

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**GUSTAVO DESTEFANI PICHELI**

**O USO DO HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

**Varginha**  
**2018**

**GUSTAVO DESTEFANI PICHELI**

**O USO DO HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção de grau de bacharel, sob orientação do Prof. Dr. Luiz Carlos Vieira Guedes e coorientação de Jean Roger Guimarães.

**Varginha  
2018**

**GUSTAVO DESTEFANI PICHELI**

**O USO DO HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

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

Aprovado em:     /     /

---

Professor (a)

---

Professor (a)

---

Professor (a)

OBS.:

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria e Mauro, a minha irmã Cintia, e a todos os demais que contribuíram para sua realização.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar sabedoria e foco nesse meu objetivo. Agradeço a minha família, por acreditar no meu potencial e sempre me ajudar nas horas que mais precisei. Agradeço aos meus professores pelo conhecimento passado, especialmente a professora Luciene, pela ajuda e paciência na construção deste trabalho. Agradeço ao meu orientador Luiz Carlos Vieira Guedes pela ajuda e orientação e ao meu coorientador Jean pela ajuda nos testes laboratoriais. Por fim, quero agradecer aos meus amigos pela ajuda e apoio nas dificuldades que surgiram durante todo o ciclo de estudos.

“Não confunda jamais conhecimento com sabedoria. Um o ajuda a ganhar a vida, o outro a construir uma vida.”

Sandra Carey

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do uso do hidrogênio em motores de combustão interna. Tal abordagem se faz necessária, mediante as informações que estão circulando atualmente nas mídias sociais, a respeito da alta economia de combustível que o gerador de hidrogênio proporciona ao veículo. A desmistificação dessas informações trará uma enorme relevância pelo fato de mostrar realmente, se o gerador de hidrogênio economiza combustível. A finalidade desta análise é desmistificar as informações sobre uma possível economia no consumo de combustível, aliada à presença do gerador de hidrogênio, acoplado ao motor de um veículo automotivo de combustão interna. Este propósito será alcançado através de testes laboratoriais e pesquisas bibliográficas, composta principalmente por livros, artigos científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado. Dando continuidade ao projeto, serão realizados testes laboratoriais simulando a quantidade de hidrogênio que o gerador de hidrogênio produzirá numa determinada corrente elétrica e por um determinado período de tempo. Essa simulação nos permitirá coletar dados para a realização de cálculos e possibilitará uma comparação com um veículo automotivo de combustão interna. As análises teóricas e laboratoriais sobre o assunto serão abordadas no decorrer deste trabalho.

**Palavras-chave:** Hidrogênio. Economia. Combustão interna. Gerador de hidrogênio.

## **ABSTRACT**

*This paper presents an analysis of the use of hydrogen in internal combustion engines. Such an approach is necessary, through the information that is currently circulating in social media, regarding the high fuel economy that the hydrogen generator provides to the vehicle. The demystification of this information will be enormously relevant because it actually shows whether the hydrogen generator saves fuel. The purpose of this analysis is to demystify the information about a possible saving in fuel consumption coupled with the presence of the hydrogen generator, coupled to the engine of an internal combustion vehicle. This purpose will be achieved through laboratory tests and bibliographical research, mainly composed of books, scientific articles, master's dissertations, doctoral theses. Continuing the project, laboratory tests will be performed simulating the amount of hydrogen that the hydrogen generator will produce in a given electric current and for a certain period of time. This simulation will allow us to collect data to perform calculations and will allow a comparison with an internal combustion vehicle. The theoretical and laboratorial analyzes on the subject will be approached in the course of this work.*

*Keywords: Hydrogen. Economy. Internal combustion. Hydrogen generator.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Diagrama dos processos de eletrólise da água.....	17
Figura 2 - Estrutura de um motor de combustão interna de 4 tempos.....	20
Figura 3 - Gráfico comparativo entre o ciclo Otto ideal e o ciclo Otto real.....	22
Figura 4 - Processo esquematizando a abertura das válvulas para a entrada de ar.....	23
Figura 5 - Processo esquematizando a compressão do ar no cilindro. ....	24
Figura 6 - Processo esquematizando a explosão dos gases dentro do cilindro.....	24
Figura 7 - Processo da exaustão dos gases gerados no processo de combustão.....	25
Figura 8 - Gerador de hidrogênio utilizado nos testes laboratoriais.....	30
Figura 9 - Processo do funcionamento do gerador de hidrogênio no motor de um veículo.....	32

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 HIDROGÊNIO</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 Hidrogênio como combustível</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2 Produção de hidrogênio por eletrólise</b> .....	<b>16</b>
2.2.1 Lei de Faraday .....	18
2.2.2 Fatores que influenciam na eletrólise .....	19
<b>3 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1 Ciclo Otto</b> .....	<b>21</b>
3.1.1 Primeiro Tempo - Admissão da mistura .....	23
3.1.2 Segundo Tempo - Compressão da mistura .....	23
3.1.3 Terceiro Tempo - Expansão da mistura .....	24
3.1.4 Quarto Tempo - Escape dos gases .....	25
<b>3.2 Eficiência nos motores de combustão interna</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3 Relação Estequiométrica – Ar X Combustível</b> .....	<b>26</b>
<b>3.4 Fator Lambda (<math>\lambda</math>)</b> .....	<b>27</b>
<b>4 GERADOR DE HIDROGÊNIO (HHO)</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1 Desempenho de um gerador de hidrogênio</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2 Aplicação do hidrogênio em motores de combustão interna</b> .....	<b>31</b>
<b>4.3 Funcionamento do gerador de hidrogênio no motor</b> .....	<b>31</b>
<b>4.4 Células de hidrogênio ou eletrolítica</b> .....	<b>33</b>
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	<b>34</b>
<b>5.1 Técnicas de pesquisa</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2 Testes laboratoriais</b> .....	<b>34</b>
5.2.1 Equipamentos utilizados nos testes .....	34
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>36</b>
<b>6.1 Dados coletados nos ensaios laboratoriais</b> .....	<b>36</b>
<b>6.2 Cálculo volumétrico do hidrogênio</b> .....	<b>36</b>
<b>6.3 Cálculo da massa de hidrogênio produzida nos testes</b> .....	<b>38</b>
<b>6.4 Cálculo de potência no processo</b> .....	<b>39</b>
<b>6.5 Vantagens e desvantagens do uso do gerador de hidrogênio em motores de combustão interna</b> .....	<b>40</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O gerador de hidrogênio que se acopla ao veículo automotor, a fim de se amenizar o consumo de combustível, baseia-se na quebra da molécula de água, gerando o hidrogênio. O gás gerado através do processo chamado eletrólise, é encaminhado ao sistema de admissão do veículo, onde em altas temperaturas, acelera a queima do combustível gerando então, a economia no processo.

Em diversas mídias sociais, podem-se observar algumas informações sobre a grande economia de combustível que os geradores de hidrogênio proporcionam, entretanto, na prática o resultado é completamente diferente. A falta de experiência aliada à falta de conhecimento induz as pessoas a acreditarem que o hidrogênio fornece uma economia expressiva de combustível, devido à aceleração da queima do mesmo.

Todavia, para que toda essa economia de combustível aconteça, o motorista deve seguir uma série de requisitos, como por exemplo, dirigir somente em locais planos, de modo que a aceleração permaneça constante e a velocidade mantenha-se controlada, outro exemplo, seria evitar local onde haja muitas paradas, caso contrário, haverá um maior consumo de combustível devido ao esforço do motor em gerar energia para alimentar o gerador de hidrogênio.

Mediante aos fatos, o objetivo geral deste projeto será apresentar uma análise, através de testes laboratoriais e material teórico, sobre o consumo de combustível, aliada à presença do gerador de hidrogênio acoplado ao motor de um veículo automotivo de combustão interna e verificar a ocorrência de uma possível economia no consumo do mesmo.

Outros objetivos deste trabalho serão apresentar um estudo sobre o elemento químico hidrogênio, principal comburente deste processo, bem como o motor de combustão interna, onde será analisado todo o processo de queima. Será necessário ainda, um estudo sobre o gerador de hidrogênio, bem como as suas vantagens e desvantagens ao veículo, a fim de se desmistificar as informações que circulam nas mídias sociais sobre a redução no consumo de combustível.

O interesse por esse estudo surgiu mediante as informações que circulam nas mídias sociais, a respeito da alta economia de combustível que o gerador de hidrogênio provoca ao veículo. A desmistificação dessas informações trará uma enorme relevância pelo fato de mostrar realmente se o gerador de hidrogenio trará uma real economia de combustível.

A seguir, será apresentada uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto, realizada em materiais do gênero. As análises complementares do projeto serão realizadas através de testes

feitos em laboratório, simulando a quantidade de hidrogênio que o gerador de hidrogênio produzirá numa determinada corrente elétrica e por um determinado período de tempo.

Para o início da pesquisa, se fez necessário obter algumas informações sobre o hidrogênio, o mesmo, se torna o principal elemento químico de todo o processo realizado no motor do veículo.

## 2 HIDROGÊNIO

“A primeira descoberta do hidrogênio foi relatada por Theophrastus Bombast Von Hohebheim, conhecida também por Paracelso, no século XVI por meio de reações entre metais e ácidos” (SCALABRIN, 2015, p. 15). De acordo com Estevão (2008, p. 07) “O átomo de hidrogênio foi descoberto em 1766, por Henry Cavendish, através da decomposição da água, mas o nome que lhe conhecemos hoje foi dado por Lavoisier”.

O hidrogênio quando encontrado em seu estado natural e sob condições ambientes de temperatura e pressão, possui características como sendo incolor, insípido e muito mais leve que o ar (SENRA; DE LIMA; DE ABREU, 2014).

O hidrogênio tem sido considerado um promissor combustível sustentável para o fornecimento de energia, desde que este seja produzido a partir de fontes renováveis ou da utilização de coprodutos (MEDEIROS, 2010, p. 16).

O hidrogênio possui características que unidas ao motor de combustão interna, melhoram a eficiência mediante ao processo de combustão, tendo como base o elevado poder calorífico e a rápida combustão provocada pelo uso do mesmo (PEREIRA, 2017).

Tendo como base a tabela periódica, o hidrogênio é o elemento químico que ocupa a primeira casa e pode ser representado pela letra “H”. Possuindo informações básicas, o hidrogênio se torna um elemento considerado simples, tendo em vista que o mesmo possui um número atômico igual a 1 e uma massa atômica de aproximadamente 1 e também que seu isótopo mais abundante possui apenas um núcleo constituído por um próton (WOLLMANN, 2013).

