

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ANDRÉ ADRID ZANATELLE CRIZOL**

**GERADOR DE HIDROGÊNIO: construção, vantagens e aplicações no motor à  
combustão.**

**Varginha**  
**2020**

**ANDRÉ ADRID ZANATELLE CRIZOL**

**GERADOR DE HIDROGÊNIO: construção, vantagens e aplicações no motor à  
combustão**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Esp. Erik Vitor da Silva.

**Varginha**

**2020**

**ANDRÉ ADRID ZANATELLE CRIZOL**

**GERADOR DE HIDROGÊNIO: construção, vantagens e aplicações no motor à  
combustão.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho em primeiro lugar, a Deus, pela ajuda e sabedoria para enfrentar os desafios do cotidiano e também a minha família que me incentivou durante a minha trajetória, com apoio constante e compreensão. E ainda aos meus colegas de curso que participaram nos momentos de diálogo e discussões para desenvolvimento de ideias e esclarecimento de dúvidas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter me concedido saúde e força para que fosse possível superar as dificuldades. Aos meus pais por todo amor, apoio e incentivo que me deram desde sempre. Ao meu orientador, pelo suporte e colaboração no desenvolvimento deste trabalho. Aos colegas que tiveram comigo durante toda a trajetória com toda ajuda que me foi dada. Aos meus amigos, pela confiança e incentivo. A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, o meu muito obrigado.

“Os três grandes fundamentos para se conseguir qualquer coisa são, primeiro, trabalho árduo; segundo, perseverança; terceiro, senso comum.”

Thomas Edison

## RESUMO

Este trabalho está direcionado na retratação do setor de energias renováveis, com ênfase em sistemas de geradores de hidrogênio por meio da eletrólise da água, adicionando este gás ao combustível auxiliar do automóvel. Tais fatores voltados na abordagem de informações preponderantes como funcionamento, curiosidades e fundamento teórico dessa tecnologia e seus agregados. Assim, apresentando brevemente a história sobre o gás hidrogênio, propriedades químicas e mecânicas e estudo científico a respeito do sistema de eletrólise da água e aplicando aos motores de combustão interna. Posteriormente será relatado os testes comparativos da aplicação em um automóvel com e sem a adição do gás em questão.

**Palavras-chave:** Energia renovável, gerador de hidrogênio, Hidrogênio, eficiência, água.

## ***ABSTRACT***

This work is aimed at portraying the renewable energy sector, with an emphasis on hydrogen generator systems through water electrolysis, adding this gas to the car's auxiliary fuel. Such factors focused on addressing preponderant information such as operation, curiosities and theoretical foundation of this technology and its aggregates. Thus, briefly presenting the story about hydrogen gas, chemical and mechanical properties and scientific study about the water electrolysis system and applying it to internal combustion engines. Later, comparative tests of the application in a car with and without the addition of the gas in question will be reported.

**Keywords:** Renewable energy, hydrogen generator, hydrogen, efficiency, water.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Hidrogênio .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Propriedades.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Características.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Aplicações .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Hidrogênio como combustível .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Autoignição.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Octanagem .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Vantagens no uso do hidrogênio como combustível .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Poder Calorífico .....</b>	<b>20</b>
<b>2.5</b>	<b>Eletrólise .....</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>Eletrólise dentro da célula .....</b>	<b>22</b>
<b>2.7</b>	<b>Eletrólise em solução aquosa .....</b>	<b>22</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Eletrólitos.....</b>	<b>24</b>
<b>2.8</b>	<b>Primeira Lei da Eletrólise .....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Rendimento nos motores de combustão interna .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Quatros Tempos do Motor .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Admissão da mistura - Primeiro Tempo.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Compressão da mistura - Segundo Tempo.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Expansão da mistura - Terceiro Tempo .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Escape dos gases - Quarto Tempo .....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>GERADOR DE HIDROGÊNIO .....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Métodos de pesquisa .....</b>	<b>34</b>

<b>5.2</b>	<b>Métodos laboratoriais .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Bancada de testes .....</b>	<b>36</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Teste em campo .....</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>6.1</b>	<b>Ensaio laboratoriais .....</b>	<b>37</b>
<b>6.2</b>	<b>Volume do hidrogênio .....</b>	<b>38</b>
<b>6.3</b>	<b>Massa de hidrogênio produzida .....</b>	<b>40</b>
<b>6.4</b>	<b>Potência no processo.....</b>	<b>41</b>
<b>6.6.1</b>	<b>Vantagens .....</b>	<b>43</b>
<b>6.6.2</b>	<b>Desvantagens .....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>52</b>
	<b>APÊNDICE C: .....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento da Eletrólise.....	21
Figura 2 - Gerador de hidrogênio por eletrólise .....	24
Figura 3 - Estrutura de um motor de combustão interna de 4 tempos.....	28
Figura 4 - Gráfico ciclo Otto real .....	30
Figura 5 - Gráfico ciclo Otto ideal.....	30
Figura 6 - Gerador de hidrogênio utilizado nos testes laboratoriais.....	35
Figura 7 - Gerador de hidrogênio em bancada. ....	36
Figura 8 - Gerador de hidrogênio aplicado ao carro.....	37
Figura 9 – Placa Aço Inox 304 .....	42
Figura 10 – Vista Isométrica do Gerador Hidrogênio .....	51
Figura 11 – Vistas do Gerador de Hidrogênio.....	52
Figura 12 – Fichas técnicas de aço inoxidável .....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Informações técnicas do hidrogênio.....	17
Quadro 2 – Comparativo da ignição de alguns combustíveis. ....	18
Quadro 3 - Comparação da octanagem de alguns combustíveis .....	19
Quadro 4 – Comparativo do potencial energético. ....	19
Quadro 5 - Poder calorífico de diferentes combustíveis.....	20
Quadro 6 - Exemplos de eletrólitos fortes e eletrólitos fracos .....	25
Quadro 7– Aferições de dados executados em laboratório .....	38

## LISTA DE FORMULAS

Equação (1).....	22
Equação_(2).....	22
Equação_(3).....	22
Equação_(4).....	23
Equação_(5).....	23
Equação_(6).....	23
Equação_(7).....	23
Equação_(8).....	25
Equação_(9).....	26
Equação_(10).....	26
Equação_(11).....	31
Equação_(12).....	32

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da utilização do hidrogênio em motores de combustão interna, se faz necessária, embasada em informações que circulam atualmente nas mídias formais e informais, a respeito do alto nível econômico de combustível que o gerador de hidrogênio proporciona ao veículo, agregado ao protótipo.

Desde o início da utilização de energia, a matriz energética é conduzida pelo o uso de combustíveis fósseis, o que proporciona uma grande preocupação devido ao alto índice de emissão de gases poluentes na atmosfera, sendo os mais agravantes são: dióxido de azoto, monóxido de carbono, e compostos orgânicos voláteis ao quais estes os que são prejudiciais à saúde e também ao ecossistema. É para tais fins a necessidade de gerar energias alternativas não poluentes e renováveis tratando do estudo de células de combustível.

As células são desenvolvidas com a finalidade de produzir hidrogênio (gasoso) podendo ser utilizado como energia elétrica e energia térmica, essa uma maneira simples de se produzir hidrogênio é através da eletrólise da água, de modo geral, é dizer a realização do processo por meio de transdutores eletroquímicos, em um processo contínuo conversão de água em energia, através de eletrolise.

A partir disso, torna-se fidedigno o desmistificação de informações sobre uma possível economia no consumo de combustível, aliada à existência do gerador de hidrogênio, conectado ao motor de um veículo automotivo de combustão interna.

De certa forma, este tipo de analogia trará com retratação os impactos, vantagens e aplicações do gerador de hidrogênio associado a um automóvel à combustão interna.

Embasado nesta análise, as propriedades do gerador de hidrogênio e leva em consideração os pontos positivos de seu uso devido com baixo impacto ambiental, alta densidade energética gerada, maneiras de utilização do gás em sistema MCI, propriedades relevantes deste combustível e sua utilização no carro.

Este tipo de pesquisa tem como embasamento o emprego do gás hidrogênio como fonte de energia complementar a queima da gasolina em veículos automotores, descrever o processo de produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água, adaptar o sistema, apresentar uma relação dos benefícios desta aplicação com a utilização e sem o gerador.

A exploração dos processos de obtenção de hidrogênio por meio da eletrólise é tratada com fundamentação base no transcorrer da ideia, além da comparação das diferentes tecnologias do gerador de combustível, avaliação da aplicabilidade deste tipo de combustível em uma célula para a produção de energia limpa, sendo isto com quesito de verificação dos

benefícios e vantagens de cada método, apresentando a aplicação num motor com Ciclo Otto e também como possibilidade de pesquisa menos aprofundada no motor Ciclo Diesel.

Desta forma, esta célula é desenvolvida por meio de eletrólise atuando como base para testes comparativos de potência, rendimento e emissão de poluentes, expondo diagramas e gráficos que demonstrem de maneira visual os valores e os resultados alcançados;

Tal logo, a retratação da ideia é embasada que na utilização de energia, a matriz energética, é conduzida pelo o uso de combustíveis fósseis, gerando uma grande preocupação, uma vez que a maior parte de emissão de gases poluentes no nosso planeta está vinculada a queima desse combustível. Os poluentes mais agravantes são: dióxido de azoto, monóxido de carbono, e compostos orgânicos voláteis em geral que prejudicam a nossa saúde e também o nosso ecossistema.

Devido à necessidade de gerar energias alternativas não poluentes e renováveis vem sendo feito o estudo de células de combustível. As células são desenvolvidas com a finalidade de produzir hidrogênio (gasoso) podendo ser utilizado como energia elétrica e energia térmica. Uma maneira simples de se produzir hidrogênio é através da eletrólise da água, de modo geral, processo consiste em transdutores eletroquímicos, que em um processo contínuo converte essa água em energia.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Hidrogênio**

O gás hidrogênio foi o primeiro produzido artificialmente. O alquimista Theophrastus Bombastus Von Hohenheim produziu um ar explosivo que nem imaginava que era um novo elemento químico. Em 1766, o químico Henry Cavendish o definiu como uma substância química individual, porém somente em 1783 ele foi chamado de hidrogênio por Antoine Lavoisier, que descobriu a fórmula da água. O hidrogênio é o elemento mais encontrado no universo, cerca de 75% de sua massa, mas na crosta terrestre quase não é encontrado, com cerca de 0,9% de sua massa.

