequena e verificando o consumo de corrente, quando a corrente foi menor que 10 amperes a solução foi enriquecida com mais reagente e assim sucessivamente até chegar a uma dosagem onde o consumo do sistema alcançou 10 amperes.

Tal processo foi realizado para ambos os reagentes a fim de determinar a dosagem do tratamento que utilize 10 amperes de corrente elétrica

Com esses dados em mãos foram realizados os testes de produção de HHO do Gerador de Hidrogênio com as respectivas doses de reagentes obtidas para os T1 e T2, sendo o T3 sem quaisquer adições de reagente, caracterizando a testemunha.

### **3.5.2 Avaliação dos tratamentos**

Para a avaliação dos tratamentos utilizou-se o Delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos e sete repetições de coleta de gás, sendo escolhido este delineamento em função da não variação das unidades experimentais.

### **3.5.3 Testes com os tratamentos**

O experimento foi conduzido da seguinte forma:

O Gerador de Hidrogênio acoplado a um motor foi acionado, o qual operou por 20 minutos para fins de estabilização (TORRES et al, 2006), então coletou-se na saída do sistema o gás HHO utilizando uma seringa, método proposto por PORCIÚNCULA (2010). neste se mede o tempo que o Gerador de Hidrogênio leva para encher completamente a seringa (período em que o

embolo da seringa parte da posição inferior para superior por conta da entrada de gás). Com esses dados em mãos, o volume de gás HHO foi calculado utilizando a seguinte equação:

$$V = (V_s \times 60) / T_a$$

Onde:

V= volume de HHO, cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>

V<sub>s</sub>= volume da seringa, cm<sup>3</sup>

T<sub>a</sub>= tempo de amostra, s

Feito isto, novamente foi coletado o gás HHO na saída do sistema, caracterizando a segunda repetição, assim sucessivamente até serem obtidas sete repetições para cada tratamento, totalizando 21 unidades experimentais.

### **3.6 AVALIAÇÃO DOS DADOS**

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância e as médias ponderadas ao teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade, onde foi considerado como melhor o tratamento que obteve a maior produção de HHO por minuto, uma vez que, segundo testes realizados por autores como SANDALCI & KARAGÖZ (2014) e MADHUJIT et al (2015), quanto maior for a injeção de hidrogênio em um motor maior pode ser a economia alcançada por este.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme descrito no item 3.5.1, antes das avaliações de produção de hidrogênio foram realizadas avaliações para determinar quais seriam os tratamentos. Onde foram obtidas as dosagens de 34 gramas para hidróxido de sódio por litro de água pura e 257 gramas para bicarbonato de sódio por litro de água pura, ambas consumindo 9,96 amperes de corrente elétrica. Caracterizando assim os T1 e T2, respectivamente.

Utilizando estes tratamentos, os quais consomem uma quantidade igual de corrente elétrica(9,96 amperes) foram obtidos os tempos de 11,1 segundos(em média) para bicarbonato de sódio(T2), e de 5,2 segundos(em média) para hidróxido de sódio(T1). O tratamento utilizando apenas água(T3) pura necessitou de 153,4 segundos em média pra encher o embolo da seringa

O tratamento com hidróxido de sódio apresentou a maior produção de gás HHO utilizando 9,96 amperes de corrente. A água pura apresentou o menor desempenho, sendo também incapaz de consumir a mesma corrente que os demais tratamentos em função de não ser bom condutor, ficando com o consumo de corrente elétrica na faixa dos 2 amperes.

Conforme as Tabelas 1 e 2, a qual apresentam dados da ANOVA e do Teste de Tukey, o coeficiente de variação dos resultados dos tratamentos apresentou-se com 2,32% e todos os tratamentos diferiram entre si.

Tabela 1 – Análise de variância - ANOVA

Causa da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	F (5%)	F (1%)
Tratamentos	2	1571054	785527	12180,21	3,554557	6,012905
Resíduo	18	1160,857	64,49206			
Total	20	1572215				
C.V.		2,32%				

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 - Teste de Tukey

Tratamento	Média (cm <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )
Trat. 01-Hidroxido de sódio	692 a*
Trat. 02-Bicarbonato de sódio	324 b
Trat. 03-Testemunha	23,14286 c

\*Médias dos tratamentos não seguidas por mesmas letras diferem entre si para teste de Tukey em nível de 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O experimento mostra, como já mencionado por Al-rousan (2010), que é possível produzir hidrogênio por meio de uma célula eletrolítica alimentada por água pura + reagente (NaOH ou NaHCO<sub>3</sub>) a qual é submetida a uma corrente elétrica.

