

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS

**KAIO HENRIQUE FERREIRA NOGUEIRA**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO GÁS DE HIDROGÊNIO EM  
VEÍCULOS AUTOMOTORES**

São Luís

2015

**KAIO HENRIQUE FERREIRA NOGUEIRA**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO GÁS DE HIDROGÊNIO EM  
VEÍCULOS AUTOMOTORES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito parcial para a obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador : Alex Luís da Costa Alexandre

São Luís

2015

**KAIO HENRIQUE FERREIRA NOGUEIRA**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO GÁS DE HIDROGÊNIO EM  
VEÍCULOS AUTOMOTORES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito parcial para a obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica.

Aprovada em    /    /

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Alex Luís da Costa Alexandre (Orientador)**

Universidade Estadual do Maranhão

---

**Paulino Cutrim Martins**

Universidade Estadual do Maranhão

---

**Marcos Selner Mesquita Viana**

Universidade Estadual do Maranhão

## **BIOGRAFIA DO AUTOR**

Kaio Henrique Ferreira Nogueira, nascido aos 4 de Fevereiro de 1992 no município de São Luís do Maranhão. Formou-se no ensino médio no Centro Educacional São José Operário em 2009 no mesmo município. Iniciou sua vida profissional em 2012 no ISEC Planejamento Industrial S.A. como ajudante geral no processo de levantamento de dados de construções no interior do Maranhão. Trabalhou por quatro anos, de 2012 a 2015 como professor de curso técnico em Eletromecânica e Eletrotécnica no Instituto Florence de Ensino Técnico. Ingressou na Vale, em 2014, como Estagiário de Engenharia de Confiabilidade no Grupo de Análise de Falhas em Locomotivas (GAF), função que exerce atualmente. Neste mesmo setor, atuou na elaboração e implantação de vários projetos na área de eficiência energética, tais projetos foram implantados em locomotivas GE (General Eletrics) e EMD (Eletromotivediesel). Ainda como estagiário elaborou e implantou projeto de melhoria elétrica nos circuitos de força em locomotivas Evolution (ES58ACi). No futuro, pretende especializar-se na área de Automotores e Motores Diesel de Alta Potência, tendo desde o início de sua jornada acadêmica grande afinidade com esta área.

## **DEDICATÓRIA**

À minha querida Mãe, Lucimary Ferreira Nogueira por todo amor que, sem cobrar nada em troca, tem dedicado à mim. Ela que nunca desistiu de ter um filho formado, que sempre ensinou-me o valor do estudo e deu até a última gota de suor para que eu chegasse até aqui.

À minha namorada, Leticia Cabral Correia, que em momentos de grande dificuldade, quando eu queria desistir, sempre me dizia “Levanta a cabeça e segue em frente”.

Ao meu sobrinho e afilhado José Pedro, com apenas 7 meses de vida, para quem eu espero ser exemplo e ajudá-lo a ir ainda mais longe.

Amo vocês!

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, a Deus, que nunca me deixou desistir e me permitiu realizar o sonho de ser engenheiro mecânico.

À minha Mãe, mulher guerreira e meu maior exemplo, que é e sempre será um dos pilares da minha vida e o motivo pelo qual, mesmo com toda adversidade que tenho enfrentado em minha jornada, levanto a cabeça a cada queda e sigo em frente.

À minha namorada, que sempre esteve ao meu lado, fosse para puxar minhas orelhas, fosse para me elogiar e me dar força.

Aos meus colegas de curso pelo companheirismo e pelas noites relaxantes e alegres no bar do Carlão.

Aos professores, por transmitirem seus conhecimentos para a formação de profissionais íntegros e competentes.

*“If you want something you’ve never had, you must be willing to do something you’ve never done”*

*(Thomas Jefferson)*

## RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido, pensando-se no setor de energias renováveis, para a comprovação da economia e do aumento de potência com a utilização do gás hidrogênio como combustível em veículos automotores, principalmente focando nos geradores de hidrogênio por eletrólise e nos benefícios da queima do hidrogênio como combustível auxiliar. Inicialmente, apresenta-se informações importantes para a compreensão do estudo desenvolvido. Estas informações ajudarão a entender o porquê da viabilidade do uso de células de hidrogênio como combustível em veículos automotores, além das vantagens deste combustível em relação à outros. Discute-se as propriedades do gás hidrogênio, a eletrólise da água e os motores de combustão interna. Para efeito de comprovação prática do estudo realizado, apresenta-se um caso prático realizado em um veículo automotor. Inicialmente apenas com combustível padrão, em seguida utilizando o gás hidrogênio como combustível auxiliar.

**Palavras-chave:** Células de hidrogênio, eficiência energética, energias renováveis.

## **ABSTRACT**

This work was developed, we are thinking in the renewable energy sector, for attesting the economy and increased power using the hydrogen gas as fuel in motor vehicles, mainly focusing on the hydrogen generator by electrolysis and the benefits of burning hydrogen as auxiliary fuel. Initially, it presents important information for understanding the study developed. This information will help you understand why the feasibility of using hydrogen as fuel cells in motor vehicles, in addition to the advantages of this fuel compared to others. Discusses properties of the hydrogen gas, electrolysis of water and internal combustion engines. For purposes of practical implication of the study, we present a case study conducted in a motor vehicle. Initially only with standard fuel, then use the hydrogen gas as auxiliary fuel.

**Keywords:** Hydrogen cells, energy efficiency, renewable energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Extensão de flamabilidade para vários combustíveis a temperatura atmosférica. ....	25
Figura 2 - Gerador de hidrogênio por eletrólise. ....	29
Figura 3 - Corte lateral de um motor de 4 tempos. ....	31
Figura 4 - Admissão da mistura, 1º tempo. ....	32
Figura 5 - Compressão da mistura, 2º tempo. ....	32
Figura 6 - Explosão da mistura, 3º tempo. ....	33
Figura 7 - Exaustão dos gases, 4º tempo. ....	33
Figura 8 - Gráfico que representa o Ciclo Otto ideal completo. ....	34
Figura 9 - Gráfico que representa o Ciclo Otto real completo. ....	34
Figura 10 - Gráfico que representa o Ciclo de Carnot. ....	36
Figura 11 - Hydrocell para HHO. ....	39
Figura 12 - Kit de instalação da Hydrocell HHO. ....	40
Figura 13 - Reservatório ou borbulhador. ....	40
Figura 14 - Reservatório de filtro. ....	41
Figura 15 - Placas em aço inox 316L. ....	42
Figura 16 - Vista total da BATIK. ....	42
Figura 17 - Vista da montagem da BATIK. ....	43
Figura 18 - Chip Volo Performance B2. ....	44
Figura 19 - Amperímetro digital 50A. ....	44
Figura 20 - Relé automotivo. ....	45
Figura 21 - Disjuntor Lamina. ....	45
Figura 22 - Esquema Hidráulico BATIK. ....	46
Figura 23 - Esquema elétrico de alimentação do Batik gerador. ....	47
Figura 24 - Corsa Wind Hatch Super, 1.0 EFI 8V, 60HP, ano de fabricação 2000. ....	47
Figura 25 - PWM Volo Performance. ....	48
Figura 26 - Instalação do relé e amperímetro digital. ....	48
Figura 27 - Todos os componentes Batik instalados próximo ao motor do veículo em análise. .....	49
Figura 28 - Analisador de gases PGA-500 fabricante SUN. ....	50
Figura 29 - Dinamômetro vista traseira em prova de torque e potência. ....	50
Figura 30 - Interface do dinamômetro de rolos DYNOTC 700i. ....	52
Figura 31 - Teste de Torque e Potência em relação a RPM sem H <sub>2</sub> . ....	53
Figura 32 - Teste de Torque e Potência em relação a RPM com H <sub>2</sub> . ....	54
Figura 33 - Comparativo de torque entre gasolina e adição de H <sub>2</sub> . ....	57
Figura 34 - Comparativo de potência entre gasolina e adição de H <sub>2</sub> . ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação do potencial energético entre alguns combustíveis. ....	18
Tabela 2 - Informações técnicas do hidrogênio. ....	19
Tabela 3 - Propriedades de combustão do gás hidrogênio no ar a 1 atm e 25 °C. ....	23
Tabela 4 - Valores do flashpoint para alguns combustíveis. ....	24
Tabela 5 - Tabela comparativa da ignição de alguns combustíveis. ....	26
Tabela 6 - Comparativo do número de octanagem de alguns combustíveis. ....	26
Tabela 7 - Propriedade relevantes ao uso do hidrogênio em MCIs. [13] ....	27
Tabela 8 - Reações do hidrogênio. ....	29
Tabela 9 - Esquematiza de maneira simples e reduzida o que foi apresentado. ....	38
Tabela 10 - Relação do desempenho do motor e o fator lambda. [7].....	38
Tabela 11 - Teste de emissão de poluentes no veículo com adição de H <sub>2</sub> . ....	53
Tabela 12 - Teste de consumo sem adição de H <sub>2</sub> . ....	54
Tabela 13 - Teste de consumo com adição de H <sub>2</sub> . ....	55
Tabela 14 - Média total de variação de poluentes com adição de H <sub>2</sub> . ....	56

# Sumário

INTRODUÇÃO .....	14
1. OBJETIVOS .....	16
1.1. Objetivo principal .....	16
1.2. Objetivos específicos .....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
2.1. Hidrogênio .....	17
2.1.1. Histórico .....	17
2.1.2. Características do hidrogênio.....	17
2.1.3. A Combustão do hidrogênio.....	20
2.1.4. A Deflagração .....	21
2.1.5. O Fogo .....	22
2.1.6. A Evolução da queima .....	22
2.1.7. Detonação.....	22
2.1.8. Flashpoint.....	23
2.1.9. Extensão de flamabilidade.....	24
2.1.10. Temperatura de autoignição .....	26
2.1.11. Número de octanagem .....	26
2.1.12. Energia de ignição .....	27
2.1.13. Extinção de chama .....	27
2.2. Eletrólise da água .....	28
2.2.1. Solução eletrolítica .....	30
2.3. Motores de combustão interna.....	30
2.3.1. Ciclo Otto .....	31
2.3.2. Trabalho de um motor .....	35
2.3.3. Relação estequiométrica – Ar x Combustível .....	36
2.3.4. Fator Lambda.....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1. Gerador de hidrogênio por eletrólise.....	39
3.1.1. Como funciona um gerador de H <sub>2</sub> por eletrólise .....	39
3.1.2. Componentes do Kit para geração de hidrogênio .....	40
3.1.3. Veículo Teste.....	47
3.1.4. Comissionamento do Kit para geração de hidrogênio .....	47
3.1.5. Análise de emissão de poluentes pelo PGA-500.....	49
3.1.6. Dinamômetro de rolos Dynotec 720i.....	50

<b>3.2.</b>	<b>Experimentos com e sem o gerador de hidrogênio.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Ensaio de emissão de poluentes.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>Resultados de torque e potência.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.3.</b>	<b>Testes de consumo total de combustível.....</b>	<b>54</b>
<b>4.</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>56</b>
<b>4.1.</b>	<b>Experimento de emissão de poluentes.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.</b>	<b>Experimento de torque e potência.....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.</b>	<b>Experimento de consumo de combustível.....</b>	<b>58</b>
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO GERAL.....</b>	<b>59</b>
	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

## INTRODUÇÃO

A história da humanidade mostra vários períodos de utilização de diferentes fontes primárias de energia. Assim, pode-se citar a madeira como a primeira utilizada pelo homem. [6] Segue-se ao uso da madeira o uso do carvão, quando o homem encontrava-se na Revolução industrial e um combustível em escala industrial se fazia necessário. Atualmente vive-se a economia do petróleo e paralelamente, mas em menor escala, a energia nuclear também vem sendo utilizada. Os impactos destas duas fontes de energia são bastante discutidos. A primeira gera uma série de poluentes que tem afetado significativamente a temperatura global, além de ser uma energia que colabora para os conflitos internacionais, pois a depender da localização de suas fontes define países ricos e pobres e ainda países explorados.

A segunda fonte de energia citada no parágrafo anterior gera resíduos perigosos tanto para o homem quanto para o meio ambiente. Ainda não se conseguiu encontrar uma forma de destruir estes resíduos, por hora eles são armazenados em locais próprios, mas futuramente a quantidade de resíduos aumentará e encontrar um local para continuar guardando eles tornar-se-á um problema.

Considerando o atual cenário, com as reservas de combustíveis fósseis chegando aos seus limites, é cada vez mais necessário identificar formas de energias alternativas, preferencialmente energia renováveis e limpas. A humanidade vive o auge do consumo de combustíveis fósseis e projeções mostram que as reservas deste tipo de energia se esgotarão, e por hora, não há um uso significativo de energias renováveis para que se possa considerar a humanidade independente dos combustíveis fósseis. Há também que se considerar o potencial poluidor de combustíveis derivados do petróleo, vive-se hoje um momento em que muito se fala em sustentabilidade e a descoberta de fonte limpas de energia que possam suprir a alta demanda mundial é o desafio atual.

O crescimento exponencial da população mundial somado com a acelerada devastação ambiental, tem provocado constantes discussões acerca de soluções para os impactos ambientais, especial atenção é dada aos poluentes emitidos por veículos automotores e indústrias. Acerca do tema energias renováveis, essas discussões são estimuladas pela emergência de encontrar soluções efetivas que culminem na descoberta de combustíveis mais eficientes e menos poluentes, sem contudo deixar de lado o fator custo, pois além de atender os dois primeiros requisitos, é fundamental que os novos combustíveis sejam economicamente atrativos e viáveis.