Foi liquefeito pela primeira vez, ou seja, passado do estado gasoso para o estado líquido, por James Dewar em 1898 ao usar resfriamento regenerativo em uma invenção parecida com uma garrafa térmica, e no ano seguinte produziu hidrogênio sólido. (COSTA, 2014)

### **2.1.1 Propriedades**

O hidrogênio é um gás muito leve, de baixa densidade, é incolor, inodoro, insípido, altamente inflamável e quase insolúvel em água. Não produz muitas reações em condições normais, porém nas condições apropriadas reage diretamente com a maioria dos elementos. Sua molécula é muito estável e apresenta pequena probabilidade de se separar em temperaturas normais, já que sua reação para que isso aconteça é muito endotérmica, ou seja, absorve muito calor. Porém em temperaturas muito elevadas, em um arco elétrico ou sob radiação ultravioleta, ela se separa. (ESTÊVÃO,2008)

### **2.1.2 Características**

Apresenta ponto de fusão, passagem do estado sólido para o estado líquido, a uma temperatura  $-259,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e ponto de ebulição, passagem do estado líquido para o estado gasoso a uma temperatura de  $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (FURLAN, 2012)

A estrutura atômica do hidrogênio é a mais simples entre todos os elementos químicos, contendo no seu núcleo um próton com carga  $+1$ , com um elétron em seu redor. É encontrado na natureza também em três formas isotópicas, ou seja, contendo o mesmo número de prótons entre eles. O hidrogênio, que contém em seu núcleo um próton e em sua volta um elétron orbitando, o deutério, que contém em seu núcleo um próton e um nêutron e em sua volta um elétron orbitando, e o trítio que contém em seu núcleo um próton e dois nêutrons e em sua volta um elétron orbitando. (FEITOSA, BARBOSA e FORTE, 2016)

### **2.1.3 Aplicações**

Apresenta importantes aplicações, tais como: hidrogenação de óleos vegetais para obtenção de margarinas, produção de amônia, produção de ácido clorídrico, na síntese do metanol, em reações que exigem atmosfera redutora, como as reduções de minérios, em balões-sonda para pesquisas na alta atmosfera, em processos especiais de soldagem, como o processo oxídrico e o processo que envolve hidrogênio atômico, indústria de corantes, combustível de foguetes. (MEYER, 2016)



Quadro 1 - Informações técnicas do hidrogênio.

<b>Informações sobre o Hidrogênio</b>	
Simbologia	H
Coloração	Incolor
Estado físico a temperatura e pressão ambiente (21-23 °C)	Gás
Temperatura de autoignição	584°C
Ponto de Ebulição	- 252,8°C (na pressão de 1 atm)
Temperatura de chama (°C)	2.045
Limite de inflamabilidade no ar	Inflamável entre as concentrações de 4% a 75% de H <sub>2</sub> por volume
Velocidade de propagação da chama ao ar (m/s)	2,65
Toxicidade	Não
A energia contida em 1m <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> equivale a 0,34 litros de gasolina	
A energia contida em 1 kg de H <sub>2</sub> equivale a 2,75 kg de gasolina (baseado no valor calorífico)	
A energia contida em 1 litro de hidrogênio líquido equivale a 0,26 litros de gasolina	
Massa atômica do H <sub>2</sub> = 1,00784	

Fonte: Adaptado de (WOLLMANN, 2013); (PICHELI, 2018)

## 2.2 Hidrogênio como combustível

O hidrogênio contém excelentes propriedades, por exemplo, um quilo de hidrogênio possui aproximadamente a mesma quantidade de energia que 3,5 litros de petróleo ou 2,1 kg de gás natural ou 2,8kg de gasolina, e ele pode ser obtido facilmente por se encontrar em alta quantidade em todo ao nosso redor, por exemplo, a eletrólise da água ou por reforma de álcool ou hidrocarbonetos metanol, etanol, metano, gás natural e outros, etc. Assim, é considerado por muitos o “combustível ideal”. (NADALETI,2017)

Quando produzido por fontes de energia renováveis, como nas células de combustível ela forma uma energia totalmente limpa, pois, libera apenas H<sub>2</sub>O, e não libera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), como na queima da gasolina, onde são responsáveis por problemas ambientais tais como: chuvas ácidas, problemas respiratórios e pelo aquecimento global do planeta. (CAMARGO,2004)

Sendo assim, o hidrogênio tem um grande potencial ambiental, fazendo parte de um ciclo de vida limpo, tornando-se um sério candidato a substituir muitos combustíveis derivados do petróleo. (SOUZA, 2010)

### 2.2.1 Autoignição

A autoignição é a mínima temperatura requerida o surgimento de uma combustão sustentável em uma mistura combustível sem que haja uma fonte ignitora. Desta forma, é basicamente o aquecimento do combustível até que este queime em chamas. Sendo que cada combustível possui uma temperatura de ignição única, logo para combustível hidrogênio a temperatura de autoignição é relativamente alta, sendo de 585<sup>0</sup>C, se tornando difícil de gerar uma mistura de ar/hidrogênio somente com calor, sem uma efetiva fonte de ignição acrescida WOLLMANN (2013).

Como melhor representatividade o Quadro 2 mostra um comparativo da temperatura de autoignição de alguns combustíveis.

Quadro 2 – Comparativo da ignição de alguns combustíveis.

Combustível	Temperatura de autoignição
Hidrogênio	585°C
Metano	540°C
Propano	490°C
Gasolina	230 a 480°C
Metanol	385°C

Fonte: WOLLMANN (2013).

### 2.2.2 Octanagem

Conforme WOLLMANN (2013) descreve, a quantidade ou número de octanagem é aquele em que descreve as propriedades de um combustível de suportar à explosão por pressão, isto quando utilizados nos motores de combustão interna.

O sistema de auto detonação é uma espécie de detonação secundária ocasionada posteriormente ao tempo de ignição do combustível, ocorrendo isso devidamente ao calor elevar em algum ponto específico da câmara de combustão, gerado de forma que esta temperatura interna extrapole a temperatura de autoignição do combustível.

O desempenho do octano de combustíveis hidrocarbonetos é aplicado como uma forma de norma para aferir a resistência a batidas em que este valor relativo é predeterminado em 100. O combustível hidrogênio contém um grande número de octano e também é resistente a auto detonação sempre que possui sua queima sob condições de misturas debilitadas.

Quadro 3 - Comparação da octanagem de alguns combustíveis

<b>Combustível</b>	<b>Octanagem</b>
Hidrogênio	130 + (queima branda)
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Metanol	30

Fonte: WOLLMANN (2013).

### 2.3 Vantagens no uso do hidrogênio como combustível

O hidrogênio é altamente recomendado por estar em abundância na atmosfera, se tornando de fácil obtenção. Por ser altamente volátil e leve, se torna versátil, podendo ser adaptado em várias atividades, como por exemplo: geração de energia térmica, e elétrica, entre outros. (SOUZA, 2010)

Perante uma verificação comparativa evidencia-se o quadro 2, com o devido comparativo do potencial energético de alguns combustíveis, juntamente com suas formas de armazenamento.

Quadro 4 – Comparativo do potencial energético.

Portador de energia	Forma de Armazenamento	Densidade de energia por massa (KWh/kg)	Densidade de energia por volume (KWh/m <sup>3</sup> )
Hidrogênio	Gás (200 atm)	33,3	0,53
	Gás (300 atm)	33,3	0,75
	Gás (800 atm)	33,3	2,92
	Líquido (-253 °C)	33,3	2,36
	Hidretos metálicos	0,58	3,18
Gás natural	Gás (200 atm)	13,9	2,58
	Gás (300 atm)	13,9	3,38
	Líquido (-162 °C)	13,9	5,8
GLP	Líquido	12,9	7,6
Metanol	Líquido	5,6	4,42
Gasolina	Líquido	12,7	8,76
Gasóleo	Líquido	11,7	9,7
Eletricidade	Bateria (Ácido - Chumbo)	0,05	0,1
	Bateria (Íons de Lítio)	0,25	0,05

Fonte: ALMEIDA (2005).

## 2.4 Poder Calorífico

O Poder Calorífico de combustíveis é definido como a quantidade de energia interna contida no combustível, sendo que quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida. (SANTOS, 2003).

Quadro 5 - Poder calorífico de diferentes combustíveis

Poder Calorífico de diferentes combustíveis	
Hidrogênio	141,86 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g
Propano	50,3 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g

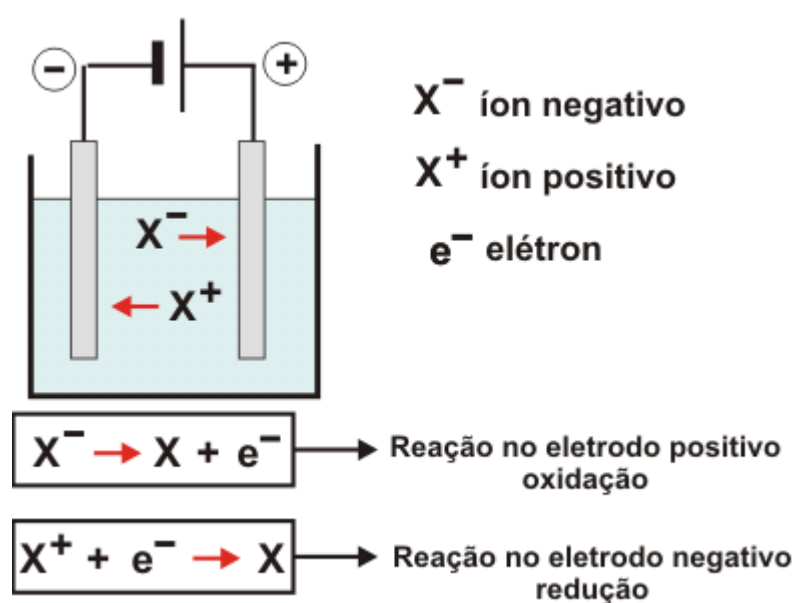
Fonte: Santos, (2003).

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 pesados átomos do carbono. É por esta razão que o hidrogênio tem sido usado intensamente nos programas espaciais onde o peso é levado em conta. Especificamente a quantidade de energia liberada 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. (SANTOS, 2003).

## 2.5 Eletrólise

A eletrólise (do grego, eletro=eletricidade e lisis=decomposição) é um processo que divide os elementos químicos (átomos) de um composto por meio da eletricidade. Acontecendo inicialmente a decomposição (ionização ou separação) do composto em íons e, em seguida, com a passagem de uma corrente contínua, obtêm-se os elementos químicos. Em diversos casos, a substância a ser eletrolisada e do meio em que acontece, podem-se desenvolver além de elementos, novos compostos. O método de eletrólise é uma reação de oxirredução que consistem em um fenômeno químico-físico não espontâneo devido à necessidade de energia para que o mesmo ocorra. (BIANCHI, 2005)

Figura 1 – Funcionamento da Eletrólise

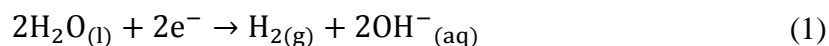


Fonte: Alfa Connection (2020).