Também se evidencia a vantagem da utilização do hidróxido de sódio no processo de obtenção de hidrogênio via eletrólise da água, sendo que este mostra uma vantagem bastante considerável quando comparado ao bicarbonato de sódio.

Dessa forma o sistema pode ser utilizado em motores de combustão ciclo diesel, uma vez que conforme SANDALCI & KARAGÖZ (2014) e MADHUJIT et al (2015), quanto maior a injeção de hidrogênio maior pode ser a economia de combustível alcançada por este.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com o experimento foi possível concluir que o uso de hidróxido de sódio, como potencializador da condutividade elétrica da água, é mais eficiente comparando com o uso de bicarbonato de sódio, uma vez que, consumindo a mesma quantidade de corrente elétrica o hidróxido produziu mais que o dobro de gás HHO.

Também conclui-se que o uso da água pura para tal finalidade é ineficiente, pois a produção de gás não é significativa e é incapaz de consumir maior corrente elétrica, a qual acarretaria em maior produção.

## REFERÊNCIAS

AGARUSSI, M. A. S. N., ESPÍNOLA, M. O. G., Análise energética da produção de hidrogênio eletrolítico aproveitando a energia vertida não turbinada da usina hidroelétrica de Itaipu. 2015.

BALTACIOGLU, M.K., Arat, M.T., Aydin, M.O.K. Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine, **International Journal of Hydrogen Energy** (2016).

BRASIL. Resenha Energética. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira, Exercício de 2015, ed. 2016. p. 29.

CANTERI, M. G., ALTHAUS, R. A., VIRGENS FILHO, J. S., GIGLIOTI, E. A.,GODOY, C. V. SASM - Agri : Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scoft - Knott, Tukey e Duncan. Revista Brasileira de Agrocomputação, V.1, N.2, p.18-24. 2001.

HOUSEMAN, J., CERINI, D., “On board hydrogen generator for a partial hydrogen injection internal combustion engine”. **SAE (Society of Automotive Engineering)**, 1974.

JORNAL DIA DE CAMPO. **Petróleo na Agricultura** – Diesel. Disponível em: <http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=25625&secao=Colunas%20e%20Artigos>. Acesso em: 14 jan. 2017.

KELLY, Patrick J. “**Practical Guide to Free-Energy Devices**” Version 29.4, cap 10 Automotive systems , 2008.

MADHUJIT, Deb., SASTRY, G.R.K. , BOSE P.K., BANERJEE R. An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke di-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation. 2015.

MARTINS, Jorge. Motores de Combustão Interna. **Motor de Ignição por Compressão (Diesel)**. 9. ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2006. p. 8-11.

OLIVEIRA, L.C.C.B, PIGNATA R. M., DANTAS, S. C. Corrosão alcalina do alumínio para produção de hidrogênio considerando diferentes geometrias, temperaturas e concentrações. 2015.

PORCIÚNCULA, C. B., BITTENCOURT, C. Produção de hidrogênio para células de combustível via corrosão alcalina de alumínio. 2010.

RUSSELL J.B. **Química Geral**. 2ª edição. São Paulo – SP: Pearson Education Brasil, março de 2008. 662 p.

SANDALCI, Tarkan ., KARAGÖZ, Yasin., Experimental investigation of the combustion characteristics, emissions and performance of hydrogen port fuel injection in a diesel engine. 2014.

SANTOS, F. M., SANTOS, F. A. Repositório Científico do Instituto Politécnico de Viseu, Revista Millenium: **Combustível "hidrogênio"**. Viseu-PT, n 31, p. 252-270, Maio de 2005.

SOUZA, L. W. P., ARAÚJO, R. O., CAMPOS, H. R. A., RODRIGUES, M.S., VARELLA, R. A., CAIXETA, L. R. GONÇALVES, S. C. S., SILVA, R. M. VERAS, C. A. G. Estudo de motores à combustão interna alimentados com combustível aditivado com hidrogênio. 2010.

TORRES, E. A., SANTOS, D. C., SOUZA, D. V. D., PEIXOTO, L. B., FRANÇA, T. Ensaio de motores estacionários do ciclo diesel utilizando óleo diesel e biodiesel(B100).2006.

VÉRTICES. **Biodiesel: uma energia alternativa e verde**. Campos dos Goytacazes/RJ. p. 17-40, set./dez. 2010.