Considerando-se que as fontes fósseis são finitas e, portanto, os preços aumentam gradativa e seguramente, seu consumo é ineficiente sob o ponto de vista energético, a localização de suas reservas geram conflitos políticos e, por fim, mas não menos importante, que a queima destes combustíveis gera emissões nocivas ao meio ambiente (exceto a nuclear), pode-se sonhar com uma Economia do Hidrogênio. Projeta-se para a década de 2080 que 90 da energia provirá do hidrogênio. [6]

Ainda há entraves para a utilização definitiva do hidrogênio como combustível, o principal é obviamente o elevado custo de sua produção, impedindo-o de ser competitivo com outras fontes de energia. Outro fator é a segurança em seu manuseio, armazenamento e transporte. Contudo, o aquecimento global tornou-se insustentável e a pressão internacional sobre os países desenvolvidos para a redução da emissão de poluentes tem crescido exponencialmente. O hidrogênio apresenta-se como solução para este problema e os entraves à sua produção e utilização vem sendo estudados e novas tecnologias são criadas nesse sentido.

Dentro do contexto apresentado, será discutida nesta monografia a utilização do gás hidrogênio, produzido por meio de eletrólise, como combustível. Procura-se demonstrar o alto potencial energético deste gás, que pode ser considerado como energia renovável. Propõe-se a sua utilização como combustível auxiliar em veículos automotores.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. Objetivo principal**

Esta monografia tem como objetivo principal realizar uma exploração de comparação, sobre o aproveitamento do gás hidrogênio como fonte de energia auxiliar na combustão com a gasolina em veículos automotores. A atual pesquisa consiste em expor o processo de geração de hidrogênio por eletrólise, a adaptação do sistema em um veículo automotor, as características deste sistema, realizar alguns testes, e baseado nestes, apresentar uma comparação dos benefícios desta aplicação com e sem o equipamento.

### **1.2. Objetivos específicos**

Tem-se como objetivos específicos:

- A exploração de um gerador de hidrogênio por eletrólise utilizado como base para testes comprobatórios de potência, emissão de gases poluentes e rendimento.
- Realizar testes para comparação dos sistemas.
- Apresentar os cálculos e os resultados logrados para propiciar discussões sobre a tecnologia em questão.
- Apresentar diagramas que representem de maneira gráfica os valores coletados e os resultados obtidos dos cálculos realizados.
- Difundir e despertar a curiosidade dos leitores sobre esse tema.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Hidrogênio**

Para ajudar o entendimento das formas do emprego do gás hidrogênio  $H_2$  em MCI, abordaremos as propriedades pertinentes deste combustível e como este foi exposto e utilizado ao longo dos tempos.

#### **2.1.1. Histórico**

O hidrogênio é o elemento em maior quantidade no universo. Ele compõe 75% de sua massa, utilizá-lo como combustível aumentaria consideravelmente o alcance tecnológico da humanidade.

A primeira utilização mesmo que acidentalmente deu-se com o alquimista suíço Paracelso (1493–1591), o qual chegou ao hidrogênio após a mistura de ácidos com metais, onde acabou tendo como resultado um “ar explosivo” [4]. Nota-se que até então, não se tinha conhecimento de que esse gás fosse o  $H_2$ .

Posterior a Paracelso, o físico renomado R. Boyle (1627–1691), recorrentemente lembrado por sua lei para um gás ideal, logrou o mesmo ensaio que por acidente Paracelso havia realizado, e resolveu expor suas descobertas em uma dissertação acadêmica, a qual nomeou de “Solução inflamável de Marte”.

Somente em 1766, H.Cavendish (1731–1810), reconheceu o gás obtido deste experimento como uma substância química única e pura. Esse reconhecimento se deu do resultado do experimento já feito pelos dois cientistas mencionados acima, do qual originou-se um gás extremamente inflamável e que quando entrava em combustão na presença de ar, produzia água.

Em 1785 A. Lavoisier (1743–1794), nomeou o gás inflamável de hidrogênio e que o mesmo é um elemento químico. E ainda provou que a água é composta desse elemento e de oxigênio. Também observou que quando o  $H_2$  era queimado na presença de oxigênio, havia a formação de orvalho.

O primeiro cientista conhecido a cogitar a ampla utilização do hidrogênio foi J. Haldane (1892–1964). Haldane, em 1923 defendia amplamente em palestras a tese onde afirmava que a energia do hidrogênio seria extremamente útil e consumida como combustível do futuro. Ele sintetizou um tratado científico relacionando os pontos positivos a favor do hidrogênio, e descrevendo como ele seria produzido, armazenado e aplicado no futuro.

#### **2.1.2. Características do hidrogênio**

O hidrogênio é o elemento químico de maior presença, mais simples e mais comum de todo o universo. No planeta Terra, compõe aproximadamente 70 % da superfície terrestre.

In natura e sob condição ambiente, o é um gás inodoro, insípido e incolor, e se apresenta expressivamente mais leve que o ar. Pode-se encontra-lo no estado líquido, ocupando um volume 700 vezes menor do que se estivesse em forma de gás. No entanto, no caso abordado acima o elemento tem que estar a uma temperatura de  $-253^{\circ}\text{C}$  e à pressão atmosférica, em sistema de armazenamento conhecidos com sistemas criogênicos. Acima dessa temperatura, se transforma em gás o qual pode ser armazenado em cilindros de alta pressão.

O hidrogênio é quimicamente ativo, está sempre à procura de outro elemento para sofrer ligações e combinações químicas. Dependendo da combinação, as concentrações de gás  $\text{H}_2$  com oxigênio são inflamáveis e até mesmo explosivas. Quando em combustão com oxigênio puro, os únicos subprodutos da reação são calor e água. Quando queimados com ar, constituído por de nitrogênio e de oxigênio, alguns óxidos de nitrogênio (NOX) são formados, entretanto, ainda assim é menos poluente que os combustíveis fósseis.

Tratando-se de tabela periódica, é o elemento que ocupa a primeira casa e tem representação pela letra H. Inicialmente não passa de um elemento extremamente simples, levando-se em conta um número atômico de 1 e uma massa atômica também próxima de 1, dado que o seu isótopo mais abundante tem um núcleo unicamente constituído por um próton.

O  $\text{H}_2$  contém aproximadamente 2,4 vezes mais energia que o gás natural por unidade de massa, e próximo de 1100 vezes mais que uma bateria veicular. Sabendo-se que 1 kWh equivale a 3600 joules, na tabela 1 tem-se a representação do potencial em relação a outras substâncias.

O núcleo do isótopo mais abundante é formado por um único próton e nenhum nêutron. Entretanto, existem outros dois isótopos: o deutério, que tem um nêutron e o trítio que tem dois. Em 2001 foi criado em laboratório o isótopo  $^4\text{H}$  e, a partir de 2003, foram sintetizados os isótopos  $^5\text{H}$  até  $^7\text{H}$ .

A tabela 1 mostra a comparação da potencialidade de liberação de energia de alguns combustíveis, juntamente com suas formas mais comuns de armazenamento.

Tabela 1 - Comparação do potencial energético entre alguns combustíveis.

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: [Hidrogênio como combustível, ALMEIDA. A. T.]

Levando em conta o fator segurança, haja vista que é um gás como uma alta taxa de combustão, relacionamos em itens as principais características do H<sub>2</sub>.

- Não entra em autoignição;
- Não apresenta resíduos tóxicos em sua combustão (mas pode causar asfixia, em caso da extinção do O<sub>2</sub> em um ambiente confinado);
- Não é radioativo;
- Não corrosivo;
- Não apresenta nenhum fator contaminante a água;
- Não apresenta fatores cancerígenos;
- Tem alto coeficiente de difusão causando como efeito direto e por isso dilui rapidamente no ar;
- Ao sofrer ignição ao ar livre, queima antes de lograr o valor máximo para ocorrer à combustão;

Na tabela 2 são aprofundadas informações técnicas do H<sub>2</sub>.

Tabela 2 - Informações técnicas do hidrogênio.

INFORMAÇÕES SOBRE O HIDROGÊNIO		
Símbolo químico	H	
Cor	Incolor	
Estado físico a temperatura e pressão ambiente	Gás	
Temperatura de autoignição	584°C	
Poder Calorífico Inferior (H <sub>2</sub> líquido)	3 kWh/Nm <sup>2</sup>	10,8 MJ/Nm <sup>2</sup>
	2,359 kWh/l	8,495 MJ/l
	33 kWh/kg	1220 MJ/kg
Poder Calorífico Superior (H <sub>2</sub> líquido)	3,54 kWh/Nm <sup>3</sup>	12,75 MJ/Nm <sup>3</sup>
	2,790 kWh/l	10,04 MJ/l
	39,41 kWh/kg	141,86 MJ/kg
Poder Calorífico Superior (HHV do H <sub>2</sub> )	142000 J/g	

Densidade (0°C e 1 atm)	0,0899 kg/m <sup>3</sup>	70,79 kg/m <sup>3</sup> (H <sub>2</sub> líquido)
Ponto de ebulição	-252,8°C (na pressão de 1 atm)	
Limite de inflamabilidade no ar	Inflamável entre as concentrações de 4% a 75% de H <sub>2</sub> por volume	
Coeficiente de difusão	0,61 cm <sup>2</sup> /s	
A energia contida em 1 m <sup>2</sup> de H <sub>2</sub> equivale a 0,34 litros de gasolina		
A energia contida em 1 litro de hidrogênio líquido equivale a 0,26 litros de gasolina		
A energia contida em 1 kg de H <sub>2</sub> equivale a 2,75 kg de gasolina (baseado em valor calorífico)		
Massa atômica do H <sub>2</sub> = 1,00784 uma = 1,00784 mol		

Fonte: [Hidrogênio evoluir sem poluir, NETO, EMILIO H. G.]

### 2.1.3. A Combustão do hidrogênio

Quando ocorre o encapsulamento em alta pressão do H<sub>2</sub> em estado líquido, o elemento em contato com o ar puro atmosférico apresenta uma capacidade de queima abrupta, altamente severa, ocorrendo extravasamento de hidrogênio; em caso de ambientes abertos ocorre a própria homogeneização deste elemento no ar, entretanto, se o extravasamento ocorre em locais confinados, como em dutos, tubulações ou ambientes residenciais que atuam como meios confinados a homogeneização do H<sub>2</sub> é muito deficiente, e no caso de entrar em combustão, podem ocorrer significativos sinistros, haja a vista, a alta velocidade de propagação de detonação, algo próximo de 40 cm/s.

Entretanto em condição controlada e de extrema temperatura negativa, existe H<sub>2</sub> no estado criogênico (temperatura abaixo de -70°C) e em caso de sinistros, provoca queimaduras criogênicas, além da hipotermia induzida aos seres vivos, tratando-se da espécie humana comprovou-se dano ao sistema respiratório caso o vapor seja inalado. Além disso, extravasamento de H<sub>2</sub> no estado líquido podem ser causa direta que uma estrutura metálica entre em colapso instantaneamente, pois o aço da estrutura afetada passa rapidamente do estado dúctil para frágil, causando trincas ou fratura repentina do aço. No caso de vazamento no interior de veículos automotores, no ambiente específico onde o tanque está localizado, toda a microestrutura das regiões que compõem o mesmo ficam sujeitas a esses fatores criogênicos.

Em ambientes confinados como já citamos o vazamento de H<sub>2</sub> se torna mais perigoso, devido a taxa de expansão deste gás em seu estado líquido (-253°C) para temperatura ambiente de (25°C) é de aproximadamente de 1:840, nesta situação o H<sub>2</sub> se expande abruptamente e se torna uma fonte de combustível para fornecer energia a combustão, caso ocorra sua ignição.

Verifica-se durante a combustão do hidrogênio, um evento especificamente chamado de flashfire. Este fenômeno indica a combustão com baixa ou sem pressão positiva, e como o próprio nome sugere, este processo ocorre em um intervalo de tempo extremamente pequeno, até que todo o hidrogênio seja consumido. Durante a liberação do H<sub>2</sub> no ar a sua concentração

é mais alta no ponto onde aconteceu o vazamento, e neste local a mistura ar mais  $H_2$  é mais condensada, Se o  $H_2$  entrar em ignição neste instante, a consequência é o flash de queima.

Neste instante o  $H_2$  queima com vapor d'água. No momento em que o flash de queima surge como sendo um rápido evento, a velocidade da queima acontece em regime laminar. A velocidade da queima está entre 101 a 347 cm/s, dependendo da concentração do  $H_2$  no ambiente em questão.