Como o hidrogênio é um combustível livre de carbono, sua utilização acarreta em zero emissão de carbono (dependendo de sua origem), tais como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarbonetos (HC) e fuligem / particulados (SILVA, 2017, p. 28).

Atualmente, o hidrogênio é o nono elemento mais abundante no planeta e não é encontrado em sua forma pura, o mesmo pode ser considerado ainda um dos menores elementos, no entanto, essa característica não o faz ser menos perigoso que as demais substâncias existentes em nosso meio. A grande dificuldade seria encontrar uma forma segura para seu armazenamento, tendo em vista que o mesmo no estado líquido possui um alto custo de armazenagem (ESTEVÃO, 2008; LELUDAK e HAUS, 2013).

O quadro a seguir, apresenta algumas informações específicas sobre o hidrogênio, tendo como base o que foi dito no capítulo 2.

Quadro 01 – Informações técnicas do hidrogênio.

<b>Informações sobre o Hidrogênio</b>	
Símbolo	H
Cor	Incolor
Estado físico em temperatura e pressão ambiente	Gás
Ponto de Ebulição	- 252,8°C (na pressão de 1 atm)
Temperatura de autoignição (°C)	560
Temperatura de chama (°C)	2.045
Velocidade de propagação da chama ao ar (m/s).	2,65
Toxidade	Não
Massa atômica do H <sub>2</sub> =1,00784 uma = 1,00784 mol	
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)	

Fonte: Adaptado de (ANGHEBEN, 2013); (DA ROSA, 2017).

Com base no quadro 01, podem-se identificar algumas características do hidrogênio, pode-se perceber que o mesmo possui muitas informações e utilizações, inclusive como combustível.

## 2.1 Hidrogênio como combustível

A utilização do hidrogênio como combustível, ainda está muito longe de se tornar um grande sucesso, pois sua mistura de ar-hidrogênio não apresenta um elevado poder calorífico se comparado aos demais combustíveis fósseis existentes e utilizados atualmente (ESTEVÃO, 2008).

O hidrogênio pode ser considerado o combustível com maior energia por unidade de peso tendo em vista que, o mesmo não possui os pesados átomos de carbono e pode ser considerado o elemento mais leve. A energia liberada em sua reação de combustão chega a ser cerca de 2,5 vezes do poder de combustão de um hidrocarboneto como a gasolina, diesel ou propano (SANTOS, 2005).

“O hidrogênio não é encontrado na natureza em seu estado molecular, estando sempre associado a outros elementos químicos. Por isso, para poder utilizá-lo como combustível é necessário extraí-lo de alguma fonte, sempre com um gasto energético associado” (DA SILVA, 2016, p. 12). Segundo Rocha (2016, p. 19), “[...] das diversas aplicações dadas ao hidrogênio, a mais relevante delas no contexto de motores a combustão, está o seu uso como combustível.”

Segundo Simioni (2006, p. 150), “O hidrogênio na forma gasosa é altamente explosivo. Se for armazenado, poderá apresentar sérios riscos a populações próximas. A imagem do dirigível Hindenburg, que explodiu em 1937, ainda é um alerta para os riscos do gás hidrogênio.”

As características que o hidrogênio pode agregar ao motor de combustão interna são relacionadas à eficiência no processo. Seu objetivo principal é melhorar a eficiência no processo de combustão do veículo, isso se dá graças ao elevado poder calorífico e a rápida combustão provocada pelo uso do hidrogênio (PEREIRA, 2017).

Alguns estudos mostram que o hidrogênio apresenta uma excelente adaptação nos motores de ignição por centelha, mais conhecido como motores de combustão interna, tendo como característica marcante a alta velocidade de rotação. Por possuir um baixo limite de ignição, a combustão do hidrogênio pode ser facilmente iniciada mesmo em misturas pobres (mais ar do que combustível), facilitando seu uso em motores de combustão interna operando no ciclo Otto (ESTEVÃO, 2008)

De acordo com Courtney (2005, p. 632 - 650),

[...] para que o hidrogênio possa ser utilizado como combustível em motores ciclo Otto e ciclo Diesel, os equipamentos devem ser desenvolvidos especialmente para este fim, com materiais adequados para evitar a corrosão provocada pelo hidrogênio.

De acordo com a citação mencionada acima, chega-se a conclusão que a possibilidade de realizar alguma modificação nos motores dos veículos existentes, a fim de funcionar com hidrogênio, se torna inviável, devido à restrição dos materiais e custos elevados.

Um dos processos onde se obtêm a separação do hidrogênio de outros elementos ou substâncias químicas é o processo de eletrólise. Esse assunto será abordado, a fim de se entender como esse processo pode ser importante na produção do hidrogênio para o veículo que se utiliza o gerador de hidrogênio.

## 2.2 Produção de hidrogênio por eletrólise

Para que possa ocorrer a produção de hidrogênio através do processo da eletrólise, deve-se dissolver um composto iônico em água, como por exemplo, o cloreto de sódio (sal), esse composto fará com que os íons estejam sempre livres no líquido. Como continuidade do processo aplica-se uma descarga elétrica na mistura de água, através de um par de eletrodos submersos no líquido. O cátodo é o eletrodo que possui carga negativa, e o ânodo é o eletrodo de carga positiva (DA ROSA, 2015).

De acordo com Junior (2004, p. 28),

O processo de eletrólise da água consiste na decomposição química da água em seus elementos constituintes, hidrogênio e oxigênio, com a utilização de eletricidade. Quando uma corrente elétrica atravessa a água, a ligação entre os elementos se rompe gerando dois átomos de hidrogênio carregados positivamente, e um átomo de oxigênio carregado negativamente. Os íons negativos do oxigênio migram para o eletrodo positivo (ânodo) e os íons positivos de hidrogênio migram para o eletrodo negativo (cátodo).

“O gás gerado a partir da água em uma célula eletrolítica (hidrogênio e oxigênio) é denominado gás HHO.” (LELUDAK; HAUS, 2013, p. 386). “Essa expressão HHO, que nada mais é do que duas moléculas de H mais uma de O em meio gasoso.” (WOLLMANN, 2013, p. 42).

De acordo com Pereira (2017, p. 39),

A eletrólise é um método utilizado na obtenção de reações de oxirredução. Em soluções eletrolíticas, o processo se baseia na passagem de uma corrente elétrica através de um sistema líquido que contenham íons presentes gerando reações químicas.

O processo de eletrólise da água consiste basicamente na decomposição química da água em seus elementos constituintes, sendo eles o hidrogênio e o oxigênio, e com a utilização de corrente elétrica contínua e uma solução diluída, podendo ser ácida ou básica (LELUDAK; HAUS, 2013).

De acordo com Knob (2013, p. 19),

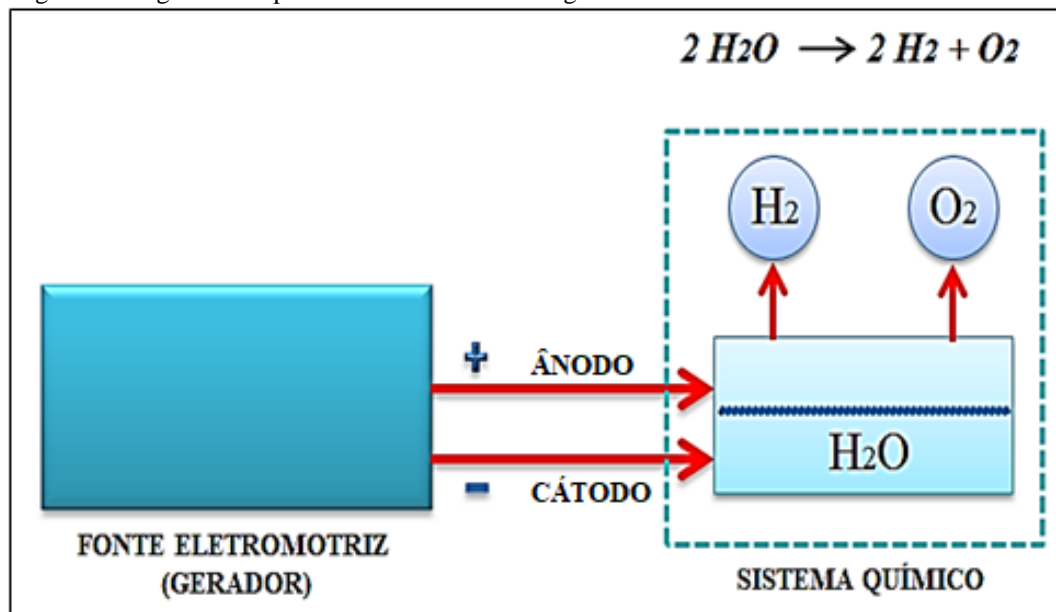
Eletrólise é um processo eletroquímico onde a energia elétrica é a força motriz das reações químicas. As substâncias em eletrólise são decompostas devido a passagem de corrente elétrica. Hidrogênio é produzido por eletrólise inserindo-se dois eletrodos na água. A molécula da água se divide, produzindo oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo.



Um dos processos que podem garantir a obtenção do hidrogênio separado de outras substâncias químicas é o processo de eletrólise. Este método, que se baseia na quebra da molécula de água através da eletricidade, para a obtenção do gás composto por hidrogênio e oxigênio, servirá como auxílio de combustível para um veículo de combustão interna (ESTEVÃO, 2008).

Na figura 01, pode-se observar todo o processo da eletrólise descrito no capítulo, após o mesmo, o hidrogênio passa a ter dois átomos e o oxigênio um átomo.

Figura 1- Diagrama dos processos de eletrólise da água.



Fonte: Adaptado de (SENRA; DE LIMA; DE ABREU; 2014).

De acordo com Simioni (2006, p. 148),

Quando os átomos de hidrogênio e oxigênio se combinam para formar uma molécula de água, dois elétrons são liberados formando uma corrente elétrica, esta reação química também libera calor, podendo ser utilizado em diversos tipos de equipamentos.

Segundo Silva (2017, p. 28), o hidrogênio obtido em sua forma pura através da eletrólise da água, apresenta propriedades físicas e químicas únicas que tornam seu uso adequado principalmente em motores à combustão interna.