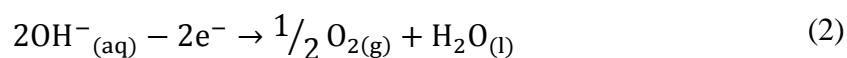
## 2.6 Eletrólise dentro da célula

A eletrólise que ocorre na célula é a que denominamos de eletrolise alcalina da água, ela se baseia em um método pelo o qual a água flui por uma câmara composta por placas energizadas de aço inoxidável. Essa DDP (diferença de potencial) exercida entre as placas mais a solução condutora iônica líquida ( $H_2O + NaOH$ ), faz com que a ligação de hidrogênio se rompa, assim, no mesmo instante os íons positivos se movem em direção ao polo negativo e os íons negativos em direção ao polo positivo com a ação do campo elétrico formado. Após essa primeira fase, a força gerada pela negatividade do elétron faz com que o íon H tenha uma redução transformando-se em gás hidrogênio. (FURLAN, 2012)

No cátodo (polo negativo):



No ânodo (polo positivo):



Total:



(FURLAN, 2012)

## 2.7 Eletrólise em solução aquosa

A energia de ionização transforma de um elemento para outro e aumenta o mesmo para um número de elétrons extraídos; da mesma maneira, a relação eletrônica de um átomo existente é mesma com uma ou outra, perante o elemento químico analisado. Quando esta é submetida à eletrólise uma solução aquosa de cloreto de sódio, os cátions  $Na^+$  e os ânions  $Cl^-$  destinam-se na devida ordem para o cátodo e para o ânodo, porém as reações que aí se verificam provocam a separação de  $H_2$  e  $O_2$ , conforme as equações (ROZENBERG, 2002):

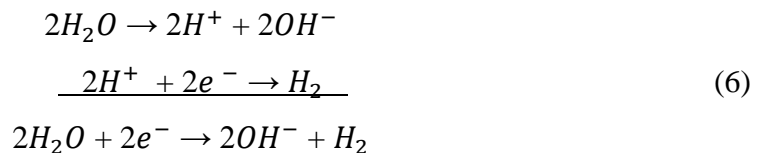
a) No cátodo:



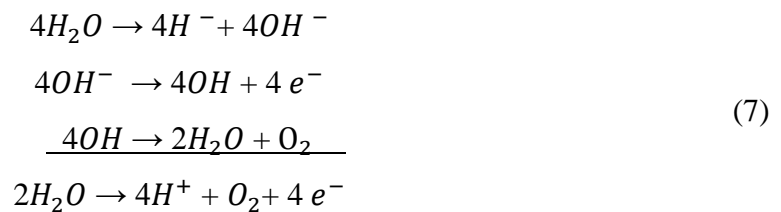
b) No ânodo:



Devido ao que propõem essas duas equações, tudo se ocorre como se, no cátodo, houvesse o aprisionamento dos elétrons ocorridos pelos íons  $H^+$  provindos da ionização da água (ROZENBERG, 2002):



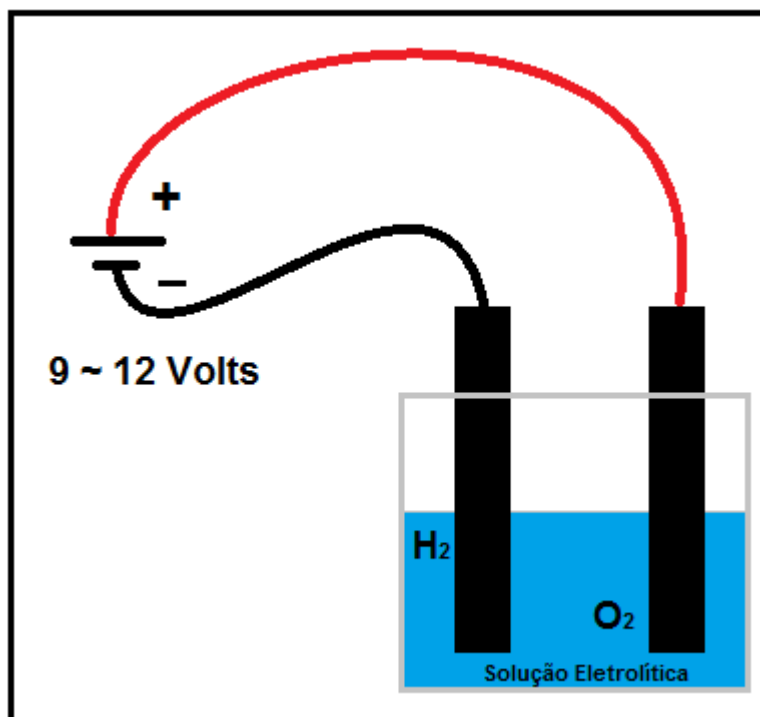
E assim, no ânodo a libertação de elétrons gerados pelos íons  $OH^-$ :



Os efeitos observados na eletrólise de soluções aquosa de outros eletrólitos não diferenciam, consideravelmente, aos que foram de ser descritos para a solução aquosa de  $NaCl$  (ROZENBERG, 2002).

Sendo assim, no cátodo, ocorre a formação do gás hidrogênio, logo se sabe que  $H^+$  ou  $H_2O$  passou por uma redução. A concentração de moléculas  $H_2O$  na solução aquosa de  $NaOH$  é consideravelmente muito maior que a dos íons  $H^+$ , podendo ser de aproximadamente 560 milhões de vezes maior (RUSSEL, 1994).

Figura 2 - Gerador de hidrogênio por eletrólise



Fonte: O autor (2020)

### 2.7.1 Eletrólitos

A partir das primeiras experiências com eletricidade, observou-se que as soluções de algumas substâncias conduzem eletricidade. Os solutos que geram este efeito em solução são denominados de eletrólitos. A princípio foi demonstrado por Arrhenius, em 1887, que existem vários casos referentes ao processo de dissolução é acompanhado pela dissociação ou ruptura de moléculas. Foi verificado que eletrólitos invariavelmente pertencem a um dos três grupos de compostos: ácidos, bases ou sais. Uma solução de um eletrólito proporciona uma melhor condução de eletricidade do que o solvente puro (MAHAN, 1997).

Os eletrólitos são enquadrados como fortes quando geram soluções boas condutoras, dissociando-se totalmente, ou fracos, quando geram soluções levemente condutoras. A água é usada como solvente principal. Um eletrólito pode ser iônico ou molecular. São dados alguns exemplos de eletrólitos fortes e eletrólitos fracos na tabela 2.



Quadro 6 - Exemplos de eletrólitos fortes e eletrólitos fracos

Eletrólitos Fortes		Eletrólitos Fracos	
<i>HCl</i>	Ácido clorídrico	<i>HC<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub></i>	Ácido acético
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sódio	<i>NH<sub>3</sub></i>	Amoníaco
<i>NaCl</i>	Cloreto de sódio	<i>HgCl<sub>2</sub></i>	Cloreto de mercúrio
<i>KCN</i>	Cianureto de potássio	<i>HCN</i>	Ácido cianídrico
<i>BaSO<sub>4</sub></i>	Sulfato de bário	<i>CdSO<sub>4</sub></i>	Sulfato de cádmio

Fonte: MAHAN, 1997

## 2.8 Primeira Lei da Eletrólise

Segundo retratado por SANTOS (2019), primeira Lei da Eletrólise descrito por Faraday em 1952, cita que a massa de um elemento, depositado ou liberado em qualquer eletrodo, é devidamente proporcional à relação a carga que passante pelo sistema. Dessa forma não é explicada o porquê ocorre a deposição da massa da substância sendo a proporcional à eletricidade, contudo, esta lei é capaz de ser utilizada para realização dos cálculos e embasamentos que envolvam o sistema eletrolítico.

Com avanço da teoria atômica e das ligações químicas, somente assim, descobriu-se os efeitos que ocorrem na eletrólise e logo possibilitou serem exemplificados retratando assim um melhor entendimento para este acontecimento. Resumindo, esta lei se define na seguinte fórmula:

$$Q = i \cdot t \quad (8)$$

As variáveis representam:

Q: Carga elétrica em Coulomb (C);

i: Corrente elétrica em Amperes (A);

t: Tempo da passagem da corrente elétrica em segundos (s);

Prosseguindo, segundo RUSSEL (1994), por meio da carga elétrica em Coulomb representada pela equação (1), é possível calcular o valor do volume inicial ( $V_0$ ) do gás hidrogênio produzido pelo gerador, e levando em consideração a constante Faraday (1F), representada pela lei da eletrólise, equivalendo a 96500 C e a constante de 22,4, embasados no

volume molar provindos de um gás nas devidas Condições Padrão de Temperatura e Pressão (CNTP).

$$2 \cdot 96500 = 22,4 \quad (9)$$

$$Q = V_0$$

As variáveis representando:

$V_0$ : Volume inicial dado em litros (L);

Q: Carga elétrica dado em Coulomb (C);

22,4: Constante de volume em litros que 1 mol de um determinado gás ocupa CNTP (L);

96500: Constante de Faraday (1F);

Utiliza-se o procedimento de regra de três e como embasamento fórmula de condições normais de temperatura e pressão (CNTP), posteriormente a resolução da equação (2) torna-se possível encontrar o volume final do gás hidrogênio ( $V_1$ ).

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} \quad (10)$$

Onde:

$P_0$ : Pressão inicial em milímetros de mercúrio (mmHg)

$V_0$ : Volume inicial em litros (L)

$T_0$ : Temperatura inicial em Kelvin (K)

$P_1$ : Pressão final em milímetros de mercúrio (mmHg)

$V_1$ : Volume final em litros (L)

$T_1$ : Temperatura final em Kelvin (K)

### 3 MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA

Atualmente, nota-se que a maior parte dos automóveis utilizam como forma de deslocamento os motores cujo ciclo de combustão é de quatro tempos. Esse modelo transforma a energia que a gasolina/etanol acumula em movimento, ou seja, converte a energia termoquímica parcialmente em mecânica. Este processo é denominado por Ciclo Otto (WOLLMANN, 2013).

Embasado em estudo científico pode-se dizer que o motor de combustão interna (MCI) foi uma das criações que mais geraram impactos no mundo, sendo economicamente e também no meio ambiente. Diversos pesquisadores foram responsáveis pelo desenvolvimento dos motores de combustão interna com o decorrer tempo, porém foi Nicolaus Otto, em 1876, desenvolveu um motor moderno de ignição por centelha, e sendo Rudolf Diesel, em 1892, que expôs a sociedade o primeiro motor funcional de ignição por compressão. Desta forma foram ambos os responsáveis por revelar os motores de combustão interna ao mundo com a funcionalidade e praticidade de suas invenções, tendo estes tipos de motores utilizados há muito tempo e principalmente pela indústria automobilística (ALAGUMALAI, 2014).

“Nos motores de combustão interna, ou endotérmicos, o combustível é queimado no interior do cilindro motor. Os motores a gasolina, a gasóleo, a metano e a gás líquido pertencem a esta categoria.” (LIMA, 2009, p.04).

O MCI é uma máquina térmica, ou seja, é um mecanismo que converte a energia obtida em forma de calor transformando em trabalho. Nestes motores, é necessário o calor para conversão em trabalho, sendo adquirido através da queima de combustíveis ocorrendo dentro das câmaras de combustão do motor. Assim, combustível ativo na existência de ar participa diretamente da combustão (BRUNETTI, 2012).

Os motores que apresentam o procedimento de combustão interna geram trabalho por meio da queima de combustível, o seu princípio básico de desempenho tende a explorar ao máximo, o aumento de pressão dado pela reação de combustão entre o ar e o combustível, a fim de se gerar movimento de rotação no motor de um automóvel (MACHADO, 2014).

O MCI é uma máquina térmica, ou seja, é um mecanismo que converte a energia obtida em forma de calor transformando em trabalho. Nestes motores, é necessário o calor para conversão em trabalho, sendo adquirido através da queima de combustíveis ocorrendo dentro das câmaras de combustão do motor. Assim, combustível ativo na existência de ar participa diretamente da combustão (BRUNETTI, 2012).