#### **2.1.4. A Deflagração**

Deflagração é um processo de combustão subsônica que normalmente se propaga através de condutividade térmica (a camada de matéria que está em combustão aquece a camada de matéria vizinha, mais fria, que então sofre ignição). Para deflagração de gás, o material combustível e o agente oxidante ( $O_2$  do ar) são pré-misturados. [2]

Este composto garante adequada proporção ar mais  $O_2$  para a combustão. A extensão inflamável que gira por volta de 3% e 78% de concentração de  $H_2$  no ar pode resistir um fenômeno de deflagração. A propriedade mais acentuada da deflagração do  $H_2$  é que este tem em suas características uma elevada velocidade de propagação de chama. A velocidade da chama é uma aferição da razão a que a chama irá se propagar a um observador estático e não é significa compararmos com de velocidade de queima, a velocidade de queima basicamente é a taxa em que uma onda de combustão plana irá propagar-se em mistura inflamável, a velocidade de queima muda com a mudança de concentração de  $H_2$ . [2]

A velocidade média de deflagração chega próximo aos 255 cm/s em condições químicas favoráveis (estequiométricas) do Ar atmosférico, e a máxima velocidade de queima simples acontece quando a solução chega próximo aos 40% de  $H_2$ , haja vista, vale ressaltar que a velocidade da chama é inferior a velocidade de queima devido a solução inflamável de gases somente aparece à frente da chama e é deslocada pela expansão de gases quentes, assim os seus produtos vem diretamente de sua onda frontal de queima.[2]

A velocidade da queima e a velocidade de combustão podem elevar-se com a temperatura da substância gasosa, com o aumento da pressão, e geralmente com o aumento da concentração. A velocidade da queima eleva-se abruptamente para gases combustíveis ricos de uma concentração estequiométrica. [2]

Deflagrações podem acidentalmente, transladar para um fenômeno de detonação não controlada onde a onda é elevada por fatores tais como: concentração de hidrogênio de 17% a 60%, o grau de confinamento do gás, a presença de obstáculos ou condições que promovam turbulência no gás em processo de queima e a potência da fonte ignitora. Outros fatores incluem

condições climáticas como umidade, ventos e inversões atmosféricas que poderão parcialmente refletir em uma onda de combustão voltando em direção ao chão. Estudiosos confirmam que é muito provável que possa acontecer uma transição de deflagração para detonação em ambiente ao ar livre, desde que haja um ignitor fraco. [3]

#### **2.1.5. O Fogo**

O fogo é um fenômeno de não explosão que se situa entre  $O_2$  e combustível. Neste fenômeno a labareda pode ser estacionária, com o combustível e o ar se difundindo laminarmente dentro da zona de combustão, esse processo é chamado de difusão, por que o  $O_2$  e o material combustível misturam-se por processo de difusão molecular lentamente e compassada na combustão. A labareda do fogo a de produzir a mesma quantidade de energia de um evento de deflagração, porém tem uma baixa entalpia, misturas de ar e  $H_2$  queimam sem produzir fumaça, cuja chama é de difícil detecção.

A concentração estequiométrica é a proporção perfeita de  $O_2$  (sendo este ar) e gás combustível para a combustão mais completa. Para  $H_2$  no ar a concentração estequiométrica é 27,5%. Para mistura fraca de  $H_2$  (abaixo de 7% do volume de concentração) acesa em uma câmara teste de combustão, as razões de compressão são muito menores que 4:1, na extensão de 15:1 até 2:1.

#### **2.1.6. A Evolução da queima**

Esta é a velocidade em que a chama transporta-se entre uma mistura gasosa combustível. A velocidade de queima difere-se da referida anteriormente. Quanto maior for a velocidade de queima maior será a evidência que a severidade de uma explosão, desde que a mesma tenha uma grande tendência a resistir a transição de deflagração/detonação, espaços confinados. Acima a velocidade da chama é o somatório da velocidade de queima e a velocidade de deslocamento da mistura não queimada. A Velocidade de queima variam com a concentração de  $H_2$ s e elevam-se em ambas as direções da extensão de flamabilidade. Abaixo do limite mínimo de flamabilidade e acima do limite máximo de flamabilidade a velocidade de queima é zero. A velocidade de queima do hidrogênio é 2,64 a 3,26m/s e é consideravelmente de ordem de magnitude alta ao compararmos com o metano ou gasolina em mesmas condições químicas (a condições estequiométricas). Sendo assim o  $H_2$  queima rapidamente, sua vida é muito curta. [5]

#### **2.1.7. Detonação**

A detonação também é considerado um fenômeno puro de combustão, a onda de queima consegue adentrar a taxas de velocidades supersônicas em ambientes controlados. [5]

A detonação é basicamente um fenômeno que ocorre em milésimos de segundos, com uma grande quantidade de energia calorífica. Uma detonação de um gás Combustível qualquer entra numa solução pré-misturada, como na deflagração. As tolerâncias mínimas e máximas para detonação são 15,3% e 55% de concentração de H<sub>2</sub> no ar.

Uma detonação depende de um ignitor de alta capacidade de liberar energia calorífica, 11kJ ou mais. A máxima sobrepressão teórica advinda da detonação de uma solução de H<sub>2</sub> é 14,5 ATM, se essa nuvem de gás for diretamente acendida. [5]

Uma crucial característica do choque de detonação é a formação de moléculas de detonação. Uma molécula é considerada um volume físico contido pelas ondas de choque atuando dentro da atmosfera que não reage. As ondas refletivas estão contidas em seu caminho, como na terra, montanhas e construções. A tabela 3 nos mostra as propriedades principais de deflagração e detonação do H<sub>2</sub>, em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). [5]

Tabela 3 - Propriedades de combustão do gás hidrogênio no ar a 1 atm e 25 °C.

Propriedade de combustão	Deflagração do hidrogênio	Detonação do hidrogênio	Unidades
Calor da reação alto	142,5	142,5	MJ/kg
Limite inflamável inferior no ar	4,1 ou 3,6 g/m <sup>3</sup> de ar	18,3 ou 16,1 g/m <sup>3</sup> de ar	Volume %
Limite inflamável superior no ar	74 ou 67 g/m <sup>3</sup> de ar	59 ou 51,8 g/m <sup>3</sup> de ar	Volume %
Mistura de detonação ótima no ar (relação estequiométrica)	-	29,53	Volume %
Sobrepressão máxima de detonação no ar	-	1,46	Mpa
Temperatura de auto ignição	574	574	°C
Energia mínima de ignição	0,02 a 29,53%	≥10 <sup>7</sup>	mJ
Temperatura máxima da chama ao ar	2318	2318	K
Energia de explosão	-	2,02	Kg TNT por m <sup>3</sup> de gás na CNTP
Velocidade laminar de queima ao ar, varia com a percentagem de H <sub>2</sub> no ar	102 a 325	-	cm/s
Velocidade de detonação ao ar	-	1,48 a 2,15	km/s
Máxima relação de sobrepressão	8:1	14,5:1	

Fonte: [Constant volume adiabatic combustion of stoichiometric hydrogen oxygen mixtures]

### 2.1.8. Flashpoint

Todos os combustíveis existentes possuem uma propriedade extremamente peculiar, eles precisam estar no seu estado gasoso ou vapor para poder entrar em combustão, o H<sub>2</sub> ou gases semelhantes já estão em seu estado de vapor na CNTP, enquanto outros como o diesel e

a gasolina precisam converter-se em vapor. O fenômeno que descreve como estes entram no estado de vapor é o flashpoint. Este fenômeno trata-se da temperatura em que os combustíveis produzem vapores para que junto com o ar forme uma mistura explosiva e entre em combustão. [5]

Se a de qualquer combustível estiver abaixo do flashpoint, o mesmo não produzirá vapor para queimar. É de cunho demonstrativo que quando seu combustível está em ou acima de seu *flashpoint*, Vapores se faram constantes. [5]

Importantes observar-se que o flashpoint não é o ponto em que o combustível incendia-se em chamas este é a autoignição, o flashpoint é na maioria das vezes abaixo do ponto de ebulição. [5]

A tabela 4 nos mostrara alguns flashpoint. Combustíveis que são gases a CNTP como (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, propano), o flashpoint é sempre menor que a temperatura ambiente e possui quase nenhuma relevância, se o combustível estiver totalmente vaporizado. [5]

Tabela 4 - Valores do flashpoint para alguns combustíveis.

Combustível	Flashpoint
Hidrogênio	< -253°C
Metano	-188°C
Propano	-104°C
Gasolina	Aprox. -43°C
Metanol	11°C

Fonte: [Hydrigen Properties, College of the Desert]

### 2.1.9. Extensão de flamabilidade

A diferenciação entre flamabilidade de um gás se dá diretamente em termos de seu limite superior e seu limite inferior. O limite mínimo de flamabilidade que se necessita de um gás para que a concentração do mesmo seja suficiente para suprir e sustentar a propagação da chama quando misturado e aceso. Abaixo do conceito citado acima não há combustível para sustentar a combustão, a mistura combustível/ar se torna muito fraca. [5]

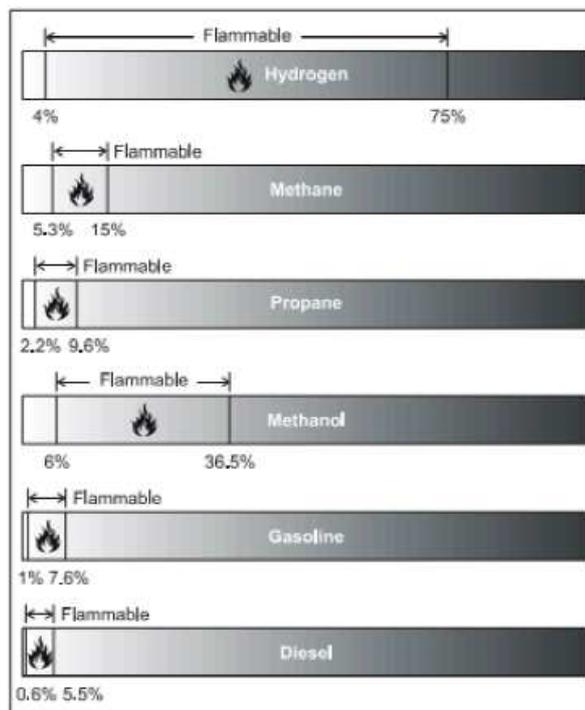
E a situação inversa para o gás se torna insustentável pois não se obtém O<sub>2</sub> suficiente para sustentar a combustão tornando uma mistura muito rica, dar-se o nome de limite superior de flamabilidade. E exatamente entre estes dois limites ocorre o grau estequiométrico perfeito para uma combustão quando acesos. [5]

Assim se tivermos mais H<sub>2</sub> disponível, teremos uma mistura rica o que nos resultará em um consumo extremo do O<sub>2</sub> fazendo que se torne não reagente. Já se menos H<sub>2</sub> for inserido na mistura teremos a mesma extremamente pobre e também não haverá reação. A maioria dos

motores de combustão interna trabalham com misturas quase pobres para que o combustível seja consumido por completo. [5]

Uma consequência direta do limite de inflamabilidade é que com o limite máximo de inflamabilidade é que o hidrogênio armazenado (gasoso ou líquido) não é inflamável enquanto armazenado sem a presença de oxigênio em cilindros. O combustível somente torna-se inflamável nas áreas periféricas de um vazamento onde há mistura com ar em proporções suficientes.

Figura 1 - Extensão de inflamabilidade para vários combustíveis a temperatura atmosférica.



Fonte: [Hydrogen Properties, pagina 20]

Existem ainda dois conceitos que estão ligados diretamente a este assunto abordado, estes são: (LEL) o limite inferior de explosão e o (UEL) limite superior de explosão. [5]

LEL é a mais baixa concentração de um gás que em uma mistura suportará uma explosão em condições confinadas. Inversamente a UEL é a maior concentração de gás que poderá suportar uma explosão, acesa e contida. Uma explosão difere do fogo devido à explosão ocorrer em ambientes fechados de tal forma que a temperatura e a pressão aumente de forma destrutiva. [5]

Por este motivo se torna muito mais perigoso se houver uma liberação de H<sub>2</sub> em ambiente confinado (como uma garagem). Importante salientar que o gás H<sub>2</sub> é inflamável em uma área de concentração no ar (5% – 74%) e é explosivo também em uma grande faixa de concentração (15 – 59%) a condições normais de pressão e temperatura.

E devemos ressaltar que o limite de flamabilidade é diretamente proporcional a temperatura. A figura 1 compara alguns limites de flamabilidade de combustíveis. [5]

### 2.1.10. Temperatura de autoignição

A temperatura de autoignição é a mínima temperatura requerida para que ocorra uma combustão sustentável em uma mistura combustível sem que haja uma fonte ignitora. Em outras palavras o combustível é aquecido até que este queime em chamas. Cada combustível possui uma temperatura de ignição única. Para o hidrogênio a temperatura de autoignição é relativamente alta (585<sup>0</sup>C). Isto torna difícil de acender uma mistura de ar/hidrogênio somente com calor, sem uma fonte de ignição adicional. A tabela 5 mostra uma comparação da temperatura de autoignição de alguns combustíveis. [5]

Tabela 5 - Tabela comparativa da ignição de alguns combustíveis.

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

Fonte: [Hydrogen Properties, College of the Desert]

### 2.1.11. Número de octanagem

O número de octanagem descreve as propriedades de um combustível de resistir à explosão por pressão quando usado em motores de combustão interna.

Auto detonação é uma detonação secundária que ocorre após depois da ignição do combustível decorrente ao calor se elevar em algum lugar pontual da câmara de combustão, de forma que está temperatura local ultrapasse a temperatura de autoignição do combustível. O papel primordial do octano de misturas combustíveis de hidrocarbonetos é usado para medir a resistência a impactos cujo valor relativo foi estabelecido em 100. O H<sub>2</sub> possui um valor elevado de número de octano e, além disso, é extremamente resistente a auto detonação isso se for queimado em condições de misturas fracas. [5]

A tabela 6 compara o número de octanagem de alguns combustíveis mais utilizados, Importante observar que em células combustíveis o número de octanos é irrelevante.

Tabela 6 - Comparativo do número de octanagem de alguns combustíveis.