Pode-se observar que a eletrólise é um processo indispensável para que haja a decomposição química da água e seus elementos constituintes. E dentro desse processo, existem algumas leis que determinam diversas relações entre a massa de uma determinada substância e carga elétrica, dentre elas, a lei de Faraday.

### 2.2.1 Lei de Faraday

A lei de Faraday foi criada pelo físico-químico Michael Faraday, o mesmo, definiu que a massa de uma determinada substância transformada através do processo da eletrolise, é diretamente proporcional à quantidade de carga elétrica do sistema. Isso significa que quanto maior for a intensidade da corrente elétrica dispensada na eletrólise, maior será a quantidade formada de massa do produto (SENRA; DE LIMA; DE ABREU, 2014).

De acordo com a lei citada acima, pode-se calcular informações como, a quantidade de carga elétrica gasta no processo, a quantidade de litros de hidrogênio gerado em todo sistema pelo gerador de hidrogênio.

$$Q = i * t \quad (1)$$

Onde:

Q: Carga elétrica (C);

i: Corrente elétrica (A);

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

Dando continuidade, através da carga elétrica encontrada na equação (1), pode-se determinar o volume inicial ( $V_0$ ) de hidrogênio produzido pelo gerador de hidrogênio. Deve-se levar em consideração a constante de Faraday (1F), que equivale a 96500 C e a constante de 22,4 que consiste no volume molar de um gás ideal nas CNTP (RUSSEL, 1994).

$$2 * 96500 \rightarrow 22,4 \quad (2)$$

$$Q \rightarrow V_0$$

Onde:

96500: Constante de Faraday (1F);

22,4: Volume em litros que 1 mol de um determinado gás ocupa em condições normais de pressão e temperatura (L);

Q: Corrente elétrica (C);

$V_0$ : Volume inicial (L);

Obtendo o volume inicial de hidrogênio ( $V_0$ ) produzido através da regra de três acima, pode-se encontrar o volume final do hidrogênio através da fórmula de condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

$$\frac{P_0 * V_0}{T_0} = \frac{P_1 * V_1}{T_1} \quad (3)$$

Onde:

$P_0$ : Pressão inicial (mmHg)

$P_1$ : Pressão final (mmHg)

$V_0$ : Volume inicial (L)

$V_1$ : Volume final (L)

$T_0$ : Temperatura inicial (K)

$T_1$ : Temperatura final (K)

### 2.2.2 Fatores que influenciam na eletrólise

Durante o processo da eletrolise, podem-se existir alguns fatores preponderantes que devem ser analisados a fim de melhorar a eficiência durante o processo no motor de combustão interna.

De acordo com Mazloomi e Sulaiman (2012, p. 24),

Os fatores que influenciam a eficiência elétrica da eletrólise da água são qualidade do eletrólito, temperatura, pressão, resistência elétrica do eletrólito, espaçamento entre eletrodos, tamanho e alinhamento dos eletrodos, velocidade de subida das bolhas e material do eletrodo no processo.

Podem-se existir outros fatores preponderantes, onde se determina a quantidade de hidrogênio produzido no processo da eletrólise, tais como a distância existente entre os eletrodos (fios) de sinais opostos, o número de eletrodos e quantidade de corrente elétrica que opera todo o sistema (SILVA, 2016a).

Todos os itens descritos acima podem acontecer, inclusive dentro de um motor durante o processo de combustão interna. Esses tipos de motores possuem vários elementos e processos, conforme o capítulo a seguir.

### 3 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

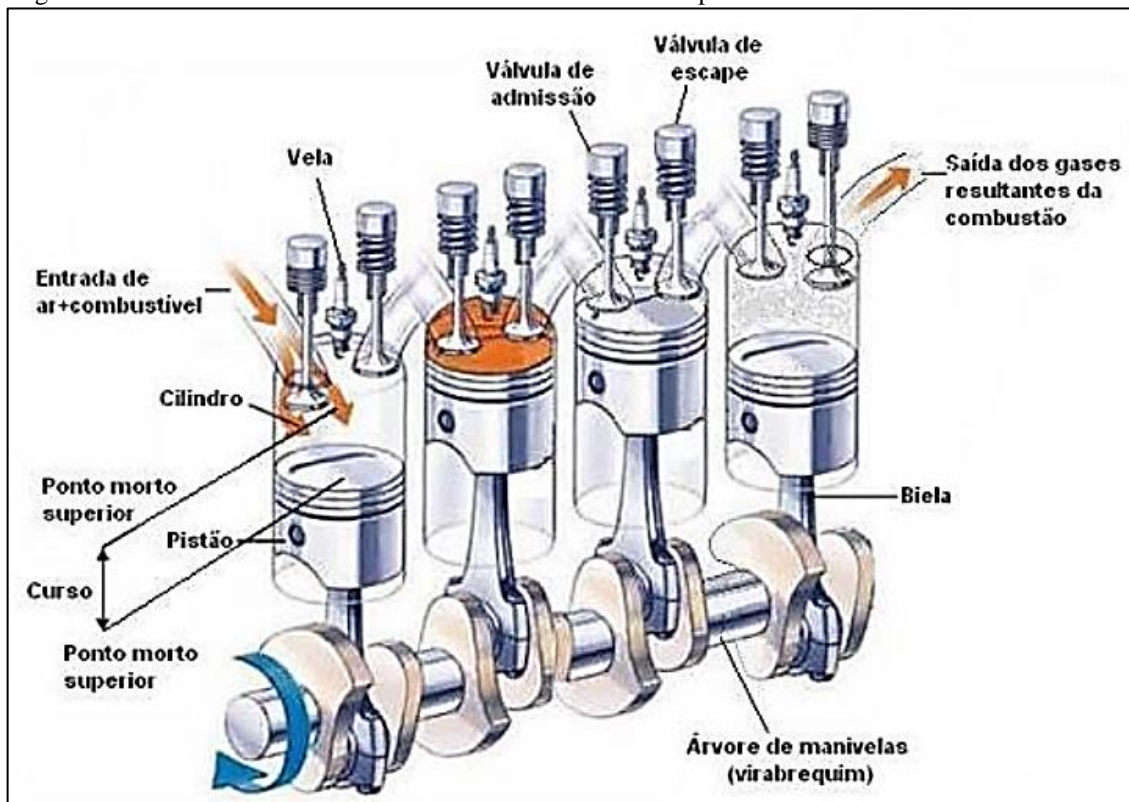
Nos dias atuais, pode-se notar que a grande maioria dos veículos automotivos utilizam motores cujo ciclo de combustão possui quatro tempos, esse modelo converte a energia que a gasolina concentra em movimento, esse tipo de processo recebe o nome de Ciclo Otto (WOLLMANN, 2013).

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

Os motores que possuem o processo de combustão interna produzem trabalho através da queima de combustível, o seu princípio básico de funcionamento tende a aproveitar, ao máximo, o aumento de pressão causado pela reação de combustão entre o ar e o combustível, a fim de se gerar movimento de rotação no motor de um veículo automotivo (MACHADO, 2014).

A figura a seguir, demonstra a estrutura de um motor de combustão interna de quatro tempos, identificando as peças que o compõe, e também o processo detalhadamente que ocorre durante o regime da combustão.

Figura 2 - Estrutura de um motor de combustão interna de 4 tempos.



Fonte: (WOLLMANN, 2013).

De acordo com Da Silva (2017a, p. 30), o propósito de um motor de combustão interna é a produção de potência mecânica a partir da energia química contida no combustível. Nesse contexto, Martins (2006) complementa dizendo que os motores de combustão interna são máquinas que através da queima de combustível produzem trabalho.

De acordo com Heywood (1988, p. 37),

O propósito de um motor de combustão interna é a produção de potência mecânica a partir da energia química contida no combustível. Nos motores de combustão interna essa energia é liberada pela queima ou oxidação do combustível dentro de uma câmara de combustão.

O funcionamento de um motor de combustão interna, de acordo com Passos (2017, p.15), se baseia no seguinte aspecto:

O motor de combustão interna vem sofrendo modificações desde a sua primeira patente e após tantas modificações, entende que o motor de combustão interna funciona através da força de expansão dos gases em combustão que impulsiona o êmbolo para baixo, e a biela transforma seu movimento alternado de sobe e desce em movimento rotativo da manivela.

### **3.1 Ciclo Otto**

O ciclo Otto foi desenvolvido por Otto e seus dois irmãos, os primeiros protótipos que utilizavam o motor com essa configuração, foram amplamente aceitos devido à maior eficiência e devido ao fato de ser mais silenciosos que os modelos concorrentes (DA ROSA, 2015).

Os motores de combustão interna cujo processo se caracteriza como ciclo Otto, utiliza a mistura 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).

De acordo com Da Silva (2017, p. 32) “Os motores de ignição por centelha tem 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”.

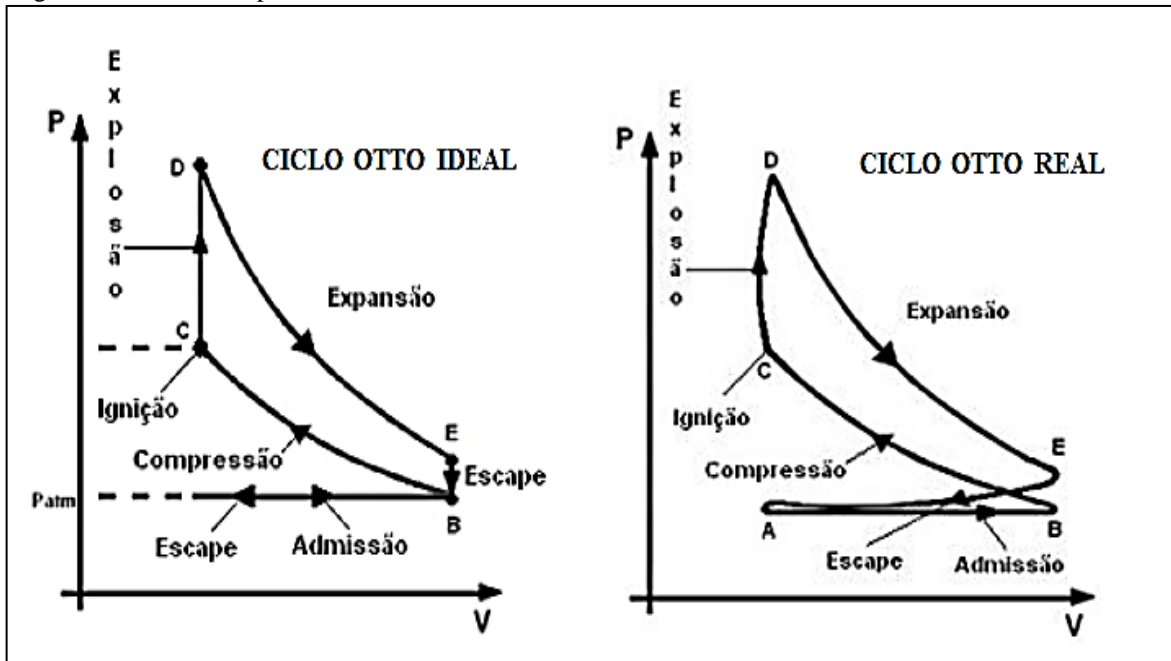
Os motores de ciclo Otto, são conhecidos por apresentar um volume constante, o ar e o combustível que são aspirados para dentro do cilindro antes da etapa de compressão. O

processo de combustão se inicia a partir de uma descarga elétrica de tensão elevada, comumente chamada de faísca, a mesma se origina através da vela de ignição presente no veículo automotor (MACHADO, 2014).