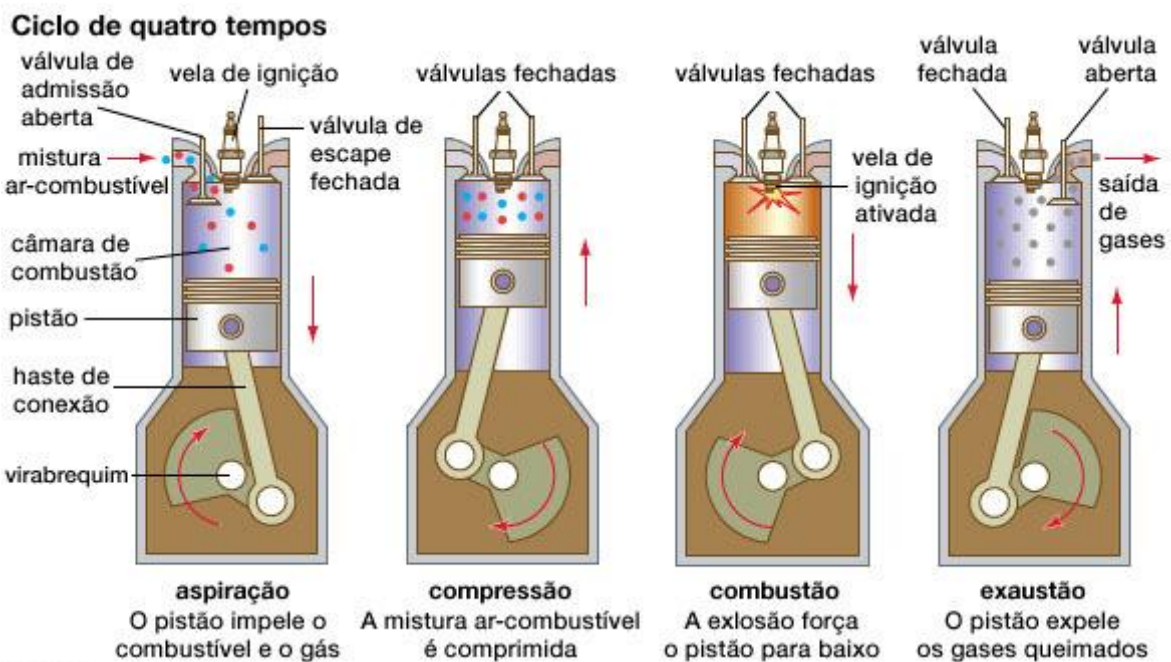
Embasado nas pesquisas do francês Nicolas Léonard Sadi Carnot, físico e desenvolvedor dos princípios da segunda Lei da Termodinâmica, os motores de combustão interna não possuem 100 % de sua eficiência, dentre algumas razões para ocorrência disso é devidamente ao combustível de trabalho não ser capaz concluir um ciclo, visto que a mistura de admissão se converterá nos gases de escape e liberará para a atmosfera, não havendo a troca de calor entre dois recipientes térmicos e a eficiência máxima do motor nem sempre coincidirá com a alta temperatura produzida pelo sistema (SEIFFERT; BRAESS, 2005).

A partir deste período de criação até a atualidade, as máquinas térmicas passaram por diversas mudanças estruturais, conduzindo o desenvolvimento da tecnologia nos processos de fabricação mecânica, nas áreas de materiais, tecnologia eletroeletrônica, entre outras que se aplicam. O rendimento térmico do período de sua criação não passava dos 10 %, atualmente se aproxima de 40 % em alguns motores de ciclo diesel moderno (WILLARD, 2004).

Embora o rendimento provavelmente baixo, a explicação da utilização das máquinas térmicas é embasada na eficiência de deslocamento que elas proporcionam, pois amplos descobrimentos da humanidade, viagens e deslocamento de utensílios foram e ainda são efetuadas com propulsão de motores de combustão interna (ROSA, 2014).

A imagem a representada abaixo, indica a estrutura básica de um motor de combustão interna de quatro tempos, determinando representativamente as peças que o compõe e o processo detalhado que ocorre durante o sistema da combustão.

Figura 3 - Estrutura de um motor de combustão interna de 4 tempos.



Fonte: Adaptado de (FOGAÇA, 2020).

O objetivo de um motor de combustão interna é a elaboração de potência mecânica a partir da energia química contida no combustível (DA SILVA, 2017).

Neste âmbito, Martins (2006) complementa dizendo que os motores de combustão interna são máquinas que por meio de da queima de combustível geram trabalho.

O ciclo Otto foi criado por Otto e seus dois irmãos, os primeiros protótipos que utilizavam o motor com essa configuração, foram amplamente aceitos devido à maior

desempenho e devido ao fato de ser mais silenciosos que os modelos concorrentes (DA ROSA, 2015).

Motores de ciclo Otto, são conhecidos por apresentarem volume constante, ar e combustível são aspirados para dentro do cilindro antes da etapa de compressão. Dá-se início ao processo de combustão a partir de uma elevada descarga elétrica de tensão, nomeada de faísca, que se origina através da vela de ignição presente no automóvel (MACHADO, 2014).

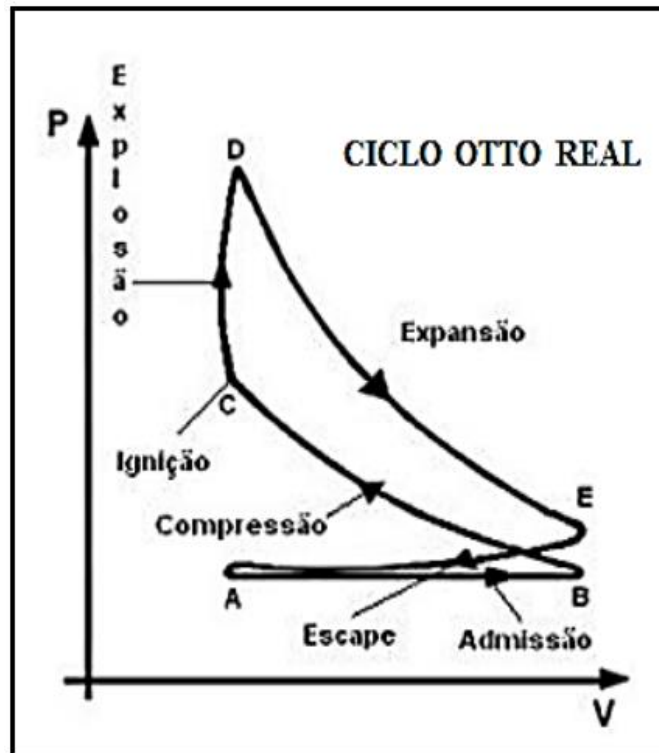
Caracteriza-se como ciclo Otto, motores de combustão interna cujo processo utiliza a mescla de ar e combustível que vem diretamente do carburador, em proporções específicas. Esse tipo de mistura é aspirado para a câmara de combustão, onde a partir de uma centelha produzida por uma vela de ignição, causa o processo de combustão (SENRA; DE LIMA; DE ABREU, 2014).

Com base em Da Silva (2017, p. 32) “Os motores de ignição por centelha têm como ciclo termodinâmico básico de referência o ciclo Otto”. Silva (2016, p. 46) complementa dizendo que “O ciclo Otto se diferem quanto ao modo em que o calor é adicionado, o mesmo se assemelha a um motor por ignição por centelha, no qual a combustão é feita a volume constante”.

“As diferentes formas de funcionamento dos tipos de motores criam características distintas que obedecem ao ciclo proposto por Otto e Diesel e, de certa forma, direcionam suas aplicações. ” (BRUNETTI, 2012, p. 49).

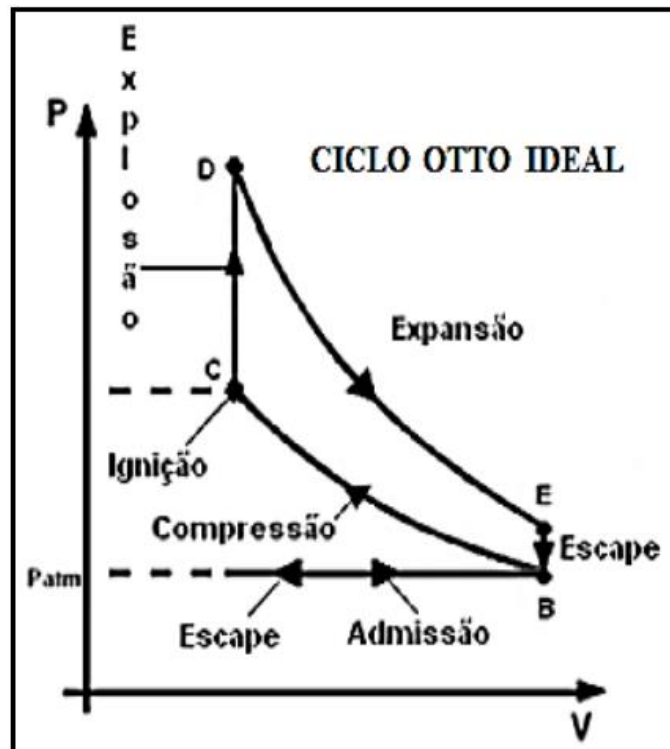
A figura 2, ciclo ideal, e figura 2, ciclo real, apontam os gráficos comparativos entre os dois modelos de ciclo Otto. Representado através do diagrama de pressão x volume, podendo destacar algumas variações tanto na compressão como no escape, pode-se perceber uma pequena variação no processo de explosão.

Figura 4 - Gráfico ciclo Otto real



Fonte: Adaptado de (WOLLMANN, 2013)

Figura 5 - Gráfico ciclo Otto ideal



Fonte: Adaptado de (WOLLMANN, 2013)

### 3.1 Rendimento nos motores de combustão interna

O rendimento, também denominado como rendimento, é apresentado pelo resultado positivo em que o processo de transformação ou conversão de energia é executado. De certa forma a equação da eficiência pode ser representado por meio da relação entre as variáveis de um valor desejado e aquele com fornecimento necessário (CARVALHO, 2011).

Logo, a eficiência de uma máquina é calculada pela razão entre o trabalho produzido (W) e a energia fornecida (Q) para o sistema conforme cita a expressão abaixo:

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{(P \cdot 1000)}{M_c \cdot H_c} = \frac{\text{resultado desejado}}{\text{fornecimento necessário}} \quad (11)$$

Onde:

$\eta$ : Rendimento do processo em percentual (%)

P: Potência gerada em Watts (W);

$M_c$ : Vazão mássica do combustível em quilograma por segundo ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$H_c$ : Poder calorífico inferior do combustível ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}$ );

W: Trabalho em Joules (J);

Q: Calor em Joules (J);

#### 3.1.1 Fator $\lambda$ e razão equivalente

O Fator Lambda é utilizado para medição do desvio da mistura realmente absorvida pelo cilindro relacionando a mistura ideal ou aquela considerada estequiométrica, podendo utilizar para a fim de caracterizar os diversos tipos de mistura, sem levar em consideração o tipo de combustível usado no automóvel (ABREU; LIMA; SENRA, 2014).

Considerando o coeficiente de excesso de ar sendo o lambda ( $\lambda$ ), ou fator  $\lambda$ , e a razão equivalente ( $\phi$ ) é possível efetuar a detecção da aproximação da proporção de razão ar-combustível da mistura previsto pelo valor estequiométrico.