Combustível	Número de octano
Hidrogênio	130 + (queima branda)
Metano	125

Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Metanol	30

Fonte: [Hydrogen Properties, College of the Desert]

### 2.1.12. Energia de ignição

A energia de ignição é o somatório de energia externa para que a mistura entre em ignição. Esta mesma energia deve ser maior que a temperatura de auto ignição e também durar uma quantidade de tempo suficiente para levar o vapor de combustível a uma detonação completa. Fontes comuns de ignição são chamadas de faíscas. Embora o H<sub>2</sub> possua uma alta temperatura de autoignição em relação ao metano, propano e gasolina, sua energia de ignição a 1, 9.108 BTU (0,02mJ) é de baixa magnitude e entra em ignição muito facilmente. Uma simples faíscamento que invisível ou um estímulo elétrico estático proveniente de uma descarga elétrica de um corpo em condições ambientes secas poderá ter energia suficiente para que a mistura combustível/ar entre em ignição. O H<sub>2</sub> tem a propriedade de baixa eletrocondutividade assim sabendo que a agitação de suas moléculas em estado gasoso ou líquido poderá gerar cargas eletrostáticas que resultam em faíscas, por este motivo todos os dispositivos que contém geram ou distribuem H<sub>2</sub> devem estar devidamente aterrados . [5]

### 2.1.13. Extinção de chama

Descreve o fenomeno de extinção da chama de uma mistura combustivel/ar em utilização em motores de combustão interna. Especificamente a distância de extinção leva em conta a distância da camisa do cilindro do motor onde as chamas extinguem-se devido às perdas de calor. A distância de extinção da chama não possui relevância em células de combustíveis. Esta distância para o H<sub>2</sub> é de (0,063 cm) e é aproximadamente 2,5 vezes menor que para outros combustíveis como (gasolina e diesel).

A tabela 7 expõem as propriedades importantes ao uso do H<sub>2</sub> em motores de combustão interna.

Tabela 7 - Propriedade relevantes ao uso do hidrogênio em MCIs. [13]

Propriedade	Gasolina	GNV	Hidrogênio	Efeito
Limite de flamabilidade	0,7 a 4	0,4 a 1,6	0,1 a 7,1	Grande extensão de flamabilidade ***
Velocidade laminar de chama (m/s)	0,37 a 0,43	0,38	1,85	Alta velocidade de chama (boa estabilidade) ***

Número de octano pesquisado	87 a 99	140	>120	Altas taxas de compressão
Temp. de chama adiabática (K)	2580	2214	2480	
Mínima de auto ignição *	0,24	0,28	0,02	
Temperatura de auto ignição (K) *	550	723	858	Propenso a pré ignição **
Distância de extinção de chama (mm)	2	2,1	0,64	
Valor calorífico inferior (MJ/kg) *	44,79	45,8	119,7	
Calor de combustão (MJ/kg) *	2,83	2,9	3,37	

Fonte: [Advanced Hydrogen-Fueled Engines: Potential and Challenges, WHITE, CHRISTOPHER]

\*Vapor de gasolina \*\*Desfavorável \*\*\*Favorável

Analisado todas as propriedades acima conclui-se que o H<sub>2</sub> queima com uma maior qualidade do que a os outros combustíveis derivados de hidrocarbonetos, entretanto com um tempo de duração mais curto.

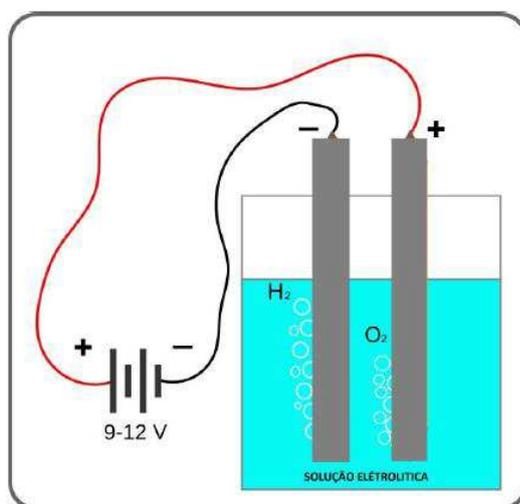
## 2.2. Eletrólise da água

Eletrólise é um processo de reação não espontânea onde decompõem-se uma substância, utilizando uma corrente elétrica externa. Este fenômeno é um processo eletroquímico, caracterizado pela ocorrência de reações de oxirredução em uma solução condutora quando se estabelece uma diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos mergulhados nessa solução.

[10]

Quando temos o processo de eletrolise o primeiro passo do fenômeno é a decomposição do composto, logo após com a passagem de corrente continua, obtemos os elementos químicos. É observado em muitos processos de eletrolise, que variando-se a substância a ser eletrolisada e o meio em que ela acontece, além de formar elementos puros químicos puros como citado acima, ocorre a formação de compostos. A denominação solução eletrolítica, empregada para designar qualquer solução aquosa condutora de eletricidade, deriva justamente desse processo [10].

Figura 2 - Gerador de hidrogênio por eletrólise.



Fonte: [Autor]

Um composto iônico, neste caso o KOH é dissolvido em água, de modo que seus íons estejam dispersos e disponíveis no líquido. Uma corrente elétrica é aplicada entre um par de eletrodos inertes imersos no líquido. O eletrodo de carga negativa é chamado de cátodo, enquanto o de carga positiva é o ânodo. Cada eletrodo atrai íons de carga oposta, portanto, os íons carregados positivamente (chamados cátions) movem-se no sentido do cátodo, enquanto os íons carregados negativamente (chamado ânions) se movem em direção ao ânodo. [10]

A energia necessária para separar os íons e levá-los a unirem-se nos respectivos eletrodos, é fornecida por uma fonte externa de energia elétrica. Na interface eletrodo/eletrólito os elétrons são absorvidos ou liberados pelos íons, formando novas moléculas e/ou compostos químicos, de acordo com as substâncias disponíveis no meio. No caso demonstrado na Figura 2, tem-se dois eletrodos inertes imersos em uma mistura de água e sal ( $H_2O_{(liq)} + KOH_{(aq)}$ ). [10]

Na solução teremos:

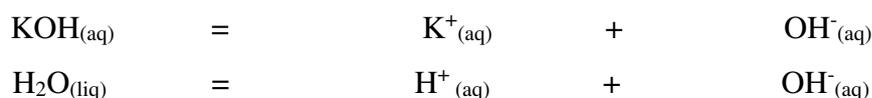


Tabela 8 - Reações do hidrogênio.

	Cátodo	Ânodo
Migração de íons	$K^+$ e $H^+$	$OH^-$ da água e $OH^-$ da base
Facilidade de descarga	$H^+ > K^+$	$OH^-$

Semi-reação	$4\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 4\text{e}^- = 2\text{H}_{2(g)} + \text{K}^+$	$4\text{OH}^-_{(aq)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} + \text{O}_{2(g)} + 4\text{e}^-$
Permanece na solução	$\text{K}^+$	$\text{OH}^-$

Fonte: [Curso Completo de Química, SARDELLA, Antonio]

SARDELLA [10] explica que os cátions formados  $\text{H}^+$  e  $\text{K}^+$  deverão ser atraídos pelo cátodo, e os ânions  $\text{OH}^-$  da água e da base serão atraídos pelo ânodo. Assim, formam-se nos eletrodos o gás  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ , que poderão ser vistos borbulhando no entorno dos respectivos eletrodos, enquanto os elementos restantes  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$  se unirão e formarão moléculas de Hidróxido de Potássio.

### 2.2.1. Solução eletrolítica

Em química, um eletrólito é qualquer substância que contenha íons livres que fazem a substância eletricamente condutiva. O eletrólito mais típico é uma solução iônica, mas eletrólitos fundidos e eletrólitos sólidos também são possíveis. [9]

Eletrólitos comumente existem como soluções de ácidos, bases ou sais. Além disso, alguns gases podem agir como eletrólitos em condições de alta temperatura ou baixa pressão. Soluções de eletrólitos pode também resultar da dissolução de alguns polímeros biológicos (DNA, por exemplo, polipeptídios) e sintéticos (por exemplo, sulfonato de poliestireno), denominada polieletrólitos, que contêm cobrado grupo funcional. [9]

Soluções de eletrólitos são normalmente formados quando um sal é colocado em um solvente como a água e os componentes individuais dissociar devido às interações termodinâmicas entre as moléculas de solvente e soluto, em um processo chamado solvatação. [9]

Um eletrólito em uma solução pode ser descrita como concentrada se ele tem uma alta concentração de íons, ou diluir se tiver uma baixa concentração. Se uma alta proporção do soluto se dissocia para formar íons livres, o eletrólito é forte, se a maioria dos solutos não dissociar, o eletrólito é fraco. As propriedades de eletrólitos podem ser exploradas através da eletrólise para extrair elementos constitutivos e os compostos contidos na solução. [9]

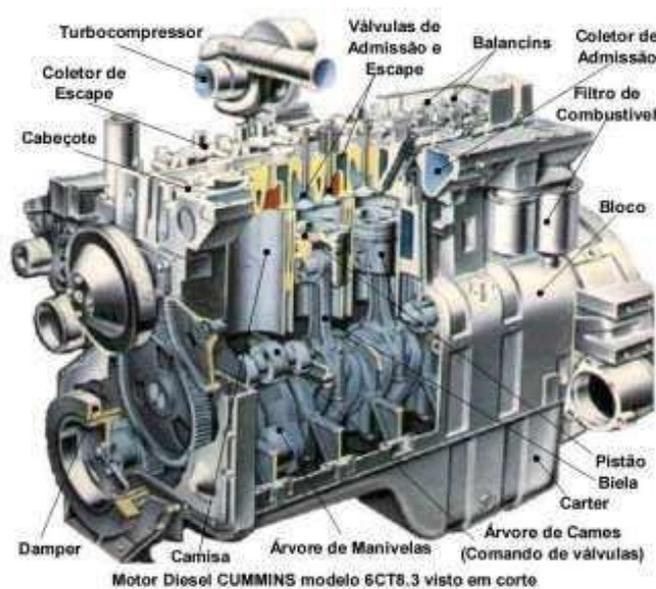
### 2.3. Motores de combustão interna

Os veículos automotores sofreram várias mudanças com o tempo, como os tipos de motores, combustíveis a serem utilizados, padrão do ciclo, rendimento do motor. Mas a característica que teve um predomínio impressionante no motor foi o ciclo de combustão de quatro tempos que converte toda a energia acumulada no combustível em movimento. Este motor recebe o nome de ciclo otto graças ao engenheiro e cientista Nikolaus Otto que o concebeu em 1867. [7]

A duas décadas atrás os motores quase que em sua maioria sofrera com a falta de tecnologia nos matérias a disposição para fabrica-los, eram feitos geralmente de aço e ferro fundido. Apesar dos problemas frequentes como trincas, excesso de corrosão e outros a tecnologia em materiais conseguiu atualmente evoluir bastante, atuando diretamente em pontos que tangem a excelência mecânica como a economia e durabilidade, esses motores hoje são fabricados em uma liga de aço com alumínio por ser uma material mais leve e de difícil oxidação. [7]

Para que um motor realize trabalho de forma intermitente ou interruptamente, a substância de trabalho passa por uma série fechada de processos termodinâmicos, que são chamados de tempos, voltando sistematicamente a cada estado que compõem o mesmo ciclo. (É pertinente salientar que o ciclo teórico é deverás diferente do ciclo real). Na figura 3, apresenta-se o corte lateral de um motor e seus componentes internos.

Figura 3 - Corte lateral de um motor de 4 tempos.



Fonte: [Autor]

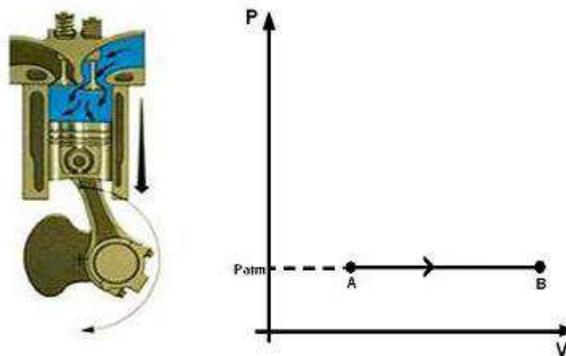
### 2.3.1. Ciclo Otto

Em 1862, Beau de Rochas enunciou o ciclo de “quatro tempos” que, primeiramente, o alemão Otto aplicara a um motor térmico, de onde surgiu em algumas obras a designação de “Ciclo Otto”. Os processos que ocorrem nos motores a álcool, a gasolina ou flex de quatro tempos são representados logo a seguir por meio de diagramas que representam o ciclo do motor a combustão interna: ciclo Otto. As figuras 4, 5, 6 e 7 demonstram o funcionamento de um ciclo em etapas por meio de diagramas de pressão por volume. A figura 8 apresenta o ciclo ideal completo e a figura 9 apresenta um ciclo real completo. [7]

### I. Admissão da mistura: 1º tempo

Abertura da válvula de admissão: nesta situação a velocidade de avanço da mistura dos fluidos é praticamente igual à velocidade do pistão. Em consequência desse fato, a pressão fica praticamente constante e o volume aumenta: processo isobárico (A → B), conforme mostra a figura 4. [7]

Figura 4 - Admissão da mistura, 1º tempo.

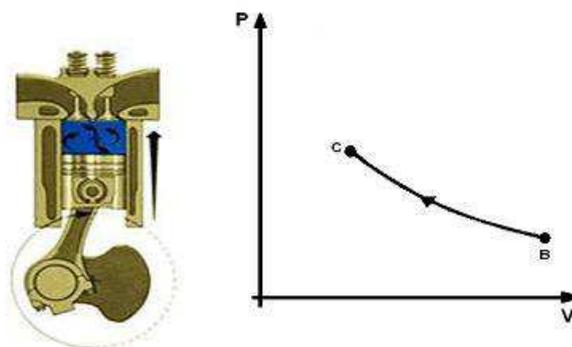


Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

### II. Compressão da mistura: 2º tempo

Nesta situação o trabalho do pistão é convertido totalmente em energia interna da mescla dos fluidos que possuem a pressão e temperaturas elevadas. Essa condição produz uma compressão adiabática, pois o processo é muito rápido e praticamente não há trocas de calor. O volume diminui à medida que a pressão e a temperatura aumentam (B → C), conforme esboça a figura 5. [7]

Figura 5 - Compressão da mistura, 2º tempo.