“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 as suas aplicações.” (BRUNETTI, 2012, p. 49).

A figura 03 apresenta um gráfico comparativo entre os dois modelos de ciclo Otto, o ciclo ideal e ciclo real. O modelo é representado através do diagrama de pressão x volume, podem-se destacar algumas variações tanto na compressão como no escape, percebe-se uma pequena variação no processo de explosão.

Figura 3 - Gráfico comparativo entre o ciclo Otto ideal e o ciclo Otto real.



Fonte: Adaptado de (WOLLMANN, 2013) .

Os motores de combustão interna que possuem como modelo de funcionamento o Ciclo Otto, podem apresentar quatro tempos, que são divididos em: admissão, compressão, expansão e escape (MACHADO, 2014).

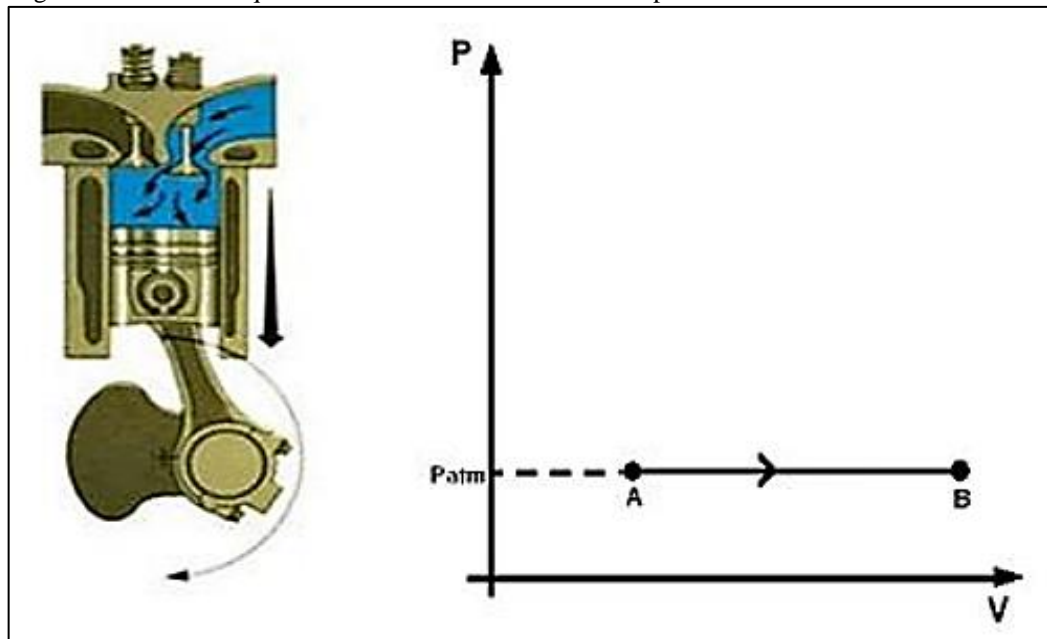
“Nos motores de quatro tempos, o ciclo de trabalho corresponde as duas voltas da árvore de manivelas. Na medida em que a árvore de manivelas ou virabrequim realiza o movimento rotativo, os pistões se movem dentro dos cilindros” (MILHOR, 2002, p. 04).

A seguir, será apresentado o funcionamento detalhado dos quatro ciclos termodinâmicos de trabalho no motor de combustão interna, juntamente com o diagrama de Pressão x Volume.

### 3.1.1 Primeiro Tempo - Admissão da mistura

Nesse primeiro ciclo haverá a abertura das válvulas de admissão, possibilitando a entrada de ar para o cilindro, a pressão ficará constante e o volume sofrerá variação ( $A \rightarrow B$ ) (WOLLMANN, 2013; DA SILVA, 2017).

Figura 4 - Processo esquematizando a abertura das válvulas para a entrada de ar.

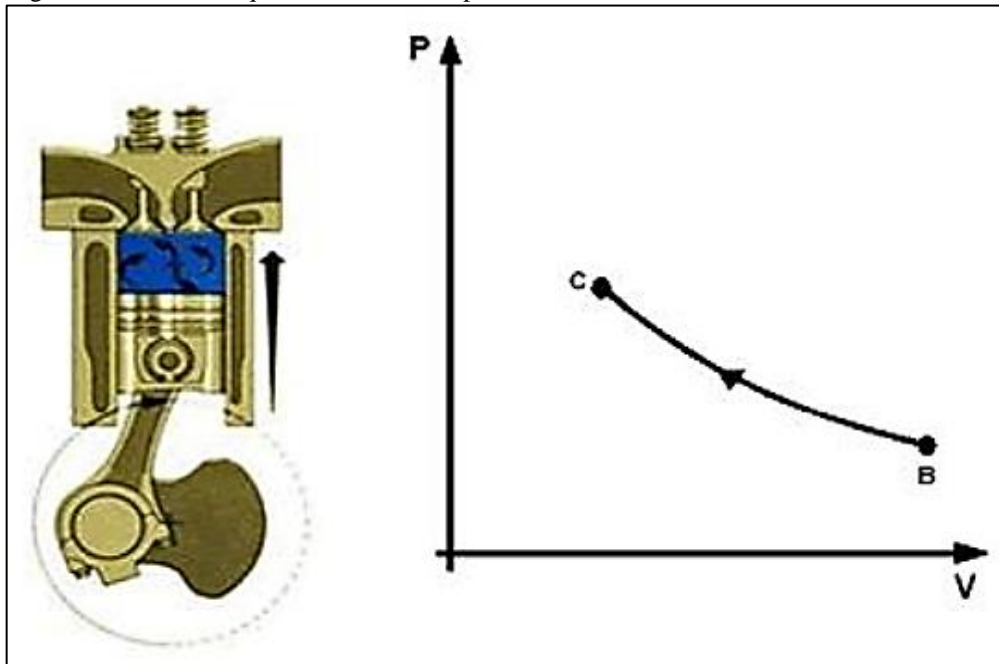


Fonte: (WOLLMANN, 2013)

### 3.1.2 Segundo Tempo - Compressão da mistura

Nessa fase, todo o trabalho envolvido no pistão é convertido em energia, esse processo ocorre em temperaturas elevadas que se dá por meio da combustão. O volume diminui à medida que a pressão e a temperatura aumentam. ( $B \rightarrow C$ ) (WOLLMANN, 2013; DA SILVA, 2017).

Figura 5 - Processo esquematisando a compressão do ar no cilindro.

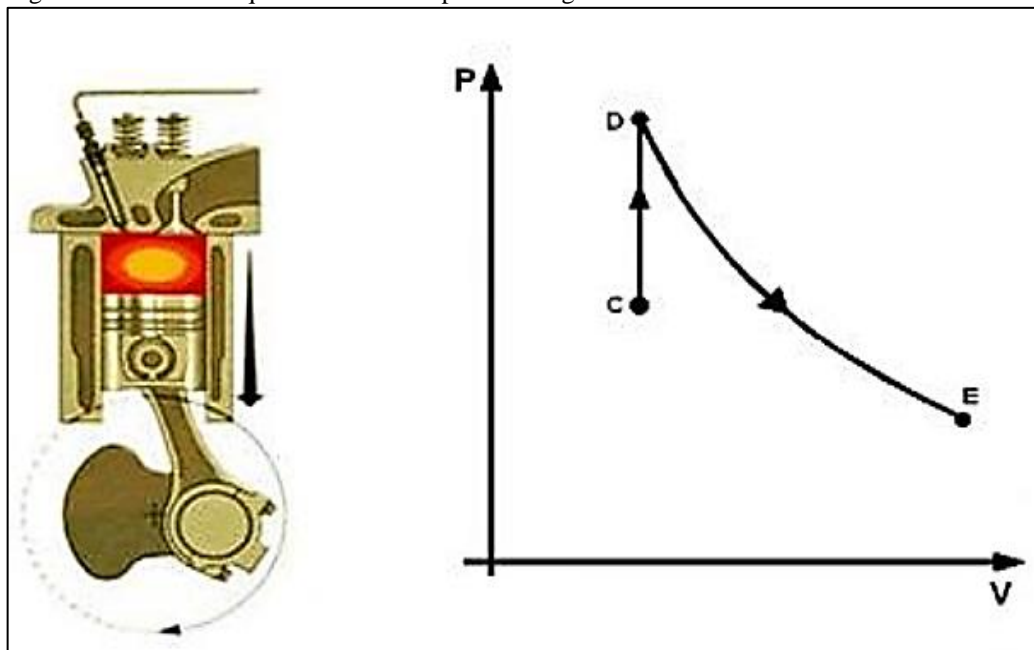


Fonte: (WOLLMANN, 2013).

### 3.1.3 Terceiro Tempo - Expansão da mistura

Nessa fase ocorrerá a explosão, sem variação de volume, já que essa reação é extremamente rápida. Ocorrerá ainda, um aumento de pressão e temperatura, ( $C \rightarrow D$ ). Num segundo momento, ( $D \rightarrow E$ ), os pistões se movimentarão com enorme rapidez, impossibilitando a troca de calor (WOLLMANN, 2013; DA SILVA, 2017).

Figura 6 - Processo esquematisando a explosão dos gases dentro do cilindro.