Embasado nos fundamentos retratados por Heywood (1988) em que representam  $\lambda$ , consecutivamente, de forma que proporção da mistura ar-combustível estequiométrica é calculada quantitativa de ar teórico essencial e considerável para oxidação de toda a massa de combustível.

$$\lambda = \frac{\text{mistura ar - combustível utilizada}}{\text{mistura ar - combustível estequiométrica}} = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{at}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{st}} = \frac{m_{ar}}{m_c} \quad (12)$$

Onde:

A: ar atmosférico;

F: combustível admitido pelo motor;

at: relação real que está sendo admitida pelo motor kg/kg;

st: relação ideal estequiométrico kg/kg;

$m_{ar}$ : massa de ar admitida pelo motor;

$m_c$ : massa de combustível admitida pelo motor;

Conforme os valores de  $\lambda$ , essa mistura será identificada como rica quando o ar-combustível é ineficiente de ar para o composto, quando  $\lambda < 1,0$ ; pobre com a mistura ar-combustível excedente em ar, quando  $\lambda > 1$  e relativamente correta quando  $\lambda = 1,0$ .

## 3.2 Quatros Tempos do Motor

### 3.2.1 Admissão da mistura - Primeiro Tempo

Para o primeiro tempo do motor o pistão se desloca para baixo, do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI), gerando uma depressão no interior do cilindro. A válvula de admissão apresenta-se aberta e logo a mistura ar-combustível é suscetível de ser admitida, devido à depressão, para o interior do cilindro (DAMASCENA, GOÉS, 2013)

### 3.2.2 Compressão da mistura - Segundo Tempo

Nesta etapa a válvula de admissão é fechada e a de também a do escapamento continuará fechada. Logo o pistão começa a subir do PMI até PMS, e com isso, para os motores de ignição por centelha, a mistura ar-combustível começa a ser comprimida no interior câmara de combustão (DAMASCENA, GOÉS, 2013).



### 3.2.3 Expansão da mistura - Terceiro Tempo

Para expansão da mistura à vela de ignição faz saltar uma centelha no interior do cilindro ao final da compressão, isso dará início ao processo de combustão. Com as válvulas fechadas os gases queimados se propagam, assim sendo, o pistão a desce com grande impulsão até o PMI (DAMASCENA, GOÉS, 2013).

### 3.2.4 Escape dos gases - Quarto Tempo

O pistão encontra-se no PMI e novamente começa a subir em direção ao PMS, com a válvula de escapamento aberta, por onde saem os gases. Sendo assim, inicia-se um novo ciclo (DAMASCENA, GOÉS, 2013).

## 4 GERADOR DE HIDROGÊNIO

Para que seja possível o gerador de hidrogênio obter um bom desempenho e uma eficiência satisfatória, são fundamentais uma boa atividade eletrocatalítica e uma estabilidade dos eletrodos. Outros aspectos a serem avaliados se tratando do bom desempenho do gerador, seria a geometria das peças aplicadas no equipamento, a separação entre os eletrodos, os reativos que integram a água utilizada no processo químico da eletrolise, dentre outros (PEREIRA, 2017).

O gerador HHO se utilizará da energia provinda do alternador, isso como forma de alimentação para realização da eletrólise da água, produzindo o hidrogênio necessário adição ao combustível do veículo (ANTUNES, PENTEADO E GIBIN, 2017).

Para que seja garantido o desempenho contínuo do motor e dos demais acessórios do qual dependem de eletricidade, é fundamental uma fonte geradora de energia elétrica que seja capaz de sustentar toda a demanda do veículo. Essa fonte, denominada alternador, está ligada ao motor e fornece energia sempre que o motor se encontra em rotação. Esta ideia está embasada na verdade de que o automóvel deve gerar sua própria energia (ANTUNES, PENTEADO E GIBIN, 2017).

O gerador de hidrogênio a seco, dry cell, também conhecida como célula eletrolítica. São previamente alimentadas por uma tensão que origina de uma fonte ou bateria e seu funcionamento baseia-se em placas de material inox. Compõem-se de uma mistura de água e hidróxido de potássio que circula através dos furos da placa. As placas apresentam vedação

entre elas para que não aconteçam prováveis vazamentos, além disso, esse procedimento é fundamental pelo fato de se conseguir uma isolação quanto à polaridade de tensão provinda das baterias (FIGUEIREDO, 2018).

Conforme estabelecido pela empresa Aço Tubo (2016), e como embasamento de montagem citado por DE PAULA (2017) utiliza-se chapas do aço inox 304L, uma vez que este material é voltado para aplicações de equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, de laticínios, farmacêutica, cosmética, química; utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, fotografia, tubos e tanques em geral, estampagem geral e profunda.

## **5 METODOLOGIA**

Nessa unidade, serão descritos quais as técnicas foram utilizadas para a execução das pesquisas e dos testes laboratoriais, assim como o desenvolvimento que ocorrerá ao longo do trabalho.

### **5.1 Métodos de pesquisa**

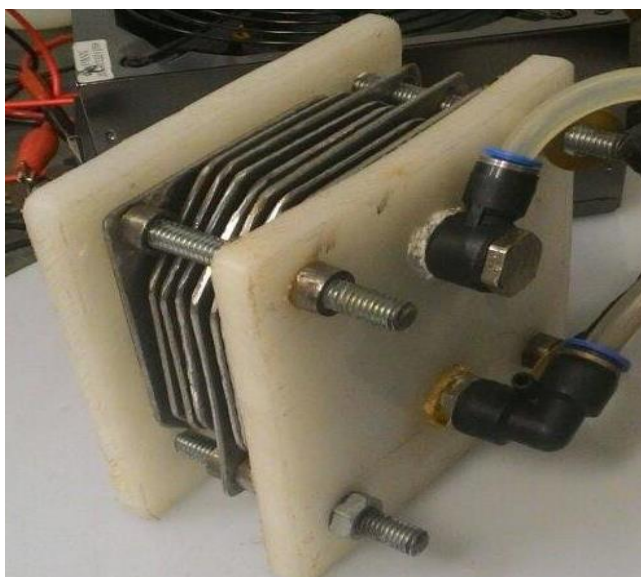
Para este projeto, efetua-se uma pesquisa bibliográfica, embasada em, por exemplo, teses de doutorado, dissertações de mestrado, artigos científicos dentre outros, ao quais estes contêm os materiais já elaborados sobre o assunto, em que ao citar os modelos de conversores de hidrogênio e como se constituem basicamente, se distinguem da forma como efetuam o processo de eletrólise sendo à interna ou externa,

Desta forma, encontra-se um constituído de duas placas de teflons postos às extremidades; onze placas de inox 304L de 1 mm espessura, localizadas no centro onde receberão a eletrólise; sendo elas separadas por doze anéis oring (anéis de vedação); tendo quatro barras roscadas montadas junto a oito porcas, localizadas aos quatro cantos do equipamento, em que serão usadas para unir e consolidação do contato necessário a todas as chapas de inox as carcaças de teflon. Para as ligações ao reservatório e ao terminal, usam-se mangueiras de poliuretano com 10 mm de diâmetro, na azul e quatro joelhos modulares pneumáticos (interconectores da mangueira ao conversor), também com 10 mm, plugadas ao gerador; além disso, utilizasse uma mescla água e soda cáustica para compor a solução e obter o hidrogênio.

A fabricação e a montagem do conversor representam o principal objetivo do projeto, é aproximar e representar às pesquisas realizadas as relacionando com prática, verificando os resultados do gerador e a construção da célula, que são basicamente divididos então em três partes, sendo descritas abaixo:

- Designação e coleta dos materiais
- Fabricação da célula de hidrogênio
- Montagem do protótipo

Figura 6 - Gerador de hidrogênio utilizado nos testes laboratoriais.



Fonte: O autor (2020).

## 5.2 Métodos laboratoriais

Como forma de análise do protótipo proposto, serão efetuados testes em laboratório simulado pelo um gerador de hidrogênio, demonstrando a quantidade deste gás que será produzida com uma determinada corrente elétrica e versus um período de tempo que este preencher um recipiente com capacidade de 1 litro, este preenchido com água, ou seja, será cronometrado o tempo que o hidrogênio tardará em retirar toda a água do recipiente, assim obtendo a vazão do gás por min.

Este ensaio servirá como estrutura para coleta dados que serão desenvolvidos em fórmulas, com intenção se comprovar que o uso do hidrogênio em motores de combustão interna é viável ou não.

### 5.2.1 Bancada de testes

Antecipadamente ao processo de inclusão do gerador num automóvel, são realizados testes a fim da confirmação do funcionamento e assim são dispostas as peças do projeto uma bancada.

Sendo assim, necessita-se das ligações da saída da solução do reservatório a entrada do conversor, posteriormente da saída do gerador à entrada superior do reservatório, onde ocorre à condensação do vapor de água, em seguida, utilizasse a segunda saída do reservatório para direcionar até a fase terminal, onde combustível eventualmente está no reservatório.

Na energização do protótipo, utilizasse uma fonte chaveada, com tensão de 12 Volts e corrente de até 10A, a fim de fornecer aos polos da célula alimentação.

Figura 7 - Gerador de hidrogênio em bancada.



Fonte: O autor (2020).

### 5.2.2 Teste em campo

A fim de avaliar e efetivar os dados de pesquisa do referencial teórico, realiza-se os testes em campo, ou seja, aplica-se o gerador em um automóvel, este trabalhando com motor de combustão interna em Ciclo Otto, da marca FIAT, modelo Uno Mille Fire 1.0 (Flex) 2005,

desta forma sendo realizado o balanceio de proporção de combustível gasto, viabilidade do sistema e aspecto de corrosão das placas de Aço Inox 304.

Figura 8 - Gerador de hidrogênio aplicado ao carro



Fonte: O autor (2020).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa, será brevemente apresentado os devidos resultados dos testes e ensaios realizados em laboratório e em campo, relatando a quantidade de hidrogênio gerada em relação a uma determinada corrente elétrica percorrida pelo gerador de hidrogênio. Isto é, com uma representação teórica da quantidade de hidrogênio em litros em relação ao tempo, sendo retida por meio dos cálculos, além da quantidade extraída nos testes de laboratórios. Desta forma, embasado nos estudos teóricos retratados neste trabalho serão apresentados alguns resultados e previamente confrontados.

### 6.1 Ensaio laboratoriais

Conforme previsto, de modo que fosse possível a realização dos testes, necessita levar em consideração alguns fatores para a coleta dos dados. Toma-se com critério de limite de tempo o volume de um balão volumétrico, ou seja, a contagem do tempo se embasa de acordo

com o limite um balão volumétrico de 1 litro, fosse totalmente ocupado pelos gases provenientes do processo de eletrólise, em que este estaria totalmente preenchido com água e os gases “empurrariam” o líquido para fora do balão. Logo foram considerados os valores da pressão atmosférica, temperatura e umidade foram levados em consideração de acordo com a localização da cidade de Varginha – MG, e no momento do teste respectivamente.