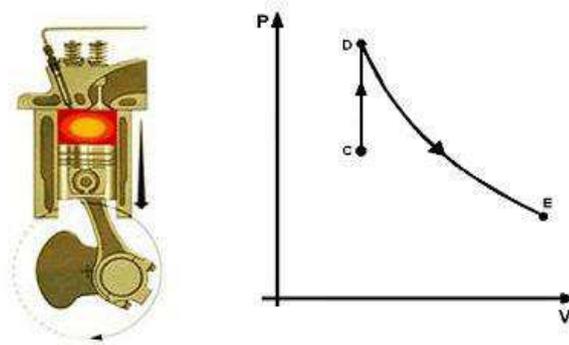
Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

### III. Explosão da mistura: 3º tempo

Neste trecho ocorre a explosão e não há variação de volume, já que a reação química é muito rápida (não há consequentemente o movimento do pistão). Também ocorre um grande aumento da temperatura e pressão (C → E) (figura 5); Na segunda parte da explosão (D → E),

o pistão desce com extrema rapidez, não havendo assim trocas de calor. Por esse motivo a expansão é considerada adiabática conforme mostra a figura 6. [7]

Figura 6 - Explosão da mistura, 3º tempo.



Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

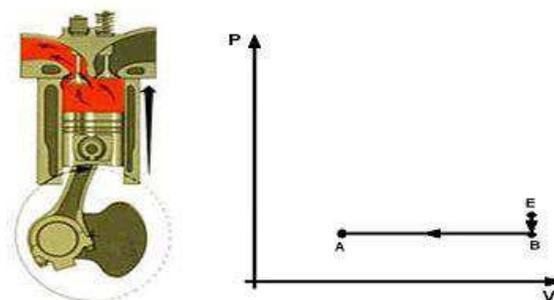
#### IV. Escape dos gases: 4º tempo

Com a abertura da válvula no motor ( $E \rightarrow B$ ) ocorre a variação da pressão e da massa da mistura, não havendo assim tempo para a mudança de curso do pistão e, portanto, a não variação do volume. Essa descompressão é considerada isométrica (conforme mostra a figura 6).

A exaustão dos gases ocorre no trecho ( $B \rightarrow A$ ). Neste processo a massa do gás presente no cilindro diminui na mesma proporção que o volume e é considerado isobárico, conforme demonstra a figura 7.

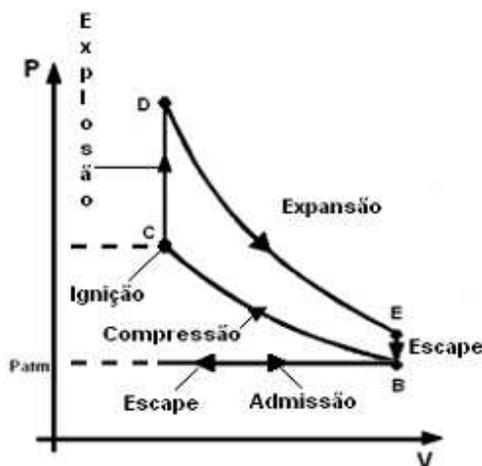
Os processos descritos logo acima são representados de forma conjunta no diagrama  $P \times V$  (figura 8) para o ciclo completo do motor a combustão interna, que é denominado ciclo Otto. [7]

Figura 7 - Exaustão dos gases, 4º tempo.



Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

Figura 8 - Gráfico que representa o Ciclo Otto ideal completo.



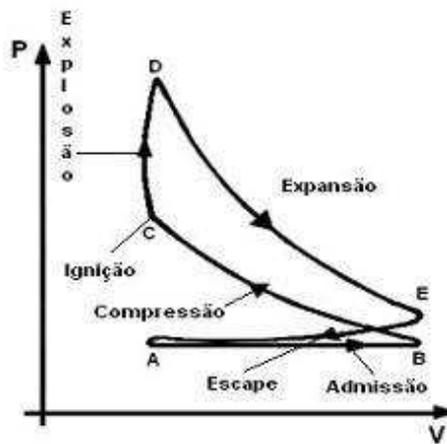
Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

Os processos descritos acima são situações bem próximas do real. Dessa forma, o diagrama das variações da pressão e do volume em um motor real manifesta alguma diferença em relação ao analisado precedentemente. Na admissão a pressão não permanece constante (o processo não é perfeitamente isobárico), pois o volume da mistura ar/combustível não acompanha o movimento do pistão, havendo, portanto certa diminuição de pressão. Na explosão, o processo não é perfeitamente isovolumétrico (isométrico) porque não acontece instantaneamente e ocorre com certa velocidade do pistão. [7]

A exaustão isométrica vista no ciclo Otto ideal não chega a ocorrer no ciclo real, porque o cilindro inverte bruscamente sua velocidade (transmitida pelo eixo) e já empurra a mistura queimada para fora. A exaustão real não é de fato isobárica porque o pistão tem velocidade inferior com relação à velocidade de escape do gás. [7]

O diagrama P x V da figura 9 apresenta o ciclo completo de um motor real.

Figura 9 - Gráfico que representa o Ciclo Otto real completo.



Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

### 2.3.2. Trabalho de um motor

O trabalho útil realmente acontece apenas no terceiro tempo. Nos restantes, onde acontecem os tempos de admissão, compressão e escape, o curso contínuo do pistão ocorre por consequência do trabalho externo proveniente da inércia do volante ou do conjunto do sistema em que estão acoplados vários pistões à árvore de manivelas. Entretanto, uma quantidade do calor de combustão é exaurida na forma de entalpia dos gases, levando em consideração, a troca contínua de calor entre o corpo do motor e o ambiente. A parte restante do calor de combustão está diretamente ligada à energia de curso do pistão – realização de trabalho – concluindo desta forma o balanço energético. [7]

A realização de trabalho ( $W$ ) e a elevação da quantidade de energia interna  $-\Delta U$  devido à quantidade de calor  $-Q$  estão de acordo com o princípio de conservação de energia denominada Primeira Lei da Termodinâmica, expressa matematicamente pela equação 1. [7]

$$Q = \Delta U + W \quad \text{Equação (1)}$$

Rendimento real de um motor, em que a energia liberada na combustão faz os pistões se movimentarem em um motor ciclo Otto, está próximo de 21% a 25%. A energia restante é perdida de forma mecânica (~ 9% por meio do atrito das superfícies metálicas do veículo, da inércia do pistão e em energia sonora) e térmica (~ 32% em troca de calor do motor com o ambiente por meio do sistema de refrigeração e 35% em energia interna dos gases provindos da combustão e exauridos pelo escapamento). No total, a perda gira em torno de 75% a 80%.

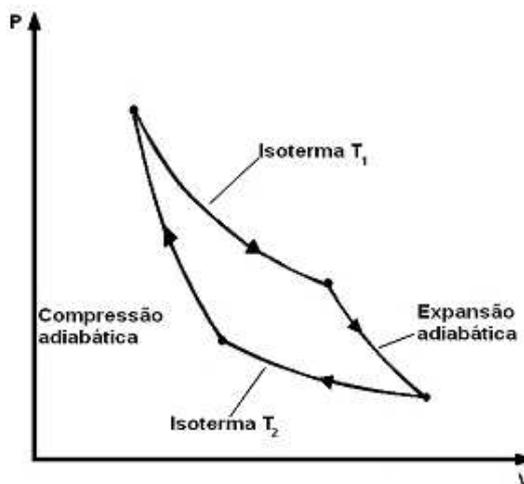
O rendimento real de um motor, em que a energia liberada na combustão faz os pistões se movimentarem em um motor ciclo Otto, está próximo de 21% a 25%. A energia restante é perdida de forma mecânica (por meio do atrito das superfícies metálicas do veículo, da inércia do pistão e em energia sonora) e térmica (em troca de calor do motor com o ambiente por meio

do sistema de refrigeração e em energia interna dos gases provindos da combustão e exauridos pelo escapamento). No total, a perda de energia gira em torno de 75% a 80%. [7]

$$N=W/Q \quad \text{Equação (2)}$$

Cujo  $N$  é o rendimento da máquina,  $W$  é o trabalho realizado pela mesma e  $Q$  é a quantidade de calor. Caso toda energia do carburante fosse convertida em trabalho mecânico, o rendimento seria 1 ou 100%. Situação que na realidade nunca ocorre de acordo com o engenheiro francês N. L. Sadi Carnot, pioneiro nos estudos de motores em 1824. Segundo este estudioso, o motor pode ter um rendimento máximo de aproximadamente 50% independente da substância de trabalho usada e desconsiderando as questões técnicas.

Figura 10 - Gráfico que representa o Ciclo de Carnot.



Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

Com isso foi formulado um ciclo ideal construído devido à necessidade de aperfeiçoar o rendimento das máquinas térmicas reais. Esse ciclo foi denominado ciclo de Carnot (mostrado na figura 10).

### 2.3.3. Relação estequiométrica – Ar x Combustível

Para que haja uma mistura ideal de carburante e comburente não basta apenas mesclar o ar e o combustível. Há uma necessidade de se conseguir uma boa vaporização desse carburante de forma que ele se misture muito bem com o ar.

Na combustão do carburante, se utilizam 12 partes de ar para 1 parte de combustível. Cabe lembrar que 1 quilo de ar ocupa um volume de 1 metro cúbico. Com isso chega-se à conclusão, com base na relação estequiométrica, que para queimar 1 quilo de combustível são necessários 12 quilos de ar (12:1). [7]

Na verdade existe uma proporção específica de comburente e combustível ideal, para cada tipo de motor. No caso do motor a gasolina a relação estequiométrica ideal está entre 9:1 e 10:1 (9 partes de ar para 1 quilo de combustível, no primeiro caso). Para o álcool etílico (etanol), a relação está entre 12:1 e 13:1 (12 partes de ar para 1 de combustível, para o primeiro caso). Essa proporção está intimamente ligada à quantidade de hidrogênio e carbono presente em uma determinada quantidade de combustível. Caso haja menos ar do que a proporção ideal, há sobra de combustível, que indica riqueza da mistura. Isso não é um bom sinal, pois além do gasto excessivo de combustível, há também um lançamento maior de poluição no meio ambiente e o motor pode funcionar de forma irregular (“afoga”), desliga (“apaga”) ou pode não dar a partida. Se ocorrer o contrário, a mistura obtiver mais ar do que a proporção ideal (excesso de oxigênio), essa mistura é considerada pobre. Esta possui mais desvantagens, pois além de gerar mais poluentes de óxido de nitrogênio (óxido e o dióxido de nitrogênio), pode provocar também um desempenho inferior ao normal, não dar a partida e até danificar o motor. [7]

#### **2.3.4. Fator Lambda**

Para medir a relação estequiométrica utiliza-se o fator lambda, que é o quociente da mistura ar/combustível real pela ideal. O valor ideal do fator  $\lambda$  é igual a 1.

$$\lambda = \text{mistura real} / \text{mistura ideal}$$

Note que esta é uma situação que varia de acordo com o combustível utilizado no motor. Logo abaixo são apresentados os valores ideais de cada combustível para cada parte de ar utilizado no motor ciclo Otto. [7]

Gasolina com 20% de álcool: 9:1;

Álcool 12:1

Em um motor a gasolina, por exemplo, que recebe uma mistura de 10:1 (pobre) é possível encontrar o valor do fator lambda. Basta dividir aquele valor por 9:1 (ideal para gasolina), conforme demonstrado logo abaixo: [7]

$$\text{Fator lambda } \lambda = 10/9 = 1,1$$

Na partida a frio e nas acelerações o motor necessita de uma mistura admitida mais rica, sendo, portanto, necessário um fator lambda abaixo de 1 ( $\lambda < 1$ ). Entretanto, em casos a parte a esses, o conjunto admite uma mistura que se aproxima do fator lambda igual 1 ( $\lambda = 1$ ), onde há uma economia significativa e uma combustão próxima da ideal (queima total do combustível e a melhor marcha lenta).

Em outra situação, como a demonstrada anteriormente, o motor pode consumir pouco combustível e gerar potência reduzida. Este é o caso em que se obtém mistura pobre, isto é, um lambda maior que 1 ( $\lambda > 1$ ). [7]

Tabela 9 - Esquematiza de maneira simples e reduzida o que foi apresentado.

Fator lambda $\lambda$	Tipo de mistura	Quantidade de ar
$> 1$	Pobre	Excesso
$= 1$	Ideal	Ideal
$< 1$	Rica	Falta

Fonte: [Estudos dos processos físicos envolvidos nos motores que utilizam como combustível álcool e gasolina (ciclo otto)].

Os motores que utilizam álcool ou gasolina atuam melhor com o fator lambda próximo a, pois este é o ponto em que se obtém o maior torque associado ao menor consumo e menor emissão de poluentes. A tabela 10 expressa esta situação de forma resumida.

Tabela 10 - Relação do desempenho do motor e o fator lambda. [7]

Desempenho do motor	$\lambda = 1$	Quantidade de ar
Plena carga	0,9	Excesso
Carga parcial	1	Ideal
Marcha lenta	0,9 a 1,05	Variável

Fonte: [Estudos dos processos físicos envolvidos nos motores que utilizam como combustível álcool e gasolina (ciclo otto)].

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, serão apresentados todos os experimentos realizados no intuito de entrarmos em discussão sobre todos os dados obtidos, sendo eles potência, emissão de gases poluentes e eficiência energética do sistema, sendo que todos os dados serão coletados antes e após a instalação do gerador de H<sub>2</sub>. Para chegarmos a estes dados utilizamos alguns experimentos descritos a seguir.

Cabe observar, que toda a análise dos testes será focada na teoria revisada no capítulo 2. Adotaremos esta metodologia, pois enfatizaremos dados teóricos e práticos resultando em valores possíveis de análise e discussão.