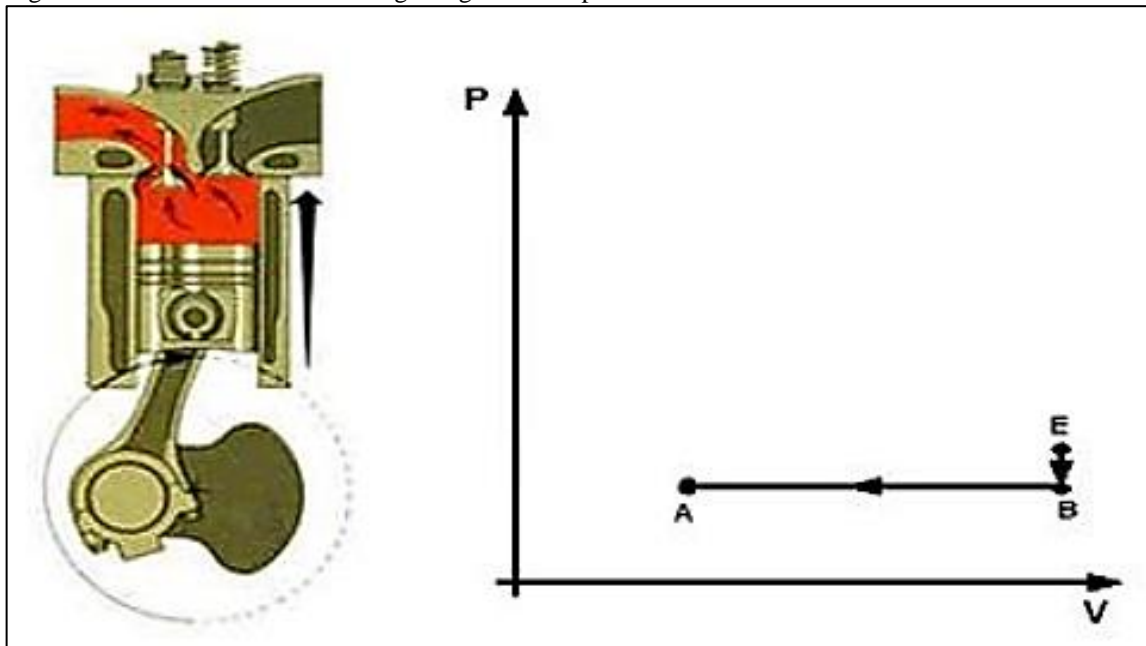
Fonte: (WOLLMANN, 2013).



### 3.1.4 Quarto Tempo - Escape dos gases

No ultimo processo, ocorrerá à abertura da válvula do motor ( $E \rightarrow B$ ), haverá variação de pressão, e volume constante. A exaustão gerada no processo ( $B \rightarrow A$ ), a massa e o volume desses gases sofrerão variações constantes, considerado como isobárico (WOLLMANN, 2013; DA SILVA, 2017).

Figura 7 - Processo da exaustão dos gases gerados no processo de combustão.



Fonte: (WOLLMANN, 2013).

### 3.2 Eficiência nos motores de combustão interna

A eficiência ou capacidade de um motor é representada pela potência, no qual determina a quantidade de trabalho que o mesmo pode realizar por unidade de tempo. O rendimento nos motores é representado pela relação entre a potência produzida e a potência calorífica fornecida pelo combustível utilizado. Isto quer dizer que o rendimento é a eficiência de transformação de calor em trabalho (DA ROSA, 2015).

A seguir, pode-se verificar a equação que da origem ao rendimento ou eficiência dos motores de combustão interna.

$$\eta = \frac{[(P * 1000)]}{Mc * Hc} = \frac{W}{Q} \quad (4)$$

Onde:

$\eta$ : Rendimento do processo (%)

P: Potência gerada (W)

Mc: Vazão mássica do combustível ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

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

W: Trabalho (J)

Q: Calor (J)

Com o passar dos anos a tecnologia avançou significativamente, principalmente no ramo automobilístico, e a busca por motores de combustão interna mais eficiente se tornou uma necessidade não somente do ponto de vista econômico e tecnológico, mas também visando a sustentabilidade e o meio ambiente. Tendo como base que os motores de combustão interna são responsáveis pela alta emissão de gases poluentes, os mesmos estão sendo projetados para que o nível de poluição diminua (CARVALHO, 2011).

Segundo Figueiredo (2018, p. 06),

A adição de hidrogênio no processo de combustão interna aumenta esse limite de operação propiciando um método eficaz de eficiência térmica, permitindo uma combustão completa em um espectro mais amplo de possibilidades referentes ao excesso de ar na mistura.

De acordo com Carvalho (2011, p.5 e 6),

A definição de eficiência pode ser aplicada na avaliação de inúmeros processos e em diferentes formas de conversão de energia. Um tradicional exemplo é aplicado em um equipamento que envolve a queima de um combustível, onde a eficiência é baseada no poder calorífico do combustível. Outro fator importante para a caracterização da eficiência de um motor de combustão é o tipo de combustível utilizado. Cada combustível possui propriedades e constituição química diferente que, de acordo com sua energia e característica de sua combustão, resultam em diferentes parâmetros de desempenho, emissões e eficiência.

### **3.3 Relação Estequiométrica – Ar X Combustível**

“A ótima razão ar combustível para determinada carga e rotação de um motor, consiste naquela em que se consegue o torque desejado, com o menor consumo de combustível consistente com a operação normal e confiável.” (CÂMARA, 2006, p.26). De acordo com Andrade (2007, p. 42), para se determinar qual é a condição de mistura na câmara

de combustão tem-se, que relacionar a taxa de massa de ar admitido com a taxa de massa de combustível que entra no motor.

Para que haja uma mistura ideal entre o carburante (combustível) e o comburente (gás) não basta apenas mesclar o ar e o combustível. Faz-se necessário uma boa vaporização desses elementos de forma que os mesmos se misturem de forma homogênea com o ar (WOLLMANN, 2013).

De acordo com Da Rosa (2015, p.10),

Nos motores de combustão interna, a estequiometria trata das relações entre quantidades de ar e combustível, e dos produtos da combustão. O principal fator que regula a potência, eficiência e emissões de gases em motores é o processo de combustão. Em motores de ignição por centelha (Ciclo Otto), a mistura ar x combustível já ocorre no sistema de admissão, e depois dessa mistura, uma descarga elétrica dá início à combustão.

De acordo com Senra; De Lima; De Abreu (2014, p.10),

Os motores de combustão interna, ciclo Otto, a mistura de ar e combustível advindos do carburador, em suas corretas proporções, são aspiradas para a câmara de combustão, onde esta é realizada, a partir de uma centelha produzida por uma vela de ignição. É o caso de todos os motores a gasolina, álcool, gás ou metanol, utilizado em geral nos automóveis.

Para o conhecimento da razão entre o ar e o combustível num motor de combustão interna no ciclo Otto, o fator lambda ( $\lambda$ ) se torna um elemento extremamente utilizado para avaliar as formas de operação que possam melhorar o desempenho desse motor. Como consequência, acarretará numa redução nas emissões de poluentes, tendo em vista que, os gases são liberados através da queima destes elementos (SCHIRMER; OLANYK; RIBEIRO, 2017).

### **3.4 Fator Lambda ( $\lambda$ )**

“O Fator Lambda mede o desvio da mistura realmente admitida no cilindro com relação à mistura ideal ou estequiométrica, e pode ser utilizado para caracterizar os diferentes tipos de mistura, independentemente do combustível utilizado.” (SENRA; DE LIMA; DE ABREU, 2014, p.10). O fator lambda tem por objetivo ser utilizado na relação estequiométrica (ar x combustível), onde o mesmo resulta no quociente da mistura entre o ar e o combustível real pelo ideal (BARBOSA; TAMBOR, 2016).

Se tratando de relações estequiométricas, há uma definição sobre um possível valor utilizado no fator lambda ( $\lambda$ ) que se obtém pela razão entre o ar x combustível real pelo ar x combustível teórico. O valor considerado ideal do fator lambda é igual a 1, entretanto, pode-se variar conforme o tipo de combustível utilizado pelo motor (HEYWOOD, 1988; DO NASCIMENTO, 2008).

A partir da equação (2) do fator lambda, pode-se determinar o resultado da mistura real em relação à mistura ideal dentro do cilindro. Esta equação pode ser utilizada para se calcular outros tipos de misturas, independente do combustível utilizado pelo motor (DA ROSA, 2015).

$$\lambda = \frac{[A/F]_{at}}{[A/F]_{st}} \quad (5)$$

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

“Um motor no ciclo Otto pode operar em razões de mistura ar/combustível, lambda ( $\lambda$ ) desde a região rica (excesso de combustível,  $\lambda < 1$ ) até a região pobre (excesso de oxigênio,  $\lambda > 1$ ) passando pelo ponto estequiométrico ( $\lambda = 1$ ).” (SILVA; MENEZES; CATALUÑA, 2008, p. 980).

O quadro 02 apresenta a relação do fator lambda e o tipo de mistura na combustão dentro de um motor de combustão interna.

Quadro 02- Relação do fator lambda com o tipo de mistura

Fator $\lambda$	Tipo de mistura	Quantidade de ar
<b>&gt;1</b>	Pobre	Excesso
<b>&lt;1</b>	Rica	Falta
<b>=1</b>	Ideal	Ideal

Fonte: (BARBOSA; TAMBOR, 2016).

Pode-se observar no quadro 02 que o fator lambda interfere diretamente no tipo de mistura e quantidade de ar na combustão interna de um motor.

“Os motores que utilizam álcool ou gasolina atuam melhor com o fator lambda próximo a  $\lambda = 1$ , pois este é o ponto em que se obtém o maior torque associado ao menor consumo e menor emissão de poluentes.” (DO NASCIMENTO, 2008, p. 25).

Como pode ser visto no capítulo 3, o motor de combustão de interna possui inúmeros processos. Todos esses processos fazem parte de um conjunto do motor de um veículo pelo qual se acopla o gerador de hidrogênio que será explicado no capítulo a seguir.