Quadro 7– Aferições de dados executados em laboratório

<b>1ª Aferição</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente elétrica (A)</b>	<b>Pressão atmosférica (hPa)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
128 s	12,1 Volts	10,2 Amperes	1024 hPa	23

<b>2ª Aferição</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente elétrica (A)</b>	<b>Pressão atmosférica (hPa)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
130 s	12,4 Volts	10,3 Amperes	1024 hPa	23

<b>3ª Aferição</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente elétrica (A)</b>	<b>Pressão atmosférica (hPa)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
127 s	12,3 Volts	10,5 Amperes	1024 hPa	23

Fonte: O Autor (2020)

De tal forma, para fins de realização dos cálculos foram utilizados o somatório da média de corrente elétrica e tempo médio de preenchimento do gás no balão. Isto é, possuindo como variáveis devidamente diretas a solução eletrólise (água mais eletrólito) e fonte geradora da corrente.

## 6.2 Volume do hidrogênio

Para a realização do cálculo volumétrico do hidrogênio, foram considerados os dados representados no quadro 03. Para começo dos cálculos será necessário encontrar a corrente elétrica, de acordo com a equação (1).

$$Q = i \cdot t$$

Logo, inclui-se os dados coletados, encontra-se a carga elétrica devidamente utilizada nos testes.

$$Q = 10,33 \cdot 128,33$$

$$Q = 1325,682 \text{ C}$$

Perante o cálculo do valor da carga elétrica (Q), obtém-se o volume inicial (V<sub>0</sub>) do hidrogênio gerado pelo sistema da célula. Logo o obtemos por meio da regra de 3, dada pela equação (2) citada no referencial teórico.

$$2 \cdot 96500 = 22,4$$

$$Q = V_0$$

$$2 \cdot 96500 = 22,4$$

$$1325,682 = V_0$$

$$V_0 = 0,1538 \text{ litros}$$

O valor declarado acima é o volume inicial de hidrogênio (V<sub>0</sub>), logo com este resultado pode-se encontrar calcular o volume final (V<sub>1</sub>).

Toma-se como base a fórmula de condições normais de temperatura e pressão dado pelo sistema CNTP, cidade pela equação (3).

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1}$$

$$\frac{760 \cdot 0,1538}{273} = \frac{768,063 \cdot V_1}{273 + 23}$$

$$V_1 = 0,165 \text{ litros}$$

Considerando que o gerador de hidrogênio possui 12 camadas, sendo assim o volume final deve ser multiplicado por 12.

Um ponto importante que se deve destacar é o fato de os durante os ensaios realizados ocorrem na presença de dois gases, o hidrogênio e o oxigênio. Logo, é necessário subtrair  $\frac{1}{3}$

oxigênio do volume final  $V_0$ . Considera-se as informações citadas acima, obtêm-se o valor volume final de hidrogênio.

$$V_0 = 0,165 \cdot 12$$

$$V_0 = 1,98 \text{ litros}$$

Posteriormente deve-se subtrair este percentual de oxigênio citado anteriormente e por fim terá o resultado do volume teórico final de hidrogênio produzido pelo gerador.

$$V_0 = 1,98 - \frac{1}{3} \text{ Oxigênio}$$

$$V_0 = 1,32 \text{ l}$$

Com base nos cálculos realizados anteriormente, obtêm-se os valores de volume final do hidrogênio produzido pelo sistema propriamente estabelecidos pelas condições citadas anteriormente, com seu valor em litros de 1,32.

Perante os testes práticos realizados em laboratório e com os valores propriamente adquiridos, o volume final de hidrogênio encontrado, foi de 1,58 litros, sendo assim ao efetuar a comparação existe uma diferença de 0,26 litros. Tal diferença pode ser levada em consideração algum fator externo elevado, como por exemplo um aumento de temperatura ou até mesmo da pressão atmosférica.

### 6.3 Massa de hidrogênio produzida

Embasado nos resultados obtidos a partir da seção 6.2 e tomando como critério massa atômica de um mol de hidrogênio ( $H_2$ ), tabela periódica, equivalendo a 2 gramas, encontra-se a massa (m) do mesmo, realizada durante os testes laboratoriais, por meio do cálculo de regra de três, tendo como os resultados das equações (9) (10) e a informação relevante que 22,4 é o valor de volume em litros de 1 mol de qualquer gás, isso nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

$$2 = 22,4$$

$$m = 1,32$$

$$m = 0,118 \text{ g}$$



Logo, embasando-se na equação anterior, deve-se efetuar a observação que a massa que será reproduzida pelo hidrogênio durante o processo de geração é de 0,118 gramas.

#### 6.4 Potência no processo

Ao considerar dados prescritos e valores preestabelecidos no transcorrer do referencial teórico, calcula-se a potência que o gerador de hidrogênio capta de um automóvel. Como fundamento dos cálculos é preciso levar em consideração que o sistema de alimentação, fonte geradora de um veículo trabalha com uma variação de tensão em torno de 13,7, a 14,4 volts, isto é, embasado no *datasheet* das baterias da MOURA. A fim de efetuar o cálculo, se necessita utilizar a seguinte equação:

$$P = V \cdot I$$

$$P = 14,05V \cdot 10,3A$$

$$P = 144,715 W$$

Para fins de cálculos utiliza-se das seguintes variáveis:

P: Potência (W);

V: Tensão (V);

I: Corrente elétrica (A).

Logo considerando a potência calculada acima, conclui-se que o gerador de hidrogênio adquire 144,715W de potência, durante a execução do processo, da bateria do automóvel e transforma em aproximadamente 1,32 litros ou 0,118 g de gás hidrogênio, desta forma o valor é considerado relativamente baixo, uma vez que a quantidade produtiva do gás é considerada baixa pela demanda do motor do automóvel.

Para fins de cálculo e prático, utiliza-se um automóvel, considerando potências de 66 CV no combustível álcool e 65 CV combustível gasolina, e aplicando o resultado da potência calculada na equação anterior, encontra-se o percentual de potência, utilizando uma potência média do veículo de 65,5 CV, que o gerador irá adicionar ao motor:

$$48175,17 = 100$$

$$144,715 = X$$

$$X = 0,3004 \%$$

Mediante ao percentual encontrado pelos resultados anteriores, constata-se a presença de um valor consideravelmente desfavorecido, ao julgar os devidos fins de potência alocados ao MCI. Assim sendo, o hidrogênio adquire uma certa quantidade de energia que a torna maior que a devolvida para motor.

### 6.5 Avaliação Chapa de Inox

Perante a finalização das análises de potência, direciona-se certa atenção a avaliação visual da corrosão das placas de Aço Inox 304, por meio da desmontagem do protótipo, uma vez que estas ficaram em contato direto com a água e eletrólito (NaOH), com realização em do teste em campo, durante o prazo de 60 dias.

Figura 9 – Placa Aço Inox 304



Fonte: O Autor (2020).

Sendo assim, avalia-se que a placa em um curto prazo sofreu grande fator de corrosão ao ficar em contato direto com a solução.

Embasado na análise e conforme referencial teórico julga-se principais fatores para o grande nível de corrosão gerado. Como:

- Mistura de soluto e solvente devidamente rica, com maior concentração de NaOH (soda cáustica), acelerando o processo de corrosão mecânica.
- Elevado fornecimento de corrente elétrica
- Qualidade da chapa subdimensionada
- Baixa dissipação de calor entre as chapas

## **6.6 Avaliação da utilização gerador de hidrogênio em motores de combustão interna**

As informações apresentadas a seguir, são declaradas para devidos fins determinação de vantagens e desvantagens da utilização e manuseio do gerador de hidrogênio em automóveis cujo trabalhando com sistema de combustão interna.

### **6.6.1 Vantagens**

Contendo como embasamento teórico científico segundo WOLLMANN (2013), é declarável a presença de vantagens para este tipo de sistema de geração aplicado ao MCI, tornando-se devidamente funcional:

- A principal vantagem está no fato da utilização do gás hidrogênio e oxigênio, estes não necessariamente obtidos pelo ar atmosférico, porém sim da eletrólise, assim acarretando numa diminuição dos gases poluentes, provindos da queima do derivado do petróleo, este conhecido como Oxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), popularmente conhecido como gás carbônico e Monóxido de carbono (CO).
- Pode-se gerar alta densidade energética.
- Óleo mais limpo como resultado do menor depósito de carbono no motor, semelhante ao quando utilizado etanol.
- Redução de consumo de combustível em percentual de 10% a 58%, dependendo da produção.

### **6.6.2 Desvantagens**

De mesma forma conforme referencial teórico perante a ideologia retratada por PICHELI (2018), este tipo de sistema indevidamente manuseado e periculosidade pelo gerador são desvantagens para de geração aplicado ao MCI:

- Dependendo da quantidade produzida de hidrogênio o motor pode em rotações mais altas, podendo ser exposto a falhas de ignição e existindo percursos que ficarão incompletos, devido a não queima de combustível.
- O projeto se delimita a quantidade de energia elétrica disponível no veículo, ou seja, provinda somente da bateria.
- Durante o processo, devido a temperatura, o sistema pode gerar além da eletrólise, a ebulição da água, com entrada de vapor d'água no interior poderá danificar a câmara de combustão.
- Este gás não pode ser armazenado devido seu grau de perigo, podendo gerar possíveis explosões, logo todo o tipo de produção do gerador deverá ser instantâneo.
- Corrosão das placas de inox gradativamente com o tempo, podendo ser curto ou logo dependendo do sistema de manutenção do gerador

Logo ao se avaliar os quesitos vantagens e desvantagens, é notório o entendimento avaliando o número de desvantagens utilizando gerador hidrogênio num automóvel com motor de combustão tornando a princípio inviável, considerando os critérios de possíveis danos materiais e/ou pessoais.

## 7 CONCLUSÃO

Com este trabalho tornou-se possível o entendimento por meio da análise embasados em referenciais teórico e testes laboratoriais, tratadas como pesquisas de novas tecnologias e retratando-as para o cenário atual compara fins de utilização na produção e o uso gás de hidrogênio por meio da eletrólise para gerar energia por célula de combustível, bem como sua armazenagem, distribuição e aplicações, tendo como foco o uso do hidrogênio em motores de combustão interna por meio do gerador.

Esta análise, tem como fator a verificação da possibilidade a economia de combustível em um automóvel com sistema MCI e paralelamente uma redução de poluentes provindos deste processo. Fundamentado a isso, este estudo tem como foco o esclarecimento das informações que trafegam nas mídias.

Logo, perante os resultados e conclusões adquiridas por meio dos ensaios realizados em laboratório, em campo e agregados os materiais teóricos demonstram que a eletrólise da água provinda do gerador de hidrogênio, se inviabiliza para um automóvel de combustão interna. Da mesma forma que se trará benefícios com este sistema agregado ao veículo, é citável as desvantagens que o uso do mesmo, de certa forma concluindo a inviabilidade nestas condições propostas. E além de que o percentual de hidrogênio produzido pelo gerador, torna-se insatisfeito para as circunstâncias de uma possível economia de combustível, assim evidenciando o ponto principal desta pesquisa, em que é se estudar este tipo de tecnologia comparando suas vantagens e possibilidades versus desvantagens e dificuldades.

Da mesma forme é trago como uma hipótese para desencadear e continuar as pesquisas em um plano futuro, a possível análise de redução da corrosão entre as placas de inox, avaliando o uso de outra qualidade deste tipo de aço ou até mesmo outro material, verificar possibilidade de expansão a área de contato da solução água mais eletrólito e explorar a família de eletrólitos possíveis para utilização neste tipo de sistema comparando potência produtiva de gás com corrosão da placa.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. T. **Hidrogênio como Combustível**. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005.