#### 3.1. Gerador de hidrogênio por eletrólise

##### 3.1.1. Como funciona um gerador de H<sub>2</sub> por eletrólise

Utilizaremos o nome comercial Gerador de H<sub>2</sub> Batik, para gerador de hidrogênio por eletrólise. Uma célula de H<sub>2</sub> conforme figura 11 de fabricação nacional, é um dispositivo de eletroquímico que através da eletrólise de uma solução no estado líquido da água (H<sub>2</sub>O), onde um sal dissolve-se como hidróxido de potássio (KOH), transforma os elementos presentes nessa solução, hidrogênio e oxigênio em gás. Para um melhor entendimento utilizaremos a expressão HHO, que nada mais é do que duas moléculas de H mais uma O de em meio gasoso.

Figura 11 - Hydrocell para HHO.



Fonte: [Manual de instalação *BATIK* do fabricante *BATIK*]

O gás HHO é levado através de tubulações e mangueiras para a entrada de ar do sistema onde entra em combustão nas câmaras do motor como um gás secundário de queima, desta maneira auxiliando e substituindo boa parte da combustão antes inteira por gasolina do veículo. Segundo a empresa *BATIK*, fabricante da *Gerador BATIK*, com este dispositivo é possível

aumentar a eficiência do motor, poupando assim combustível, diminuir a temperatura efetiva de funcionamento e diminuir drasticamente a emissão de resíduos poluentes. Segundo a empresa o motor de seu veículo só precisa de uma quantidade previamente calculada de HHO para atender os resultados esperados. [12]

### 3.1.2. Componentes do Kit para geração de hidrogênio

O kit *BATIK* conforme mostrado na figura 12 é composto por alguns componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos além de ligações hidráulicas que serão descritos a seguir.

Figura 12 - Kit de instalação da Hydrocell HHO.



Fonte: [AUTOR]

### Borbulhador

Na figura 13 temos em foco o reservatório de água ou borbulhador. O Borbulhador possui aproximadamente o volume de um litro, construído em termopolímero (poliuretano) é resistente à oxidação da solução eletrolítica. Tem por função armazenar a solução eletrolítica e reter as bolhas dos gases e a fim de direcioná-los para a sua utilização final. [12]

Figura 13 - Reservatório ou borbulhador.



Fonte: [Autor]

## **Filtro**

O filtro conforme mostrado na figura 14, tem as mesmas basicamente as mesmas características físico-químicas que o borbulhador, porém este recipiente separa completamente o gás HHO de prováveis bolhas que possam conter líquido. O orifício abaixo no centro do reservatório permite drenar a parte líquida, a função do filtro é muito importante, pois vai impedir que líquidos entrem no motor do veículo. [12]

Figura 14 - Reservatório de filtro.

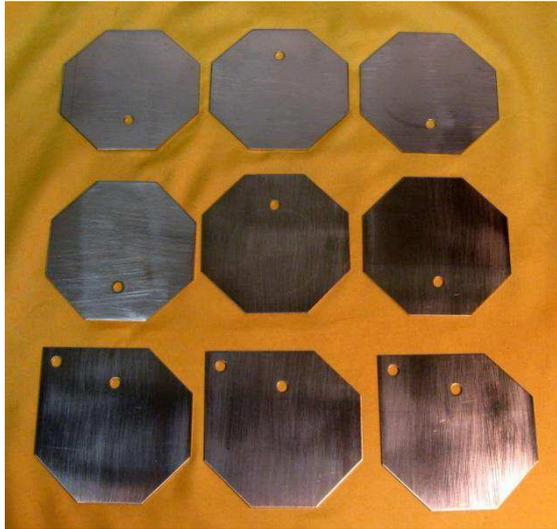


Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

## **Célula de eletrolise BATIK**

Chegamos ao componente de maior importância na geração de gás. Nosso gerador de hidrogênio por eletrólise, que comercialmente chamamos de *Célula BATIK*, mostrada na figura 11, é feito com nove placas de aço inoxidável 316L.

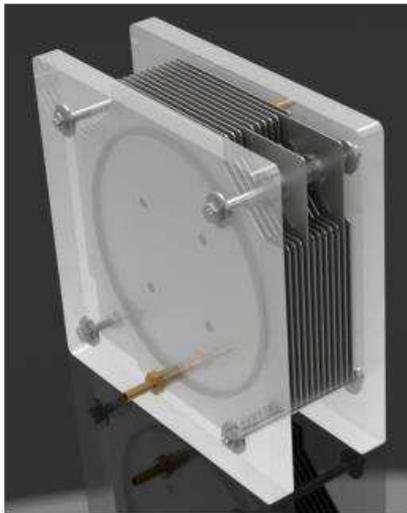
Figura 15 - Placas em aço inox 316L.



Fonte: [Autor]

Os componentes são montados conforme esquema abaixo

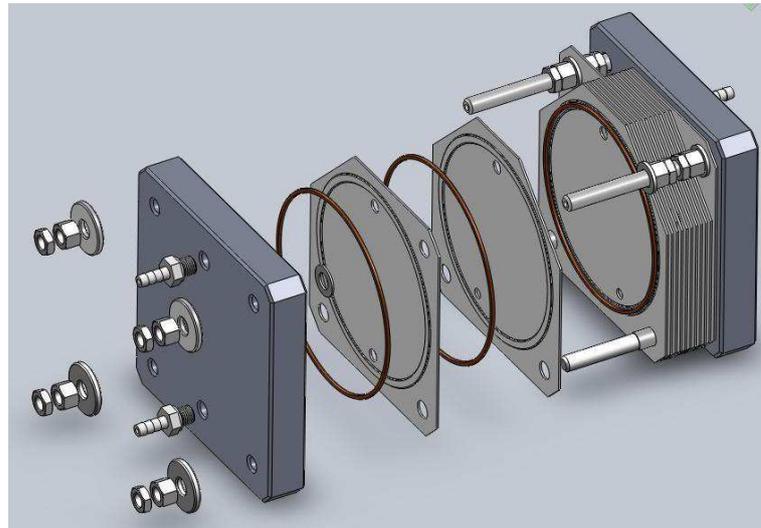
Figura 16 - Vista total da BATIK.



Fonte: [Autor]

A figura 15 ilustra o forma das placas de medidas de 4 1/2" x41/2" x2" o que é suficiente para produzir 2,24l/min de gás HHO. As placas são isoladas e vedadas umas entre as outras por um polímero e montadas conforme figura 16.

Figura 17 - Vista da montagem da BATIK



Fonte: [autor]

### **Chip Eletrônico (PWM).**

O chip FB2 como mostra na figura 18, de fabricação da empresa Volo performance foi estrategicamente desenvolvido para as sanar os déficits que são exigidos em veículos equipados com gerador de HHO. O FB2 utiliza dados dinâmicos, ele mede os níveis de O<sub>2</sub> nos gases de escape, juntamente com a velocidade e carga do motor, a temperatura do ar de admissão e de volume, e muitas outras variáveis para determinar a taxa de fornecimento de combustível mais eficiente. [14]

Ao utilizar HHO como um suplemento eletrônico do combustível, o FB2 adapta o fornecimento de combustível para aperfeiçoar a eficiência energética. Quando HHO está desativado, o FB2 automaticamente se reajusta e muda para mapas altamente eficientes, aprimorados não HHO. [14]

O FB2 é um componente eletrônico específico com programa personalizado e micro controlador 25 de MHz. Ele utiliza a sua alta velocidade de entrada / saída para se comunicar diretamente com a ECU através da porta OBD- II série. O FB2 é compatível com todos os fabricantes, motores diesel, Flex, sistemas de HHO suplemento e equipados com Turbo/ compressores, porém não é compatível com opções de motores híbridos, propano ou de gás natural. [14]

Figura 18 - Chip Volo Performance B2.



Fonte: [Manual de instalação BATIK]

### Amperímetro digital

O amperímetro digital como mostra a figura 19, é um medidor utilizado para fazer a medida da intensidade no fluxo da corrente elétrica que passa através da seção transversal de um condutor e tem como função informar visualmente através de um display de led, para que o condutor possa corrigir o eletrólito caso a corrente seja maior ou menor que 15 A.

Figura 19 - Amperímetro digital 50A.



Fonte: [Manual de instalação BATIK]

### Relé

O relé mostrado na figura 20 nos possibilita utilizar uma mínima quantidade de corrente para ligar ou desligar o gerador de HHO. O relé é um dispositivo eletromecânico ou não, com inúmeras aplicações possíveis em comutação de contatos elétricos. Este relé apresenta quatro terminais que devem ser usados conforme abaixo: [12]

- ✓ Terminal 86 = Deve ser ligado na carroceria como negativo (GND).
- ✓ Terminal 85 = Deve ser ligado na alimentação da bomba de combustível.

- ✓ Terminal 87 = Deve ser ligado no terminal positivo do gerador de HHO
- ✓ Terminal 30 = Deve ser ligado na caixa de fusíveis e para a bateria.
- ✓ Terminal 87<sup>a</sup> = Manter desligado.

Figura 20 - Relé automotivo.



Fonte: [Manual de instalação *BATIK*]

### Fusível

Na verdade o fusível mostrado na figura 21 é um dispositivo eletromecânico conhecido como disjuntor. Este disjuntor será ligado a caixa de fusíveis como um fusível normal, mas se uma corrente superior a de 30 ampères atingir a linha o disjuntor vai desarmar e reiniciar o circuito automaticamente em poucos segundos. Isso evita principalmente danos a segurança do ocupante e do veículo.

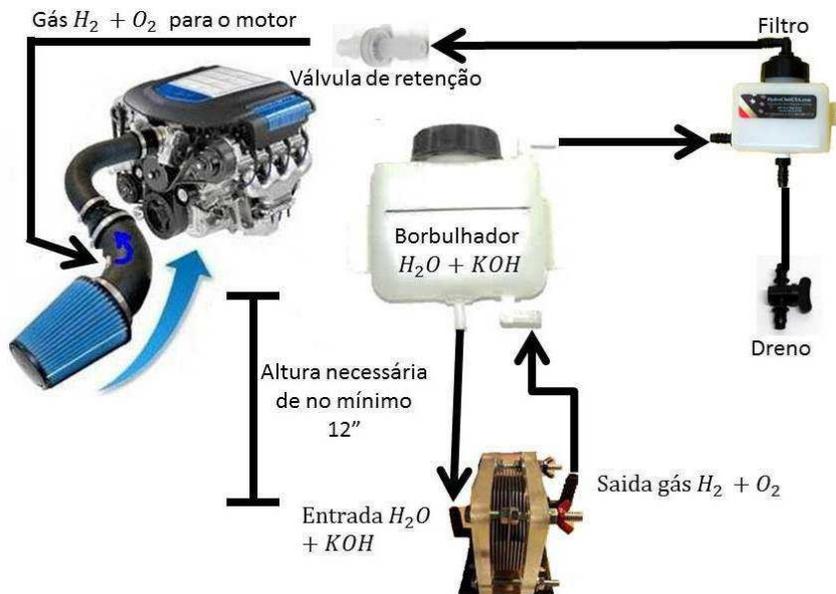
Figura 21 - Disjuntor Lamina.



Fonte: [Manual de instalação *BATIK*]

## Funcionamento do kit *BATIK*

Figura 22 - Esquema Hidráulico *BATIK*.



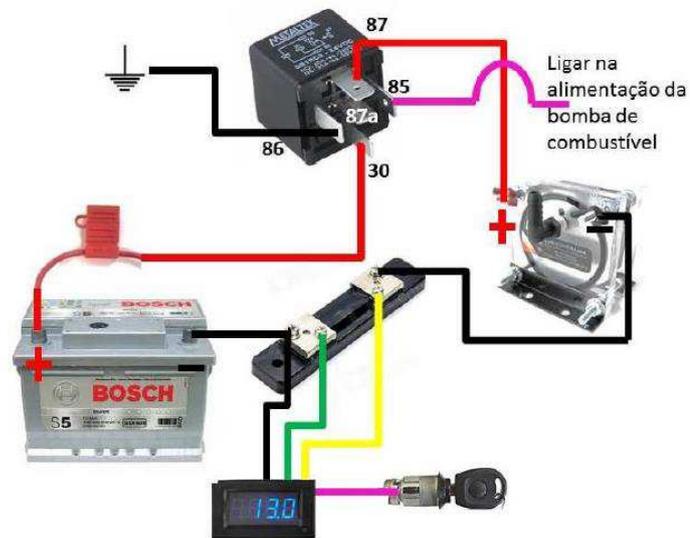
Fonte: [Manual de instalação *BATIK*]

O borbulhador deve ficar localizado a no mínimo a 11” de altura em relação ao gerador de HHO, por meio da ação gravidade a solução aquosa de H<sub>2</sub>O e KOH, o eletrólito descera até o gerador. As indicações pretas simulam a tubulação em mangueira de poliuretano 3/4” e o sentido de circulação da solução. Ao chegar ao gerador à solução aquosa entra em eletrólise conforme explicado no capítulo 2.2, e sai em forma de bolhas de gás H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.

As bolhas homogeneizadas com o eletrólito sobem novamente ao reservatório inicial onde são separadas por completo, neste ponto o gás HHO é direcionado ao filtro, este por sua vez irá reter qualquer quantidade de eletrólito que possa chegar até o motor. Do filtro o gás HHO vai ser direcionado a aspiração de ar do veículo onde a sucção do motor é responsável pela circulação do gás no interior do sistema

A segunda parte para o funcionamento do equipamento é as ligações elétricas. A figura 23 mostra o esquema e seus componentes.

Figura 23 - Esquema elétrico de alimentação do Batik gerador.