#### 4 GERADOR DE HIDROGÊNIO (HHO)

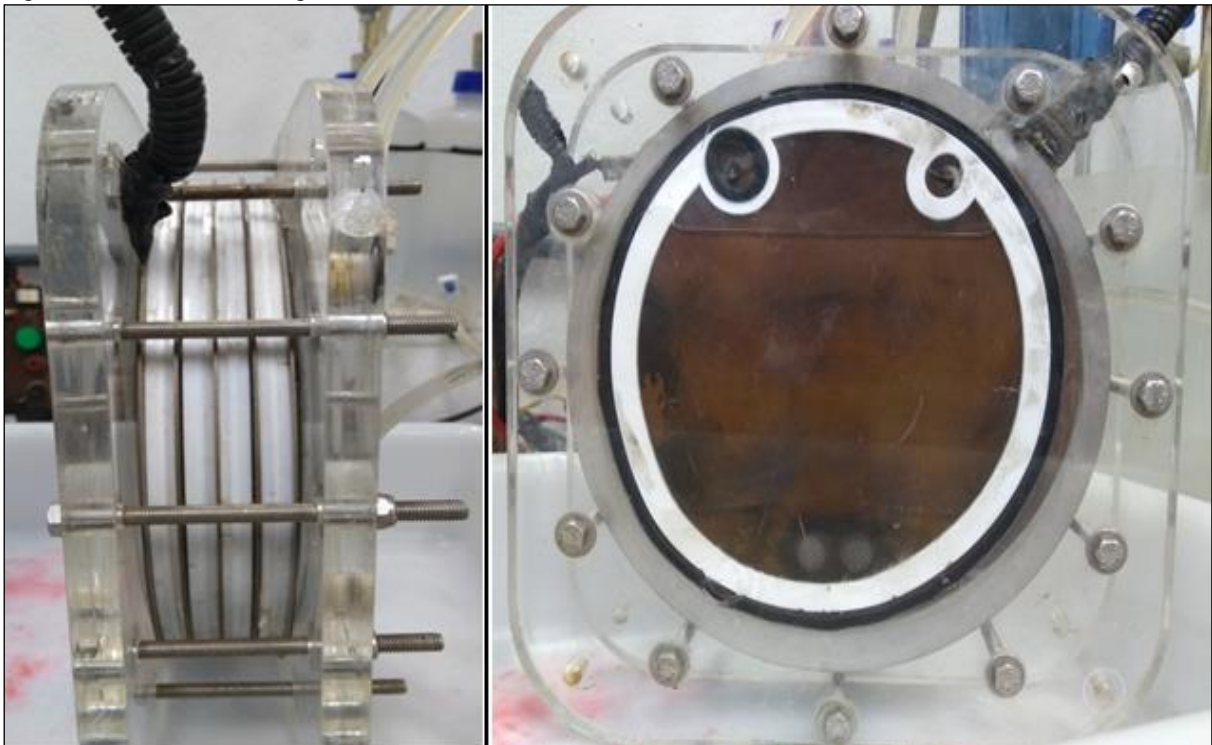
O gerador de hidrogênio pode ser conhecido também como célula eletrolítica a seco ou *dry cell*. O seu funcionamento baseia-se em placas de material inox, onde são alimentadas por uma tensão que provém de uma fonte ou bateria. A mistura que circula através dos furos da placa, é composta de uma mistura de água e hidróxido de potássio. As placas possuem vedação entre elas para que não ocorram possíveis vazamentos, além disso, esse procedimento se faz necessário pelo fato de se obter uma isolação quanto à polaridade de tensão proveniente das baterias (FIGUEIREDO, 2018).

De acordo com Zirr (2017, p. 24),

Um Gerador de Hidrogênio, é um dispositivo eletro químico que, através da eletrólise segura de uma solução líquida de água, associado a uma base como hidróxido de sódio ou bicarbonato de sódio, transforma os elementos presentes nessa solução, hidrogênio e oxigênio em gás.

“O nome HHO é um conceito em que a molécula de água ao ser decomposta vai gerar duas moléculas de hidrogênio e uma de oxigênio. Consiste em fazer a decomposição da molécula de água ( $H_2O$ ) em  $H_2$  e  $O_2$ , através da eletrólise da água.” (SILVA, 2016a, p.31).

Figura 8 - Gerador de hidrogênio utilizado nos testes laboratoriais.



Fonte: O autor (2018).

#### **4.1 Desempenho de um gerador de hidrogênio**

Para que o gerador de hidrogênio seja capaz de obter um bom desempenho e uma eficiência satisfatória, faz-se necessário uma boa atividade eletrocatalítica e uma estabilidade dos eletrodos. Outros fatores a serem considerados se tratando do bom desempenho do gerador, seria a geometria das peças utilizadas no equipamento, a separação entre os eletrodos, os reativos que compõem a água utilizada no processo químico da eletrolise, dentre outros (PEREIRA, 2017).

De acordo com Zirr (2017, p. 21) “a implantação das células a combustível a hidrogênio em uma escala significativa requer grandes avanços na produção, armazenamento e utilização de hidrogênio”.

“O objetivo principal de um gerador de hidrogênio é produzir de modo mais eficiente a quantidade de gás HHO desejada utilizando a menor quantidade de eletricidade possível.” (BARRETIRI e HAUS, 2013, p. 366).

#### **4.2 Aplicação do hidrogênio em motores de combustão interna**

Para que o hidrogênio possa ser utilizado em motores de combustão interna no ciclo Otto, faz-se necessário que o mesmo seja introduzido ao motor no momento em que ocorra a combustão no interior de cilindro. Existem três formas distintas para que o hidrogênio seja adicionado ao motor, o mesmo pode ser inserido por injeção contínua e controlada, ambas pelo coletor de ar de admissão do motor, e a última seria através da injeção direta do gás na câmara de combustão, na qual, em comparação com as demais, apresenta os melhores resultados (PEREIRA, 2017).

O hidrogênio que se obtém através de sua forma pura através do processo da eletrolise da água, pode apresentar algumas propriedades químicas e físicas que torna adequado o seu uso principalmente em motores de combustão interna. Além disso, o uso desse elemento no motor faz com que o nível de emissão de gases poluentes possa diminuir, tendo em vista que o mesmo se torna livre de carbono (SILVA, 2017).

#### **4.3 Funcionamento do gerador de hidrogênio no motor**

Para que ocorra o funcionamento do gerador de hidrogênio no motor, faz-se necessário a geração do hidrogênio e o oxigênio através da eletrolise. As correntes elétricas necessárias

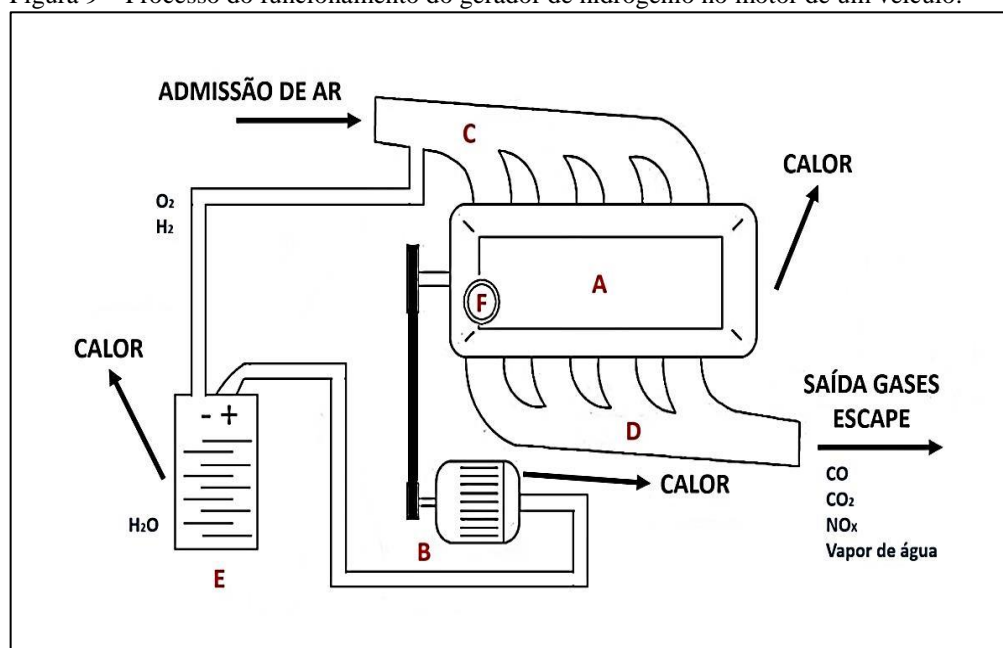
para que o processo ocorra, são advindas da eletricidade fornecida pela bateria e o circuito de carga do motor, sendo que a bateria é alimentada ou carregada pelo alternador que está presente no motor do veículo, o mesmo é acionado através da rotação exercida pelo motor do carro. Tendo o hidrogênio como gás através do processo da eletrolise, o mesmo é encaminhado para o sistema de admissão do veículo em temperatura elevada, onde é queimado com os demais elementos. Por fim, depois de passar pelos processos internos do motor, esses gases são liberados através do escape (SILVA, 2016).

De acordo com Barretiri e Haus (2013, p. 370),

Não é necessário um tanque de armazenamento para o gás, pois toda a mistura produzida pela célula é injetada diretamente no carburador dos motores, fazendo com que a queima ocorrida nas câmaras de combustão seja uma mistura entre o ar, o combustível de consumo original do veículo e o gás HHO produzido pela célula de hidrogênio, que é alimentada pela própria bateria do carro, gerando, assim, a eletrólise.

Para que um motor funcione apenas com hidrogênio produzido no processo da eletrólise, que por sua vez seria alimentada pela energia produzida pelo próprio motor através do alternador, seria algo muito complexo, caro e de certa forma inviável. Algo que poderia ser feito relativamente mais fácil e com baixo custo é um dispositivo que irá aumentar a eficiência do motor, oferecendo uma energia ou eletricidade extra no processo da eletrólise, denominado célula eletrolítica (ZIRR, 2017).

Figura 9 – Processo do funcionamento do gerador de hidrogênio no motor de um veículo.



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2016). Legenda: a) Motor; b) Alternador; c) Admissão; d) Escape; e) Produção HHO.



#### 4.4 Células de hidrogênio ou eletrolítica

As células de hidrogênio são consideradas equipamentos semelhantes às pilhas, no entanto, elas não armazenam a energia. A eletricidade pode ser gerada enquanto a célula estiver sendo alimentada por um combustível. A reação química é trivial: o hidrogênio combustível é colocado no anodo da célula, enquanto o oxigênio, do ar, entra pelo catodo. Utilizando-se um catalisador, o hidrogênio reage com o oxigênio, gerando energia e vapor d'água (GOLDENSTEIN; AZEVEDO, 2006).