AÇOS INOXIDÁVEIS. **Grupo Aço Tubo**. Ano: 2016. Disponível em: <  
[https://www.acotubo.com.br/wp-content/uploads/2016/08/ACO\\_005\\_Catalogos\\_Acotubo2016\\_OnLine\\_04\\_Inox.pdf](https://www.acotubo.com.br/wp-content/uploads/2016/08/ACO_005_Catalogos_Acotubo2016_OnLine_04_Inox.pdf) >. Acesso em: 26 de outubro de 2020.

ANTUNES, Edir Guilherme. PENTEADO, Felipe Cardoso. GIBIN, Renan. **ESTUDO E EXPERIMENTO SOBRE KIT GERADOR DE HIDROGÊNIO APLICADO NO MOTOR CICLO OTTO**. FATEC, Santo André, p.69, 2017. Disponível em: <  
<http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC478.pdf> >. Acesso em: 20 de maio de 2020.

BARBOSA, Caio Henrique; TAMBOR, José Humberto Machado. **Redução de consumo de combustível convencional pela adição de gás hidrogênio**. ENIAC. 2016. Disponível em: <  
<https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais/article/view/416/501>>. Acesso em 09 março 2020.

BIANCHI, J. C. A.; ALBRRECHT, C. H.; MAIA, D. J. Universo da química: ensino médio: volume único. 1. Ed.- São Paulo: FTD, 2005.

C. A. D. Rodrigues<sup>1</sup>; E. Mascarin; F. P. L. Azevedo; G. Tremiliosi-Filho; F.J. Valente. **Redução de consumo de combustível em veículos usando gas de hidrogênio/oxigênio**. Metallum. 2016. Disponível em: <  
<http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/314-001.pdf>>>. Acesso em: 09 março 2020.

CHAVES, Dionísio Mesquita. **Produção de gás hidrogênio em motores**. Editora Realize, 2012.  
<  
[https://www.editorarealize.com.br/revistas/conedu/trabalhos/TRABALHO\\_EV117\\_MD4\\_SA19\\_ID7058\\_16092018213923.pdf](https://www.editorarealize.com.br/revistas/conedu/trabalhos/TRABALHO_EV117_MD4_SA19_ID7058_16092018213923.pdf)> Acesso em 09 março 2020.

CAMARGO, João Carlos. **O Etanol como Fonte de Hidrogênio para Células a Combustível na Geração Distribuída de Energia Elétrica**. 2004. 162. Grau de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos – Universidade Federal de Santa Catarina, Campinas, 2004.

CARVALHO, Márcio Augusto Sampaio De. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2011. 168. Grau de Especialista em Engenharia Industrial - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

CONELHEIRO, Luis Thiago Penage, LUCIANO, Arquimedes. **Desenvolvimento de um sistema gerador de hidrogênio gasoso para utilização como combustível alternativo em veículos automotores**. UniCesumar, 2012. Disponível em: <[http://cesumar.br/prppge/pesquisa/mostras/vi\\_mostra/luis\\_thiago\\_panage\\_conelheiro.pdf](http://cesumar.br/prppge/pesquisa/mostras/vi_mostra/luis_thiago_panage_conelheiro.pdf)>. Acesso em: 09 março 2020.

**Conceitos básicos da Eletrólise**. Alfa Connection, 2020. Disponível em: <<https://www.alfaconnection.pro.br/fisica/fisicoquimica/eletrolise/conceitos-basicos/>>. Acesso em: 01 de setembro de 2020.

DÍAZ-REY, Ángel Orlando; GONZÁLEZ-GIL, Jonathan Eduardo; GONZÁLEZESTRADA, Octavio Andrés. **Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna**. Revista UIS Ingenierías. 2018. Disponível em: <<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/6976/7865>>. Acesso em: 09 março 2020.

DAMASCENA, Pedro José Vieira. GOÉS, Vítor Zonta de. **VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO “IN SITU” EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**. 2013. 37 f. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

Data Irestal. **FICHAS TÉCNICAS DE AÇO INOXIDÁVEL**. Disponível em:<<http://data.irestal.com/files/files/2012030204152715829.pdf>>. Acesso em: 08 de setembro de 2020.

ESTÊVÃO, Tânia E. Rodrigues. **O Hidrogênio como combustível**. 2008. 113. Grau de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2008.

FEITOSA, Edinilza M. A.; BARBOSA, Francisco G.; FORTE, Cristiane M. S. **Química Geral I**. Ed. 3. Fortaleza-Ceará: EdUECE, 2016, p. 136.

FERREIRA PINTO, C. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável: O Uso de Fontes Alternativas de Energia**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, USP, 224p. 2009.

FIGUEIREDO, Robson Lage. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento aplicado a um moto gerador a diesel com injeção de gás de eletrólise visando redução de consumo de combustível**. 2018. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. "**Funcionamento do Motor de Combustão**"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao.htm>. Acesso em: 20 de maio de 2020.

FURLAN, André Luís. **Análise técnica e econômica do uso do hidrogênio como meio armazenador de energia elétrica proveniente de fontes eólicas**. Campinas, SP: [s.n.], 2012.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engines fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.

INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE VISEU (IPV). **O combustível hidrogênio**. SANTOS, Fernando. Ano 2007. Disponível em: <http://www.ipv.pt/millennium/millennium31/15.pdf>. Acesso em 09 março 2020.

LELUDAK, FREDERICO Thomas; Haus, Tiago Luis. **Célula de hidrogênio: estudo e construção de uma célula eletrolítica para produção de hidrogênio gasoso**. FAE Caderno PAIC. 2012-2013. Disponível em:



<<https://cadernopaic.fae.emnuvens.com.br/cadernopaic/article/view/25/24>> . Acesso em: 09 março 2020.

MAHAN, B. H; MYERS, R. J. **Química: um curso universitário**. 4. ed. São Paulo: E. Blucher, 1997.

MEYER, William Müller. **Estudo da ignição hipergólica do peróxido de hidrogênio concentrado com um combustível cataliticamente promovido**. 2016. Relatório final de projeto de iniciação científica – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, 2016.

NADALETI, Willian César. **APROVEITAMENTO DE BIOGÁS, HIDROGÊNIO E GÁS DE SÍNTESE NO SETOR DE TRANSPORTE PÚBLICO E AGROINDUSTRIAL DE ARROZ: estudo de potencial energético de resíduos e emissões de poluentes**. 2017. 235. Grau de Doutor em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PAULA, Fernando Jesus de. **CONSTRUÇÃO DE UM MECANISMO GERADOR DE HIDROGÊNIO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO NA MISTURA HIDROGÊNIO x GASOLINA**. UniRV - Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2015. Disponível em: <<http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/FERNANDO%20JESUS%20DE%20PAULA.pdf>>. Acesso em: 03, agosto e 2020.

PERLES, C. E., **Propriedades Físico-Químicas Relacionadas ao Desenvolvimento de Membranas de Nafion para Aplicações em Células a Combustível do tipo PEMFC**. Instituto de Química, UNICAMP, Polímeros v.18 n.4, 2008. Disponível em: Acessado em: 28 de maio de 2020.

QUISHPE, Luis Armando Caiza. **Instalación de un generador de hidrógeno en un motor de combustión interna para reducir la contaminación**. 2015. Número de folhas: 164. Ingeniería Mecánica, Motor de combustion interno. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL, Quito, 2015.

ROZENBERG, Izrael Mordka. **Química geral**. Edgard Blucher, 2002.

RUSSEL, John Blair. Química Geral. São Paulo: Makron Books. 621p. 1994

SANTOS, Fernando M. S. M. Dos; SANTOS, FERNANDO A. C. M. Dos. **O COMBUSTÍVEL “HIDROGÊNIO”**. 2002. 19f. Instituto Superior Politécnico de Viseu - IPV, Viseu, 2002.

SANTOS, Mateus Carneiro Guimarães Dos. **As Leis da Eletrólise: Uma Introdução Crítica aos Debates dos Trabalhos de Carlo Matteucci e Michael Faraday**. 2019. 86f. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

SENRA, Fernando Osóri; LIMA, Kelly Aparecida Moreira de; ABREU, Rodrigo Araujo de. **Estudo da aplicação de hidrogênio e gasolina em motor ciclo Otto**. 2014. 42f. Engenharia Mecânica, motor ciclo Otto. Universidade São Francisco, Itatiba, 2014.

SOUZA, Líria. **Poder calorífico dos combustíveis**. Ano: 2010. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/poder-calorifico-combustiveis.htm>>. Acesso em: 20 de abril de 2020.

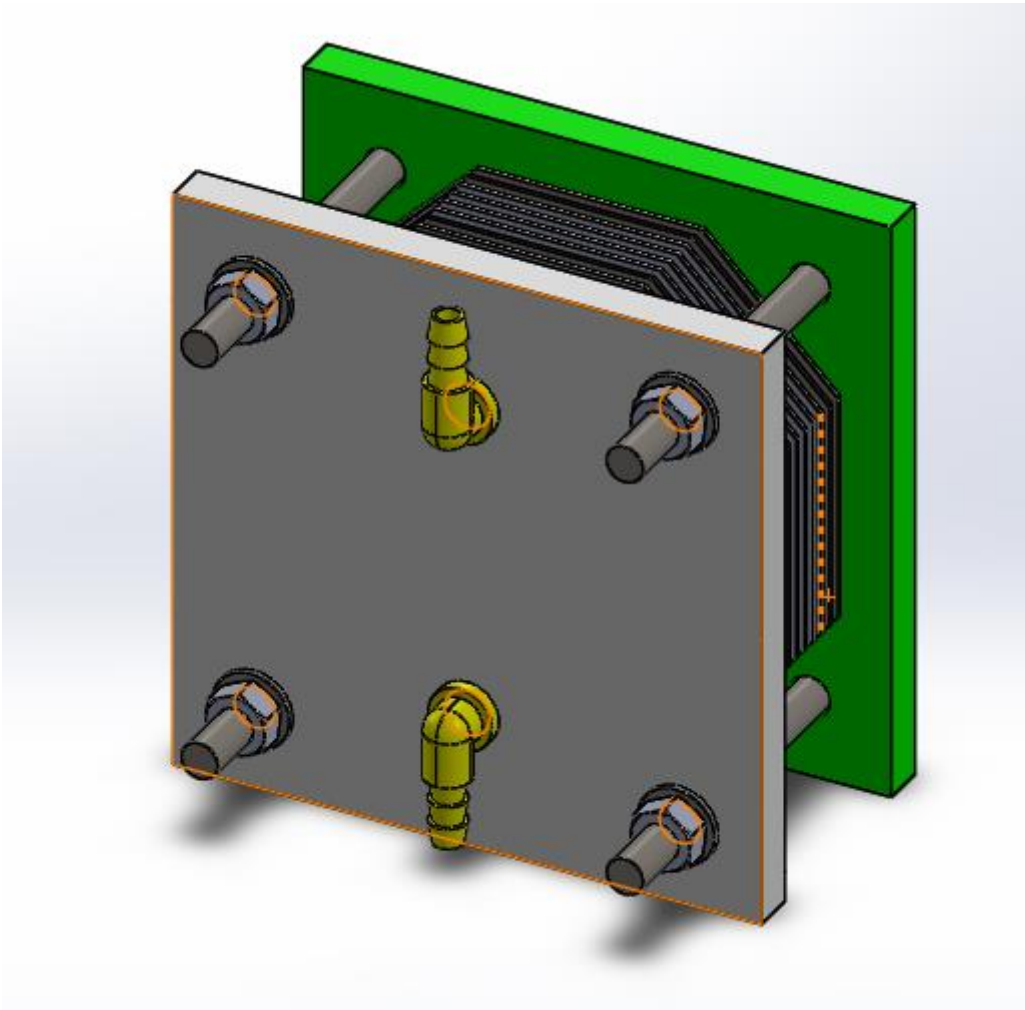
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ (UFOPA). **Estudo sobre células a combustível de hidrogênio através da eletrólise da água: um desafio a engenharia nacional**. COSTA, Eduardo; NETO, Georgios; FILHO, José; CORRÊA, Marlison; Disponível em: < <http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/5/Artigos/128855.pdf> >. Acesso em: 20 de maio de 2020.