Fonte: [Autor]

### 3.1.3. Veículo Teste

Para todo o experimento que iremos realizar a seguir utilizaremos o veículo automotor conforme mostrado na figura 24 do fabricante GM, modelo Corsa Wind Hatch Super, motor 1.0 EFI 8V, com 60HP de potência, ano de fabricação 1999-2000, atualmente com 88.000 km de operação.

Figura 24 - Corsa Wind Hatch Super, 1.0 EFI 8V, 60HP, ano de fabricação 2000.



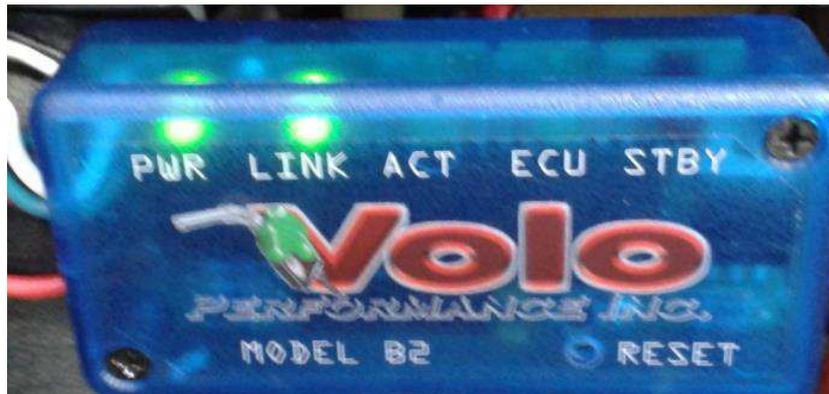
Fonte: [Autor]

### 3.1.4. Comissionamento do Kit para geração de hidrogênio

O kit para geração de HHO juntamente com todos os seus componentes conforme mostrado na figura 12 foi adquirido do fabricante Nacional BATIK a um custo de R\$ 550,00 mais R\$25,00 de frete, totalizando assim o valor de R\$575,00.

Este kit foi instalado conforme manda o fornecedor e está representado nas figuras 25, 26 e 27.

Figura 25 - PWM Volo Performance.



Fonte: [Autor]

O PWM Volo para controle da injeção eletrônica foi instalado para um melhor acesso em um ramificação próximo a porta OBD do Carro, e para não haver mudanças as características físicas do interior do automóvel, Além de que o relé e o amperímetro digital foram instalados dentro do porta luvas.

Figura 26 - Instalação do relé e amperímetro digital.



Fonte: [Autor].

Figura 27 - Todos os componentes Batik instalados próximo ao motor do veículo em análise.



Fonte: [Autor].

### 3.1.5. Análise de emissão de poluentes pelo PGA-500

O PGA-500 conforme mostrado na figura 28 é uma tecnologia com bastante tempo de desenvolvimento mais só agora utilizado em larga escala devido as cotas de CO<sub>2</sub>. Equipamento baseado em plataforma Windows sete, especialmente desenvolvido para uso em Centros de Inspeção ou oficinas do DETRAN, como também em oficinas de reparação automobilística de grande porte. O dispositivo é capaz de efetuar medições de Rotação (RPM), Temperatura (°C), Lambda, Relação Ar Combustível (AFR), Oxigênio (O<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Hidrocarbonetos (HC), CO corrigido (CO cor) e Diluição (%CO+CO<sub>2</sub>) de veículos com motores a álcool, gasolina ou diesel, utilizando a tecnologia infravermelha não dispersiva.

O PGA-500 possui um banco de dados de veículos, e os testes são avaliados de acordo com os limites oficiais pré-estabelecidos para o ano de fabricação do veículo em teste. Além disso, o programa também possui um banco de dados de armazenamento das inspeções realizadas em modo oficial.

Figura 28 - Analisador de gases PGA-500 fabricante SUN.



Fonte: [Manual de operação, Snep-on VALE].

### 3.1.6. Dinamômetro de rolos Dynotec 720i

Este equipamento de ensaio conforme mostrado nas figuras 29 e 30 é o de maior confiança e mais sério que existe para a medição de potência também é usado pelas equipes de competições de todo o mundo. Seu fundamento, parte da primeira lei de Newton a inércia, tão antigo como a própria física, mais fácil de aplicar a medição de potência desde o uso massivo dos computadores.

Outros detalhe importante deste método é que também poderemos medir a potência de perda absorvida pelos elementos da caixa de câmbio e o conjunto de da transmissão. Isso ocorrerá na etapa de desaceleração do ensaio.

Figura 29 - Dinamômetro vista traseira em prova de torque e potência.



Fonte: [Autor].

Dados de ensaio.

- ✓ A Potência no virabrequim, A potência na roda e potência de perda (cada ~ 30 rpm).
- ✓ Torque no virabrequim e na roda (cada ~ 30 rpm).
- ✓ Cálculo de área de cada prova.
- ✓ Sistema de estrada, medições em metros e em tempo, simulação de arrancada.
- ✓ Cálculo das variações de velocidade.
- ✓ Potencia instantânea.
- ✓ Potencias média de cada item (único software com essa vantagem, muito importante para uma medição correta).
- ✓ Análise simultânea de até 10 provas.
- ✓ Ventilador de ar progressivo junto com aceleração.
- ✓ Sistema lambda em tempo real em gráficos e números (opcional banda larga).
- ✓ Estação barométrica digital e automática.
- ✓ Variador de frequência de 10 hp.
- ✓ Interface com entrada para 05 sensores auxiliares.
- ✓ Raque completo para disponibilidade do computador móvel

O software permite colocar até 4/5 sensores auxiliares, Ex: pressão de óleo, temperatura, velocidade de ar, temperatura de ar, etc.



Tabela 11 - Teste de emissão de poluentes no veículo com adição de H<sub>2</sub>.

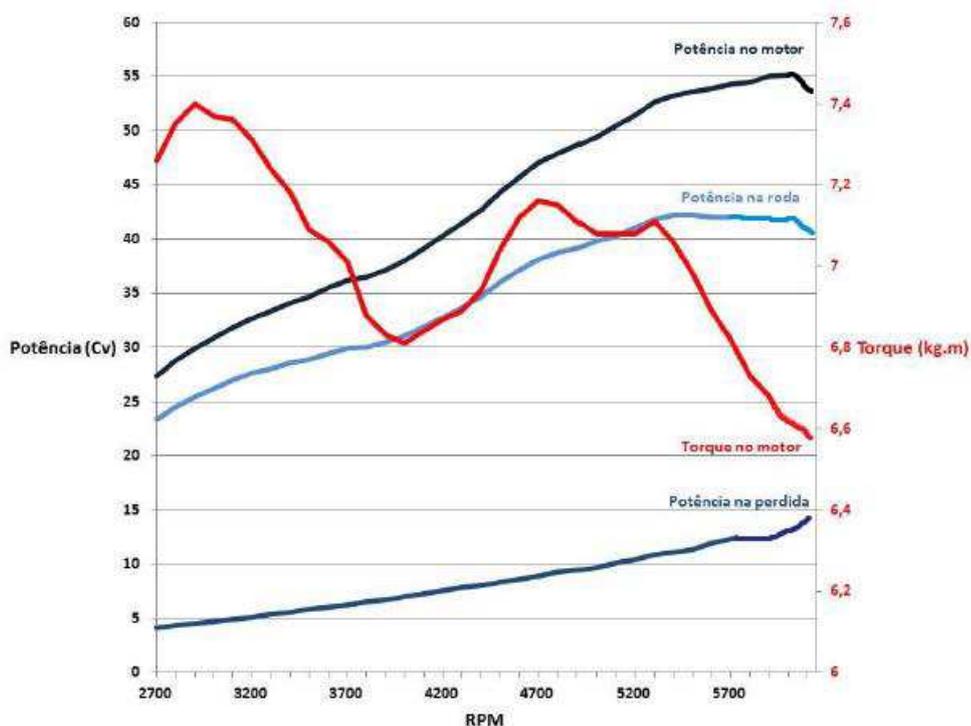
TESTE EMISSÃO DE POLUENTES – ORIGINAL								
ITEM DE INSPEÇÃO	LIMITES	LENTA	INF.	SUP	2500 RPM	INF.	SUP	RESULTADO
CO corrigido % vol.	1	0,38	0,24	0,48	0.33	0,27	0,38	APROVADO
Fator Diluição	2,4	1,5	1,11	1,21	1	1,02	1,04	APROVADO
HC hexano (ppm vol.)	700	137	94	169	52	33	72	APROVADO
CO % vol	-----	0,21	0,21	0,28	0,3	0,24	0,31	-----
CO <sub>2</sub> % vol.	-----	9,8	7,71	11,82	13,9	13,7	14,17	-----
HC hexano (ppm vol.)	-----	90	53	125	51	32	78	-----
Temperatura do óleo °C	-----	95	93	97	97	95	99	-----
Rotação/Var. Motor (RPM)	2300/2700	959	952	961	2518	2499	2538	APROVADO

Fonte: [Autor].

### 3.2.2. Resultados de torque e potência

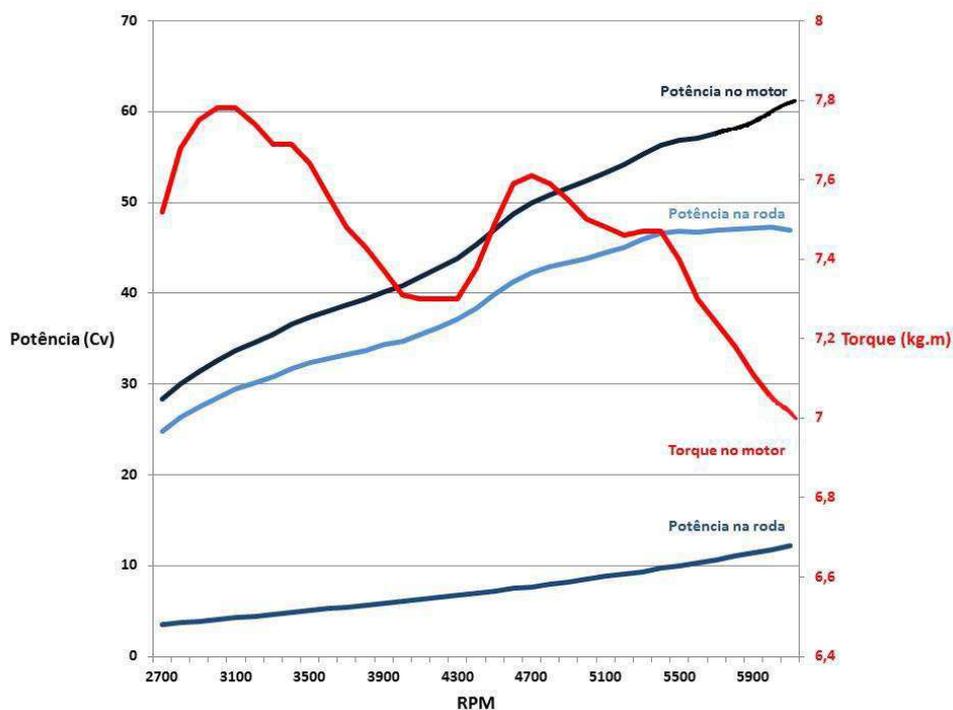
Os ensaios com o dinamômetro de rolos para detecção dos parâmetros de torque e potência foram realizados na empresa Auto Diesel – Pró Diesel em São Luís/MA juntamente com o responsável técnico (Sr. BORGES) pelo equipamento e os dados concebidos nos testes serão apresentados no gráfico da figura 31, com o veículo em estado original de trabalho e o gráfico da figura 32 com a adição de H<sub>2</sub>.

Figura 31 - Teste de Torque e Potência em relação a RPM sem H<sub>2</sub>.



Fonte: [Autor].

Figura 32 - Teste de Torque e Potência em relação a RPM com H2.



Fonte: [Autor].

### 3.2.3. Testes de consumo total de combustível

Os testes de consumo total de combustível foram realizados durante os meses de setembro e outubro. Os resultados coletados foram de forma manual, observando a quilometragem percorrida até o momento do abastecimento completo do tanque. Os valores obtidos serão apresentados nas tabelas 12 e 13. Para o referido teste foi considerado alguns requisitos:

- Abastecimento com gasolina aditivada em postos com bandeira Petrobras.
- Abastecimento completo até o primeiro desligamento automático da bomba.
- Médias de quilometragem em rodovias e cidade.

Tabela 12 - Teste de consumo sem adição de H2.

Consumo de fábrica com todos os componentes regulados	
Média de KM/L	11,6
Desvio Padrão KM/L	1,88
Limite inferior KM/L	9,7

Limite Superior KM/L	13,57
----------------------	-------

Fonte: [Autor].

Apresentaremos a média dos ensaios e os limites médios calculados pelo desvio padrão das amostras. Os dados obtidos na tabela 12, implicam em três amostras com uma soma total de 1340 km percorridos.

Os dados obtidos na tabela 13 correspondem a duas amostras com uma soma total de 600 km percorridos.

Tabela 13 - Teste de consumo com adição de H<sub>2</sub>.

Consumo de fábrica com todos os componentes regulados	
Média de KM/L	17,12
Desvio Padrão KM/L	2,8
Limite inferior KM/L	14,23
Limite Superior KM/L	19,02

Fonte: [Autor].

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A relação entre prática e teoria na maioria das vezes sofrem descompassos e divergências. Entende-se que em situações práticas, a maioria das variáveis tendem a distorcer os resultados obtidos na teoria. A coleta dos dados dos experimentos podem conter erros. A essência deste trabalho é buscar a fonte dos erros, e não havendo solução possível para minimiza-los, os mesmos devem ser identificados e quantificados.

Nesse contexto é que foram realizados os experimentos apresentados no capítulo 3.2, dos quais serão discutidos os resultados obtidos, procurando trazer uma interpretação clara e objetiva.