“As células eletrolíticas são dispositivos que quebram ligações químicas entre hidrogênio e oxigênio por meio da eletrólise. A estrutura da célula é composta por placas paralelas de inox, material que pouco sofre oxidação, e por anéis de borracha para vedação.” (LELUDAK; HAUS, 2013, p. 386).

De acordo com Zirr (2017, p. 22),

Uma célula eletrolítica (comumente chamada de gerador ou reator de hidrogênio), a qual utiliza a energia provinda do sistema de conversão de energia cinética em elétrica do motor (alternador), a qual é armazenada na bateria e possibilita a partida elétrica e o funcionamento de componentes eletrônicos nos veículos.

O funcionamento de uma célula de hidrogênio de acordo com Goldenstein e Azevedo (2006, p. 249) pode ser analisado de acordo com citação abaixo:

A célula é alimentada com hidrogênio do lado do anodo, e o catalisador estimula a formação dos íons de hidrogênio. Os elétrons viajam para o catodo, gerando a corrente elétrica, que será aproveitada antes de chegar ao catodo. Ao mesmo tempo, os prótons de hidrogênio atravessam a membrana e alcançam o catodo, reagindo com oxigênio do ar e formando vapor d'água.

De acordo com as informações mencionadas no decorrer deste capítulo, pode-se concluir que existem diferenças entre o gerador de hidrogênio e a célula de hidrogênio. A principal diferença entre os dois dispositivos se dá pelo fato do gerador de hidrogênio utilizar a eletricidade que provem do alternador do veículo, para realizar a quebra da molécula de água em hidrogênio e oxigênio através do processo da eletrólise. A célula de hidrogênio realiza o processo ao contrário, a mesma necessita do hidrogênio para produzir a própria eletricidade (FIGUEIREDO, 2018; ZIRR, 2017).

## **5 METODOLOGIA**

Nesse capítulo, serão informados quais métodos foram utilizados para a realização das pesquisas e testes laboratoriais, bem como o desenvolvimento do trabalho.

### **5.1 Técnicas de pesquisa**

No referencial teórico, foi utilizada a pesquisa bibliográfica, contida em materiais já elaborados por outros autores sobre o assunto, como por exemplo, teses de doutorado, dissertações de mestrado, artigos científicos dentre outros.

No decorrer deste trabalho, será apresentado um breve histórico sobre o hidrogênio, eletrólise, motores de combustão interna, ciclo otto, gerador de hidrogênio e os resultados obtidos nos testes laboratoriais. A análise que será apresentada no decorrer deste trabalho foi possível somente com a ajuda de professores com um elevado grau de conhecimento sobre o tema abordado.

O objetivo principal da análise realizada no trabalho será apresentar um estudo desmistificando através de testes laboratoriais e materiais teóricos, que o gerador de hidrogênio acoplado a um motor de combustão interna, não provoca de fato, uma economia de combustível, tendo em vista, as informações que circulam nas mídias sociais. A desmistificação dessa informação trará uma enorme relevância, pelo fato de mostrar realmente que o gerador de hidrogênio não reduz a quantidade de combustível gasta pelo veículo.

### **5.2 Testes laboratoriais**

Conforme proposto, foram realizados testes em laboratório simulando através de um gerador de hidrogênio, a quantidade de hidrogênio que o mesmo produziria numa determinada corrente elétrica e num período de tempo estipulado para o gás preencher um balão com capacidade de 2 litros. O experimento serviu como base para coletar dados que serão aplicados em fórmulas, a fim de se comprovar que o uso do hidrogênio em motores de combustão interna não será viável.

#### **5.2.1 Equipamentos utilizados nos testes**

Para a realização dos testes no laboratório, foram utilizados equipamentos essenciais para que os resultados obtidos fossem o mais preciso possível. Para o experimento foi utilizado uma fonte, onde a mesma regulava a carga e a corrente elétrica para a execução de todo o processo. Sabe-se que o alternador, fornece em torno de 70 ampères para o sistema elétrico do veículo, entretanto, a corrente elétrica predefinida para a realização dos testes, variou em torno de 25 amperes, tendo em vista que existem outros equipamentos a serem alimentados pelo alternador.

Outro equipamento utilizado nos testes foi o gerador de hidrogênio, principal instrumento para a realização dos testes. Outro acessório muito importante são as mangueiras, cuja função era transportar os gases que circulavam durante o experimento. Por fim, foi utilizado um balão volumétrico, esse elemento era o responsável por armazenar os gases provenientes do processo de eletrólise.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos testes realizados em laboratório, sobre a quantidade de hidrogênio produzida numa determinada corrente elétrica através do gerador de hidrogênio. Será apresentada a quantidade teórica de hidrogênio em litros, obtida através de cálculos, bem como a quantidade obtida nos testes laboratoriais. Além disso, serão apresentados alguns resultados mediante aos assuntos abordados no decorrer deste trabalho.

### 6.1 Dados coletados nos ensaios laboratoriais

Para a realização dos testes, foram considerados alguns fatores para a coleta dos dados. A contagem do tempo foi definida de acordo com a capacidade que um balão volumétrico de 2 litros, fosse totalmente ocupado pelos gases provenientes do processo de eletrólise. Os valores da pressão atmosférica e temperatura foram considerados de acordo com a localização da cidade de Varginha – MG, e no momento do teste respectivamente.

Quadro 03 – Dados coletados dos ensaios em laboratório.

<b>1º Ensaio</b>			
<b>Tempo (s)</b>	<b>Corrente elétrica (A)</b>	<b>Pressão atmosférica (mmHg)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
124	24	700	25
<b>2º Ensaio</b>			
<b>Tempo (s)</b>	<b>Corrente elétrica (A)</b>	<b>Pressão atmosférica (mmHg)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
130	23	700	25

Fonte: O autor (2018).

Para a realização dos cálculos foram realizados a média da corrente elétrica e o tempo gasto no experimento.

### 6.2 Cálculo volumétrico 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) presente na seção 2.2.1.

$$Q = i * t \quad (6)$$

Substituindo pelos dados coletados, pode-se encontrar a carga elétrica utilizada nos testes.

$$Q = 23,5 * 127$$

$$Q = 2984,5 C$$

Possuindo o valor da carga elétrica (Q), pode-se encontrar o volume inicial de hidrogênio produzido pelo gerador. Este valor pode ser calculado através de uma regra de três, dada pela equação (2) na seção 2.2.1.

$$2 * 96500 \rightarrow 22,4 \quad (7)$$

$$Q \rightarrow V_0$$

Substituindo pelos dados, pode-se encontrar o volume inicial de hidrogênio produzido pelo gerador de hidrogênio.

$$2 * 96500 \rightarrow 22,4$$

$$2984,5 \rightarrow V_0$$

$$V_0 = 0,346 L \text{ ou } 346 mL$$

Encontrando o volume inicial de hidrogênio ( $V_0$ ), pode-se encontrar o volume final, através da fórmula de condições normais de temperatura e pressão (CNTP), dada pela equação (3) na seção 2.2.1.

$$\frac{P_0 * V_0}{T_0} = \frac{P_1 * V_1}{T_1} \quad (8)$$

Substituindo pelos dados encontrados na equação anterior, tem-se:

$$\frac{760 * 0,346}{273} = \frac{700 * V1}{25 + 273}$$

$$V1 = 0,41 L \text{ ou } 410 mL$$

Tendo em vista que, o gerador de hidrogênio possui 4 membranas, o volume final deve ser multiplicado por 4. Uma observação importante a ser destacada, é o fato de o teste ter ocorrido com a presença de dois gases, o hidrogênio e o oxigênio. Por isso, deve-se subtrair 1/3 de oxigênio do volume final. Levando em consideração as informações acima, obtêm-se o volume final de hidrogênio.

$$V1 = 0,41 * 4 \tag{9}$$

$$V1 = 1,64 L$$

Subtraindo 1/3 de oxigênio do volume encontrado acima, obtêm-se o volume teórico final de hidrogênio produzido pelo gerador.

$$V1 = \frac{1,64}{1/3} \tag{10}$$

$$V1 = 1,09 L$$

Mediante aos cálculos realizados, o volume final de hidrogênio produzido pelo gerador de hidrogênio nas condições citadas anteriormente, é de 1,09 litros. Nos testes realizados em laboratório, o volume final de hidrogênio encontrado, foi de 1,33 litros, havendo uma diferença de 0,24 litros. Essa diferença se deve por algum fator externo, como temperatura ou pressão atmosférica.

### 6.3 Cálculo da massa de hidrogênio produzida nos testes

De acordo com os valores encontrados na seção 6.2 e levando-se em consideração que a massa de um mol de hidrogênio (H<sub>2</sub>) equivale a 2 gramas, pode-se encontrar a massa (m) do mesmo, produzida durante os testes laboratoriais, através de uma regra de três, tendo como

informação preponderante que 22,4 é o volume em litros de 1 mol de qualquer gás nas condições normais de temperatura e pressão (CNTTP).

$$\begin{aligned} 2 &\rightarrow 22,4 \\ m &\rightarrow 1,09 \\ m &= 97,32 \text{ mg} \end{aligned} \tag{11}$$

De acordo com a equação 9, pode-se observar que a massa de hidrogênio produzida no processo é de 97,32 mg.

#### 6.4 Cálculo de potência no processo

Considerando alguns dados preliminares, pode-se calcular a quantidade de potência que o gerador de hidrogênio absorve de um veículo automotivo. Para base de cálculos é necessário considerar que o sistema de alimentação de um veículo varia em torno de 13,8 a 14,5 volts, de acordo com o manual de baterias da BOSCH. Para a realização do cálculo, se faz necessário a utilização da equação abaixo:

$$P = U * i \tag{12}$$

Onde:

P: Potência (W);

U: Tensão (V);

i: Corrente elétrica (A).

Substituindo na equação acima, temos que:

$$P = 14 * 23,5$$

$$P = 329 \text{ W}$$

De acordo com a potência encontrada acima, pode-se concluir que o gerador de hidrogênio absorve 329 Watts de potência do veículo e devolve cerca de 1,09 litros ou 97,32 mg de hidrogênio, valor extremamente baixo.

Considerando que um veículo possua 80 cv de potência e aplicando o resultado da potência encontrada na equação anterior, pode-se encontrar o percentual de potência que o gerador devolve ao motor.

$$\begin{aligned} 58840 &\rightarrow 100 \\ 329 &\rightarrow X \\ X &= 0,56 \% \end{aligned} \tag{13}$$

De acordo com o percentual encontrado na equação acima, pode-se constatar que esse resultado é considerado extremamente baixo para meios viáveis de potência. Resumindo, o gerador de hidrogênio absorve mais energia do motor e devolve uma quantidade extremamente baixa para o mesmo.