WOLLMANN, Fábio Leandro. **Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores**. 2013. Número de folhas: 74. Engenharia mecânica, veículos automotores. Universidade Regional do Noroeste de Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

ZIRR, Leandro Medeiros. **Consumo de motor a diesel associado com gerador de hidrogênio**. 2017. 37 f. Engenharia Mecânica, motor diesel. Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerra largo, 2017.

**APÊNDICE A**

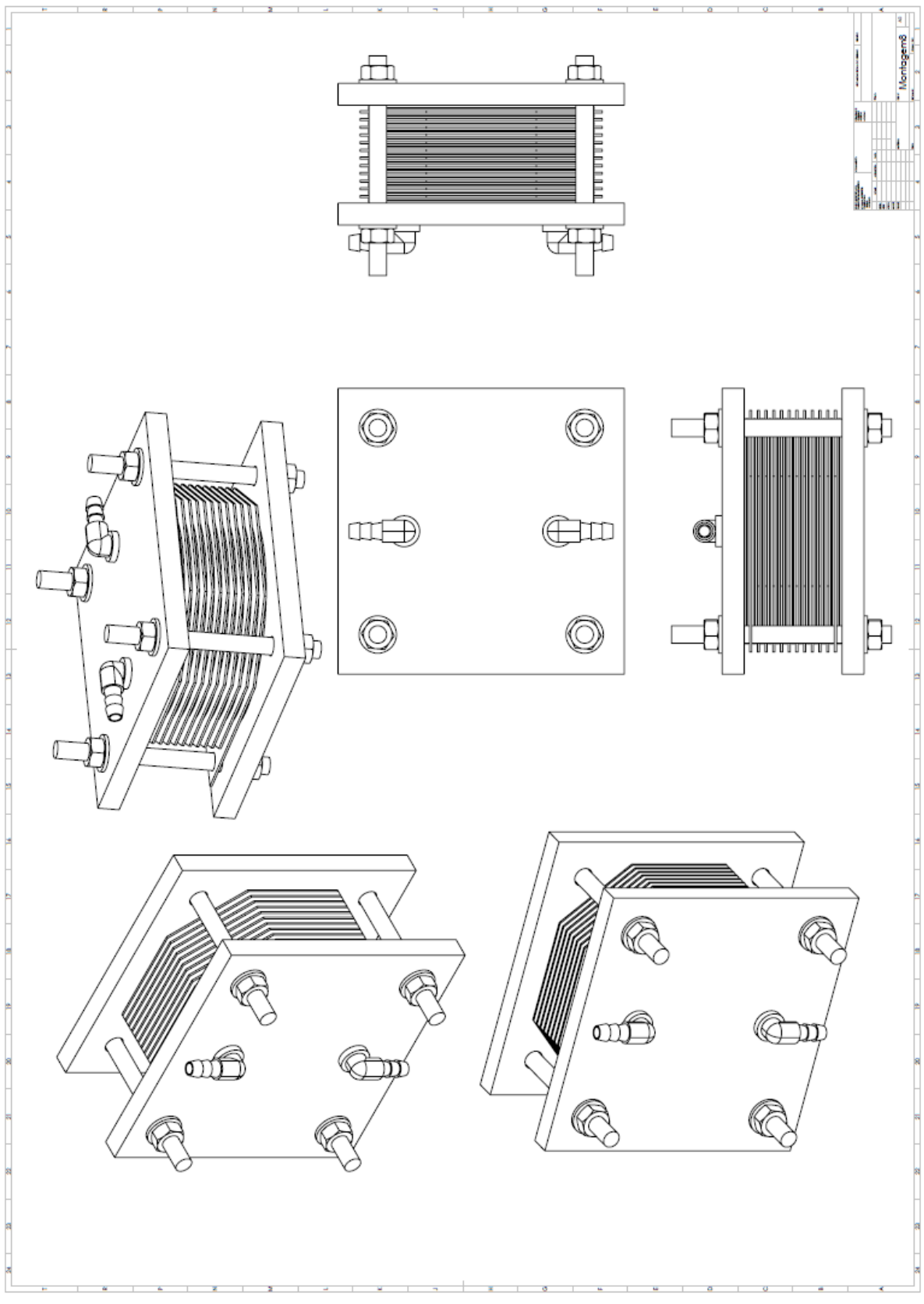
Figura 10 – Vista Isométrica do Gerador Hidrogênio



Fonte: O autor (2020).

**APÊNDICE B**

Figura 11 – Vistas do Gerador de Hidrogênio



Fonte: O autor (2020).

## APENDICE C:

Figura 12 – Fichas técnicas de aço inoxidável

AÇO INOXIDÁVEL		SÉRIE 300							
		Aço Cromo-Níquel							
DESIGNAÇÃO	TIPO ASTM (AISI)	301	302	303	304	304 L	321		
	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 6,008,00	C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 8,0010,00	C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 8,0010,00 S% 0,15 Mín,	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 18,0020,00 Ni% 8,0010,50	C% 0,030 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 18,0020,00 Ni% 8,0012,00	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 9,0012,00 Ti% >5xC%0,07		
PROPRIEDADES FÍSICAS	PESO ESPECÍFICO (g/cm <sup>3</sup> )	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9		
	MÓDULO DE ELASTICIDADE (N/mm <sup>2</sup> )	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000		
	ESTRUTURA	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO		
	CALOR ESPECÍFICO A 20C (J/Kg K)	500	500	500	500	500	500		
	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (W/m K)	a 100 C a 150 C	16 21	16 21	16 21	16 21	16 21	16 21,5	
	COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICO MÉDIO (x 10 <sup>6</sup> C <sup>-1</sup> )	0100 C 0300 C 0500 C 0700 C	16,92 17,10 18,18 18,72	17,28 17,82 18,36 18,72	17,3 17,8 18,4 18,7	17,30 17,80 18,40 18,80	17,30 17,80 18,40 18,80	16,74 17,10 18,54 19,26	
	INTERVALO DE FUSÃO (C)		13981420	13981420	13981420	13981454	13981454	13981427	
PROPRIEDADES ELÉCTRICAS	PERMEABILIDADE TÉRMICA EM ESTADO SOLÚVEL RECOZIDO	AMAGNÉTICO 1,02	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008		
	CAPACIDADE DE RESISTÊNCIA ELÉCTRICA A 20C (μΩm)	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72		
PROPRIEDADES MECÂNICAS A 20°	DUREZA BRINELL	RECOZIDO HB COM DEFORMAÇÃO EM FRIO HB	135185 210330	135185 180330	130180 180330	130150 180330	125145 -	130185 -	
	DUREZA ROCKWELL	RECOZIDO HRB COM DEFORMAÇÃO EM FRIO HRC	7592 2541 1/4 DURO-DURO	7090 1035	7090 -	7088 1035	7085 -	7088 -	
	RESISTÊNCIA A TRACÇÃO COM DEFORMAÇÃO EM FRIO Rm(N/mm <sup>2</sup> )	RECOZIDO	590750 8701200 1/4 DURO-DURO	560720 6801180	530700 -	500700 7001180	500680 -	520700 -	
	ELASTICIDADE COM DEFORMAÇÃO EM FRIO Rp (0,2)(N/mm <sup>2</sup> )	RECOZIDO	215340 500900 1/4 DURO-DURO	205340 340900	205340 350900	195340 340900	175300 -	205340 -	
	RECOZIDO Rp(1) (N/mm <sup>2</sup> ) MÍNIMO		225	245	255	235	215	245	
	ALONGAMENTO 50mm. A(%)		6555 258 1/4 DURO-DURO	6050 5010	6050 -	6550 5010	6550 -	6040 -	
	EXTENSÃO RECOZIDO Z (%)		7060	7555	Min. 50	7560	7560	6550	
	RESILIÊNCIA KCUL (J/cm <sup>2</sup> ) KVL (J/cm <sup>2</sup> )		130 140	160 180	Min. 100 -	160 180	160 180	120 130	
PROPRIEDADES MECÂNICAS A QUENTE	ELASTICIDADE DIFERENTES TEMPERATURAS	Rp(0,2) (N/mm <sup>2</sup> )	a 300 C a 400 C a 500 C	- - -	- - -	- - -	125 97 93	115 98 88	150 135 120
		Rp(1) (N/mm <sup>2</sup> )	a 300 C a 400 C a 500 C	- - -	- - -	- - -	147 127 107	137 117 108	186 161 152
		LIMITE DE FLUÊNCIA	a 500 C a 600 C a 700 C a 800 C	- - - -	- - - -	- - - -	68 42 14,5 4,9	58,5 36 10,5 3,9	102 64 16,5 5,8
		σ <sub>1</sub> / 100 000/ t (N/mm <sup>2</sup> )	a 800 C	-	-	-	-	-	-
	RECOZIDO COMPLETO RECOZIDO INDUSTRIAL (OC)		ARREFEC. RÁPIDO 10081120	ARREFEC. RÁPIDO 10081120	ARREFEC. RÁPIDO 10081120	ARREFEC. RÁPIDO 10081120	ARREFEC. RÁPIDO 10081120	ARREFEC. RÁPIDO 9531120	
	TEMPERA		NÃO TEMPERÁVEL	NÃO TEMPERÁVEL	NÃO TEMPERÁVEL	NÃO TEMPERÁVEL	NÃO TEMPERÁVEL	NÃO TEMPERÁVEL	
	INTERVALO DE FORJA TEMPER. INICIAL TEMPER. FINAL		1200 925	1200 925	1200 925	1200 925	1200 925	1175 925	
TEMPERATURA FORMAÇÃO DE ESCAMADO SERVIÇO CONTÍNUO SERVIÇO INTERMITENTE		900 810	900 810	- 815	925 840	925 840	900 810		
OUTRAS PROPRIEDADES	SOLDABILIDADE		MUITO BOA	MUITO BOA	NÃO ACONSELHÁVEL	MUITO BOA	MUITO BOA	BOA	
	MAQUINABILIDADE COMPARADA COM UM AÇO BESSEMER PARA a. B1112		45%	45%	55%	45%	45%	36%	
	EMBUTIÇÃO		BOA	BOA	MÉDIA	MUITO BOA	MUITO BOA	BOA	

Fonte: Irestal Group (2020).