##### 4.1. Experimento de emissão de poluentes

Como analisado, a averiguação dos experimentos logrou a finalidade de averiguar qual seria o comportamento da emissão de poluentes com a adição de H<sub>2</sub>. Nesses experimentos, quando comparados os resultados das tabelas 11 e 12, foi possível verificar que o processo com adição de H<sub>2</sub> apresenta uma diminuição nos poluentes medidos, exceto para o monóxido de carbono.

Também, ressalta-se que o veículo foi aprovado no teste de emissão de poluentes conforme itens controlados pelo INMETRO.

A tabela 14 mostra o percentual médio de redução de poluentes, os dados analisados são as médias das somas dos limites estatísticos da emissão de poluentes em marcha lenta e a 2500RPM. Com a análise das tabelas pode-se afirmar uma redução total média na emissão de poluentes de 23%.

Tabela 14 - Média total de variação de poluentes com adição de H<sub>2</sub>.

ITEM DE INSPEÇÃO	%
CO corrigido % vol.	-45%
Fator Diluição	-26%
HC hexano (ppm vol.)	-63%
CO % vol	-15%
CO <sub>2</sub> % vol.	22%
HC hexano (ppm vol.)	-25%
Média total de redução	-26%

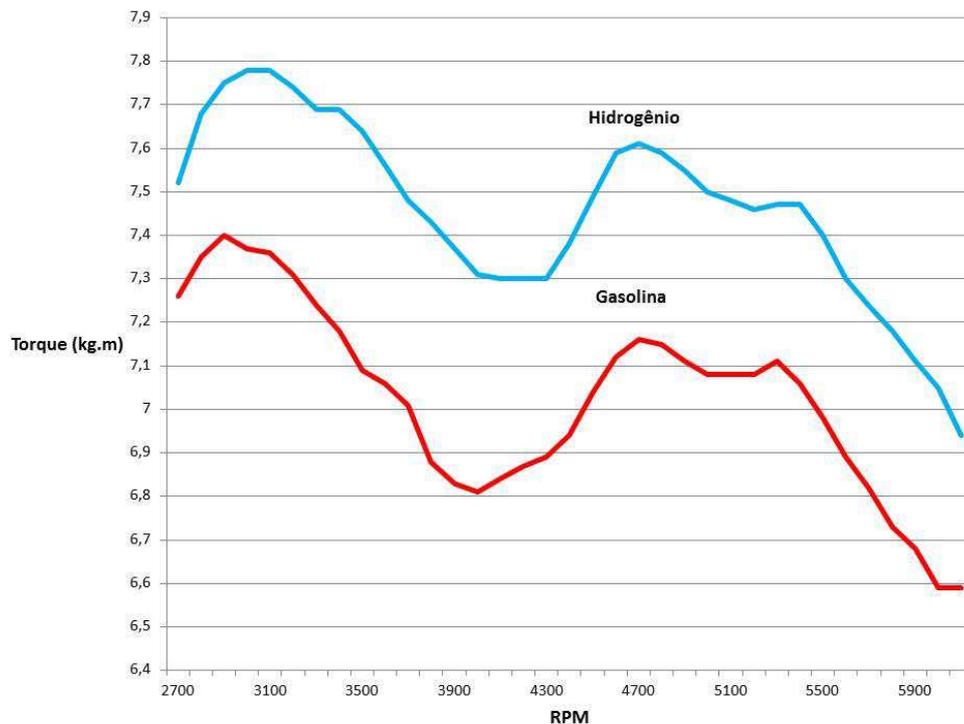
Fonte: [Autor].

## 4.2. Experimento de torque e potência

O intuito final deste experimento foi analisar as condições laboratoriais, a variação apresentada com a adição de gás HHO nos ensaios de potência e torque por rotação do motor analisado.

Observando os gráficos das figuras 33 e 34, podemos atestar que com a adição de H<sub>2</sub> como gás de adição, diminui a amplitude e suaviza a curva da linha de torque. Também, pode-se concluir que o aspecto das linhas de potência, é muito semelhante em ambos os gráficos analisados. Para que esta diferença torne-se visível, iremos apresentar de forma separada os dados adquiridos para os testes com e sem H<sub>2</sub>.

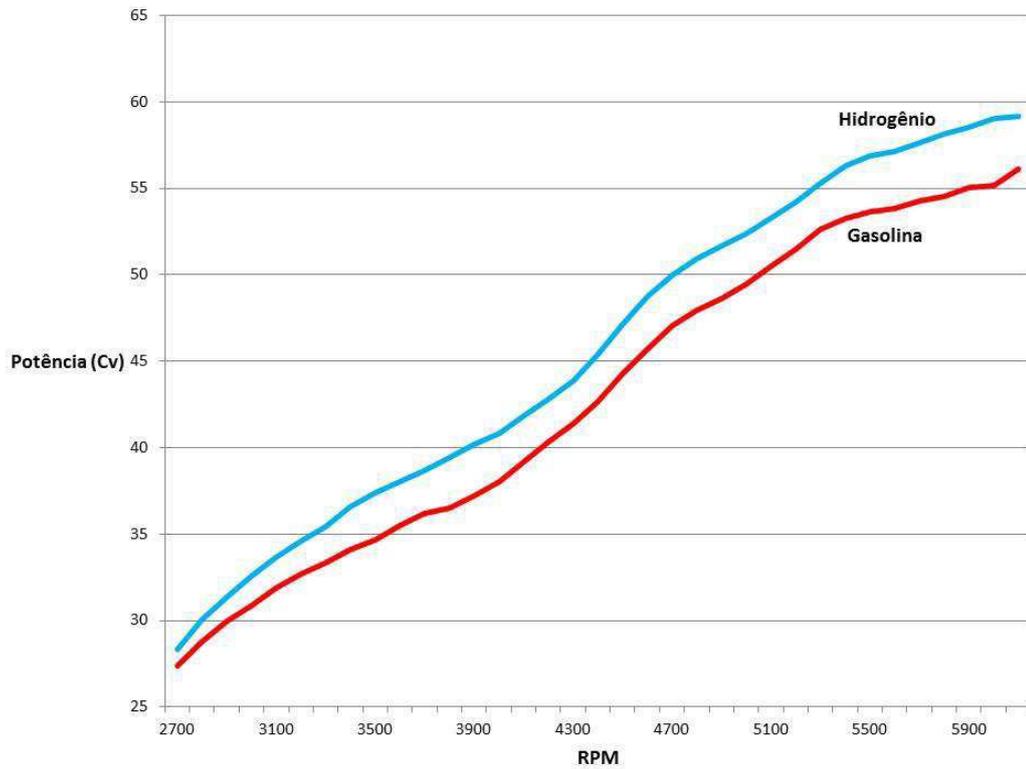
Figura 33 - Comparativo de torque entre gasolina e adição de H<sub>2</sub>.



Fonte: [Autor].

O gráfico ilustrado na figura 33 explicita a diferença entre as curvas de torque com e sem a adição de H<sub>2</sub>. Esta variação representa um ganho considerável de torque de 3,6 a 9% por faixa de RPM. O gráfico apresentado na figura 34 explicita a diferença entre as curvas de potência no motor com e sem a adição de H<sub>2</sub>. Esta variação representa um ganho de potência no motor de 3,8 a 10% por faixa de RPM.

Figura 34 - Comparativo de potência entre gasolina e adição de H<sub>2</sub>.



Fonte: [Autor].

### 4.3. Experimento de consumo de combustível

Este ensaio teve a finalidade de comprovar o consumo médio de quilômetros por litro de combustível utilizado. Analisando os dados coletados e apresentados nas planilhas 13 e 14, verificamos um incremento significativo nos quilômetros percorridos com um litro de combustível. O menor valor de ganho mostrado neste experimento varia de 7% até uma média de 45%. Assim podemos concluir que a adição de HHO nas condições de produção conforme estabelecidos pelo fabricante, melhora o desempenho do veículo testado.

## 5. DISCUSSÃO GERAL

Analisando as melhorias apresentadas nos ensaios de emissão de gases poluentes, torque, potência e consumo discutiremos alguns fatos relevantes:

- O alternador do veículo produzirá carga excessiva, enquanto o gerador de HHO apenas utilizará parte da capacidade extra, durante o funcionamento do veículo.
- Motores de combustão interna aspiram o ar a partir da atmosfera. Esse ar contém cerca de 80% de nitrogênio, o que não tem função direta na combustão. Ele também contém cerca de 20% de O<sub>2</sub> (existem vestígios de outros gases no ar, tais como argônio, dióxido de carbono, criptônio e outros gases, mas estas representam apenas cerca de 0,99 % no total). Na realidade o que estamos fazendo com o sistema de geração de HHO é aditivar a mistura de O<sub>2</sub> e combustível com H<sub>2</sub> melhorando a mistura, que é muito mais útil para a combustão.
- O gás H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> são mais simples de obtermos do que a molécula de gasolina, eles reagem mais eficientemente e como um estimulante para inflamar o combustível, mais cedo e de forma mais completa. A quantidade superior de O<sub>2</sub> da mistura permite que mais gasolina queime atuando como uma aditivo entre as moléculas aumenta a eficiência. É como a adição de vento para o fogo.
- O gás H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> tem uma taxa de compressão mais elevada que a da gasolina, o que permite a utilização de mais combustível. Quando HHO está desligado, o combustível adicional não utilizado passa pelo motor e não queima completamente. Este efeito é o lodo que se forma sobre os pistões e suja as velas.
- O veículo com gerador de HHO gera uma menor taxa de poluentes, porque o combustível HHO é mais eficiente e regula a queima, haja vista, uma vez que está em reação com o O<sub>2</sub> que é mais interessante para a combustão, assim ocorre toda a combustão da combustível. Um ciclo de combustão mais eficiente permite que você use menos combustível com a mesma definição do acelerador. E o aumento da eficiência permite um ajuste refinado do acelerador mais baixo, para uma potência de produção e, portanto, diminui o consumo de combustível.
- A queima do HHO é rápida e gera uma turbulência considerada, o que favorece a queima do combustível, Assim atestando o motivo pelo qual a medição de gases indicou uma diminuição do CO e aumento do CO<sub>2</sub>.

## CONCLUSÃO

A observação deste trabalho possibilitou a racionalização da necessidade da busca de combustíveis alternativos, para que os combustíveis fosseis sejam paulatinamente substituídos.

O mundo atual nos revela que essa busca será incessante e cada dia, novas pesquisas trazem tecnologias para tornar prática a utilização de H<sub>2</sub> em veículos automotores, as mesmas vão desde células de H<sub>2</sub> até motores de combustão interna, específicos para queimar H<sub>2</sub>. Assim todos os pesquisadores sabem que a dificuldade passa por como produzir esse produto com segurança e por um baixo valor de mercado.

Ao efetuar os ensaios práticos, evidenciamos a produção de H<sub>2</sub> por eletrólise da água e o seu consumo imediato como parte do combustível do veículo de teste. Mediante aos resultados obtidos, pode-se verificar uma melhoria quanto aos aspectos de emissão de gases poluentes, consumo de combustível, torque e potência.

Observa-se que a utilização do H<sub>2</sub> será buscada aos poucos, e é uma tendência mundial para o futuro como a ultimatecell já realiza, para manter em alta a prosperidade econômica do mundo e ao mesmo tempo Preservando toda fauna e flora do mundo.

## REFERÊNCIAS

- [1] ALDABÓ, Ricardo. **Célula Combustível a Hidrogênio: Fonte de energia da nova era.** São Paulo: Artliber, 2004.
- [2] ALMEIDA, A. T. Hidrogênio como Combustível. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005. 30 slides.
- [3] BOHACIK, T.S. De Maria and SAMAN, W.Y. **Constant volume adiabatic combustion of stoichiometric hydrogen oxygen mixtures**, v.9, n.1-4, Set/Dez. 1996. Disponível em: <<http://www.osti.gov/scitech/search.jsp>>. Acesso em 13 out. 2015.
- [4] HARPER, Gavin D. J. **Fuel cell projects for the Evil Genius.** New York: McGraw-Hill, 2008.
- [5] Hydrogen Properties, College of the Desert, December 2001, Disponível em: <[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech\\_validation/pdfs/fcm01r0.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf)>. Acesso em 20 nov. 2015
- [6] MARCHETTI, C and NAKICENOVIC, N. The dynamics of energy systems and the logistic substitution model, International Institute for Applied System Analysis, Austria.
- [7] NASCIMENTO, JOEL H.S. Estudos dos processos físicos envolvidos nos motores que utilizam como combustível álcool e gasolina (ciclo otto). Brasília: Universidade Católica de Brasília, 2008.
- [8] NETO, Emilio H. G. **Hidrogênio Evoluir Sem Poluir.** Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 1ª. Ed, 2005. 240 p.
- [9] PANDEY, P.C. and SHAN, H.S. **Modern Machining Processes.** Tata: McGraw-Hill, 1985.
- [10] SARDELLA, Antonio. **Curso Completo de Química.** São Paulo: Editora Ática, 2º Edição 1999.
- [11] SILVA, Sara. **Hidrogênio como Alternativa - Do cepticismo à realidade.** Escola Superior Agrária de Santarém. Santarém, p. 35. 2010.
- [12] WADDELL, Richie. **Converted: How to convert your vehicle into a hydrogen hybrid in about 3 hours and save.** HydroClubUSA, 2011.
- [13] WHITE, Christoper. **Advanced Hydrogen-Fueled Engines: Potential end Challenges, University of New Hampshire, Sandia National Laboratories.** ERC Symposium, June 2007.
- [14] Volo performance inc. Disponível em: <<http://voloperformance.com/fs2hhoedition.html>>. Acesso em: 01 nov. 2015.