Para finalizar este capítulo será apresentado um quadro, contendo algumas vantagens e desvantagens do gerador de hidrogênio num veículo possuindo um motor de combustão interna. Essas informações foram possíveis, mediante aos testes realizados em laboratório, bem como os materiais que contemplam esse trabalho.

### **6.5 Vantagens e desvantagens do uso do gerador de hidrogênio em motores de combustão interna**

O quadro 04 exibido a seguir, apresentará algumas vantagens e desvantagens do uso do gerador de hidrogênio em veículos automotivos que possuem motores de combustão interna.



Quadro 04 – Vantagens e desvantagens do uso do gerador de hidrogênio em motores de combustão interna.

Vantagens	Desvantagens
<p>O fato de se usar hidrogênio e oxigênio, ocasionará uma redução dos gases poluentes, nomeadamente CO (Monóxido de carbono), CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono) e NO<sub>x</sub> (Óxido de nitrogênio).</p>	<p>O uso indevido deste elemento no veículo, poderá ocasionar possíveis explosões, já que o hidrogênio na forma gasosa é inflamável.</p>
	<p>Na instalação do sistema HHO ao veículo, será necessário à produção de mais energia elétrica ao alternador, que é movido pelo motor, que consumirá mais combustível para produzir essa energia.</p>
	<p>Devido à ação da corrente elétrica na água, pode-se ocorrer outro efeito além da eletrolise, a ebulição. Esse efeito provocará a entrada de vapor d'água na admissão, possibilitando alguns problemas adversos na eficiência do sistema.</p>
<p>A utilização deste sistema possibilita a “limpeza” dos motores, pois evitará a deposição de resíduos de carvão nas cabeças do motor, válvulas, coletores e até sistema de escape.</p>	<p>O sistema é limitado pela quantidade de energia elétrica disponível no veículo. Se esta energia estivesse disponível, seria necessário um gerador de hidrogênio com uma área relativamente maior, sendo necessário um espaço maior para seu armazenamento.</p>
	<p>De acordo com os cálculos apresentados no decorrer deste trabalho, é evidente que o volume de hidrogênio que o gerador produz não apresentará nenhuma economia de combustível ao veículo automotivo.</p>
	<p>Em rotações mais elevadas, os motores poderão apresentar falhas de ignição e há ciclos que não são completados, pois não há queima de combustível.</p>

Fonte: (SILVA, 2016); O autor (2018).

De acordo com o quadro 04, são evidentes as percepções de que o número de desvantagens quando se utiliza hidrogênio através do gerador, num veículo com motor de combustão interna o faz completamente inviável.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou analisar através de testes laboratoriais e material teórico, o uso do hidrogênio em motores de combustão interna, através do gerador de hidrogênio. Tal análise, se justifica pelo fato de verificar uma possível economia de combustível num veículo possuindo um motor de combustão interna. Essa análise possibilita desmistificar as informações que circulam nas mídias sociais, sobre o tema abordado no decorrer deste trabalho, se tornando um assunto de extrema relevância para a sociedade, como um todo.

Os resultados obtidos através dos testes realizados em laboratório e de acordo com os materiais teóricos provam que o hidrogênio originando-se do gerador de hidrogênio, não se torna viável para um veículo automotivo de combustão interna. São inúmeras as desvantagens que o uso do mesmo, acarreta ao veículo, chegando-se a conclusão que não será viável nas condições propostas. A quantidade de hidrogênio que o gerador produz, não satisfaz as condições para que haja uma possível economia de combustível, satisfazendo o objetivo principal do trabalho, em desmistificar as informações que circulam nas redes.

Uma hipótese para continuar os estudos e pesquisas futuramente, seria analisar o uso do hidrogênio nos motores de combustão interna, sem a presença do gerador, estando o mesmo, armazenado e um local adequado dentro do veículo, como no caso de veículos que utilizam o gás natural como combustível.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Giovanni Souza de. **Avaliação experimental da duração de combustão para diferentes combustíveis, em um motor padrão Ciclo Otto ASTM-CFR**. 2007, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ANGHEBEN, Antônio Augusto. **Estudo sobre a combustão de blendas de hidrogênio e diesel em motores ciclo diesel**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, Palotina.
- BARBOSA, Caio Henrique; TAMBOR, José Humberto Machado. Redução de consumo de combustível convencional pela adição de gás hidrogênio. **Caleidoscópio**, v. 1, n. 8, 2016.
- BARRETIRI, Thiago Renato; HAUS, Tiago Luis. Análise da viabilidade da utilização de hidrogênio em motores a combustão interna. **Caderno PAIC**, v. 14, n. 1, p. 363-381, 2013.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2012.
- CÂMARA, Júlio César Chaves. **Monitoramento eletrônico da mistura ar/combustível em motores de combustão interna ciclo Otto**. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- CARVALHO, Marcio Augusto Sampaio de. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- COURTNEY, Thomas H. **Mechanical behavior of materials**. 2. ed. Waveland Press, 2005.
- DA ROSA, Daniel Argenta. **Análise teórica e experimental do desempenho de um motor ciclo Otto alimentado a GNV e testes com hidrogênio como combustível auxiliar**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade De Tecnologia – FTEC, Caxias do Sul.
- DA SILVA, Thiago Rodrigo Vieira. **Estudo de estratégias de controle dos processos internos de um motor de combustão interna de injeção direta de etanol turbo-alimentado para maximização da eficiência global**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- DA SILVA, Givanildo Santos et al. Automóveis movidos a base de água, através da célula produtora de combustível hidrogênio. **UNIT**, Alagoas, v. 3, n. 3, p. 65, 2017a.
- DA SILVA, Heverton Antônio; DA SILVA, Mikele Santos. Gerador de Hidrogênio. In: Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, gás Natural e Biocombustíveis, 2., 2016. Natal. *Anais...*
- DO NASCIMENTO, Joel Henrique Silva. **Estudo dos processos físicos envolvidos nos motores que utilizam como combustível álcool e gasolina (ciclo Otto)**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Católica de Brasília, Brasília.

ESTÊVÃO, Tânia Esmeralda Rodrigues. **O Hidrogênio como combustível**. 2008. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

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.

GOLDENSTEIN, Marcelo; AZEVEDO, Rodrigo Luiz Sias de. **Combustíveis alternativos e inovações no setor automotivo: será o fim da "era do petróleo"?**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 23, p. 235-267, mar. 2006.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. USA: McGraw-Hill, Inc, 1988.

JUNIOR, Antônio Carlos Fonseca Santos. **Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio em usinas hidrelétricas: estudo de caso em Itaipu**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KNOB, Daniel. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.

LELUDAK, Frederico Thomas; HAUS, Tiago Luis. Célula de hidrogênio: estudo e construção de uma célula eletrolítica para produção de hidrogênio gasoso. **Caderno PAIC**, v. 14, n. 1, p. 383-397, 2013.

LIMA, Francisco Lorenzo Magalhães et al. **Motores de combustão interna**. 2009. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto.

MACHADO, Deisi Oliveira. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto com biogás**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

MANUAL DE BATERIAS BOSCH. Disponível em: <[http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download\\_2/baterias/Manual\\_de\\_Baterias\\_Bosch\\_6\\_008\\_FP172\\_8\\_04\\_2007.pdf](http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/baterias/Manual_de_Baterias_Bosch_6_008_FP172_8_04_2007.pdf)>. Acesso em 02 out. 2018.

MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2006.

MAZLOOMI, S. K.; SULAIMAN, Nasri. Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4257–4263, 2012.

MEDEIROS, E. F. **Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade 2010-2025**. Centro de Gestão e Estudos Energéticos (CGEE), Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação, CGEE: Brasília, 2010.

MILHOR, Carlos Eduardo. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto**. 2002. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos.

PASSOS, Ian Eiras Versiani. **Análise de desempenho de um motor de combustão interna de uma motocicleta com o uso de mistura combustível-hidrogênio.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

PEREIRA, Ricardo da Silva et al. **Metodologia para redução do consumo de óleo diesel em sistemas de geração termoelétrica usando misturas de óleo vegetal com adição de gás hidrogênio.** 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém.

ROCHA, Hendrick Maxil Zárate. **Determinação dos efeitos da utilização de hidrogênio em grupos geradores a diesel operando com diferentes misturas diesel-óleo vegetal.** 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.

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

SANTOS, Fernando António; SANTOS, Fernando Miguel. O Combustível Hidrogénio. **Revista do ISPV**, v. 14, n.35. Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millennium/millennium31/>> Acesso em 25 Mar. 2018.

SCALABRIN, Rafael Basso. **Viabilidade do uso do hidrogênio em grupo-geradores a etanol.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade Horizontina, Horizontina.

SCHIRMER, Waldir Nagel; OLANYK, Luciano Zart; RIBEIRO, Camilo Bastos. Avaliação do desempenho de um “small non-road engine” operando com misturas gasolina e etanol. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 3, p. 789-808, 2017.

SENRA, Fernando Osório; DE LIMA, Kelly Aparecida Moreira; DE ABREU, Rodrigo Araújo. **Estudo da aplicação de hidrogênio e gasolina em motor ciclo Otto.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Francisco, Itatiba.

SILVA, Antônio Pedro Meixedo Santos. **Estudo da influência de um sistema HHO no desempenho de um motor de combustão interna.** 2016. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.

SILVA, Rita Andrade da. **Análise teórica e experimental de um motor monocilíndrico ciclo otto.** 2016a. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.

SILVA, Rosângela; MENEZES, Eliana Weber de; CATALUÑA, Renato. Rendimento Térmico e Emissões de Contaminantes Atmosféricos de Gasolinas Formuladas com Etanol, MTBE e TAEE. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 5, p. 980-984, 2008.

SILVA, Gabriela Nascimento. **Produção de hidrogênio renovável via Power to gas para mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> do refino do petróleo e maior aproveitamento da energia eólica.** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SIMIONI, Carlos Alberto. **O uso de energia renovável sustentável na matriz energética brasileira: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis.** 2006. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba.

WOLLMANN, Fábio Leandro. **Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Pinambi.

ZIRR, Leandro de Medeiros. **Consumo de motor a diesel associado com o gerador de hidrogênio.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo.