

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL
AUXILIAR EM MOTORES DE CICLO OTTO**

Por:

Felipe Morcerf de Paula e Santos

Leonardo Santos Neves de Souza

Volta Redonda-RJ
2018

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL AUXILIAR
EM MOTORES DE CICLO OTTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica do Centro Universitário de Volta
Redonda - UniFOA, como requisito parcial
para obtenção de título de bacharel em
engenharia mecânica.

Alunos:

Felipe Morcerf de Paula e Santos
Leonardo Santos Neves de Souza

Orientadores:

Alexandre Alvarenga Palmeira
Alexandre Fernandes Habibe
Diniz Félix dos Santos Filho

Volta Redonda – RJ

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Felipe Morcerf de Paula e Santos

Leonardo Santos Neves de Souza

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL AUXILIAR EM MOTORES DE CICLO OTTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial para obtenção do Bacharelado em Engenharia Mecânica no Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, defendido e aprovado em _____ de _____ de 2018 pela banca examinadora constituída por:

Prof. Doutor Alexandre Alvarenga Palmeira

Orientador

Prof. Doutor Alexandre Fernandes Habibe

Orientador

Prof. Esp. Antônio Pádua Sobreira Leal

AGRADECIMENTO

Agradecemos primeiramente à Deus, nossa fortaleza nos momentos em que acreditamos não ser possível ir adiante. Agradecemos ao Prof. Dr. Alexandre Palmeira pela orientação e apoio na realização dos estudos desse trabalho. Ao Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos. Ao Prof. Dr. Diniz Felix, pela orientação, apoio e confiança. Agradecemos também a todos os professores da UniFOA que, com seu profissionalismo e esforço, nos proporcionaram uma educação e conhecimentos satisfatórios para idealização deste projeto. A nossos pais e familiares que sempre nos apoiaram em nossa caminhada sem medir esforços. Aos amigos e colegas, pelo apoio de todos os dias. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

RESUMO

A indústria como um todo está sempre em busca de novas fontes alternativas de energia, seja devido à escassez das fontes naturais ou devido ao alto nível de poluentes emitidos pelas energias geradas por combustíveis fósseis utilizados atualmente. Neste panorama, a busca por energias limpas e renováveis obtém uma maior importância, pois concilia as duas necessidades da indústria hoje. O hidrogênio como fonte de geração de energia atende a ambas as questões pois é o elemento de maior abundância em nosso planeta e por durante a sua queima gerar apenas água e calor como produtos, o que torna sua queima livre de poluentes.

Durante o estudo, o hidrogênio se mostrou um ótimo combustível a ser utilizado, possuindo excelentes propriedades químicas, capaz de gerar mais energia que a gasolina. Entretanto, para ser utilizado como combustível único em motores de ciclo Otto, estes motores deveriam passar por extensas modificações para que suportassem as altas temperaturas da queima do combustível e pudessem fazê-la de forma o mais eficiente possível. Existe também a questão do armazenamento, que como vimos é uma grande dificuldade devido ao espaço limitado dentro de um veículo. Por essas razões, a utilização de hidrogênio como combustível único foi descartada, e foi analisada a utilização como combustível auxiliar aos demais utilizados.

Como combustível auxiliar, o hidrogênio quando associado a outros combustíveis em proporções ideais gera um aumento da eficiência dos motores em até 18%, quando utilizado gasolina, conforme estudado. Tal aumento de eficiência está relacionado diretamente ao consumo de combustível do veículo, fazendo com que passe a consumir menos, gerando economia ao proprietário.

É claro que o sistema como um todo necessita ainda de grandes investimentos para que sejam melhores aproveitadas as características do hidrogênio como combustível, mas existe grande potencial na sua utilização como combustível, sendo considerado por muitos como o combustível do futuro.

PALAVRAS-CHAVE: Motores de combustão interna, Hidrogênio como combustível, Análise econômica, Células geradoras de hidrogênio, Aumento de eficiência.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa de compressão de acordo com o combustível	23
Tabela 2 - Relação do fator lambda e o tipo de mistura	24
Tabela 3 - Informações técnicas do hidrogênio	29
Tabela 4 - Poder calorífico de diferentes combustíveis	30
Tabela 5 - Propriedades do hidrogênio como combustível	31
Tabela 6 - Valores de <i>flash point</i>	33
Tabela 7 - Temperatura de autoignição	35
Tabela 8 - Valores de octanagem	36
Tabela 9 - Principais fontes, processos e tipos de energias utilizadas na obtenção do H ₂	38
Tabela 10 - Efeito da adição do H ₂ no consumo de etanol	57
Tabela 11 - Comparação de litros de etanol gastos por ano	58
Tabela 12 - Consumo específico de H ₂ - etanol	58
Tabela 13 - Quantidade de células para atender demanda - etanol	59
Tabela 14 - Efeito da adição do H ₂ no consumo de gasolina	59
Tabela 15 - Comparação de litros de gasolina gastos por ano	60
Tabela 16 - Consumo específico de H ₂ - gasolina.....	60
Tabela 17 - Quantidade de células para atender demanda - gasolina.....	61
Tabela 18 - Investimento para instalação do kit de geração de hidrogênio.....	62
Tabela 19 - Economia financeira.....	63

Tabela 20 - Tempo de retorno do investimento.....64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura básica de um motor	14
Figura 2 - Diagramas P-V e T-S do ciclo padrão Otto	17
Figura 3 – Admissão, 1º tempo	18
Figura 4 – Compressão, 2º tempo.....	18
Figura 5 - Explosão, 3º tempo	19
Figura 6 - Escape, 4º tempo.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 7 - Ciclo de Carnot	21
Figura 8 - Variação da eficiência térmica em função da taxa de compressão, para diferentes valores de k.....	22
Figura 9 - Superposição de um ciclo Otto teórico com o real	26
Figura 10 - Extensão da flamabilidade	34
Figura 11 - Geração de hidrogênio por eletrólise	40
Figura 12 - Variação da eficiência térmica do motor a gasolina para diferentes percentuais de hidrogênio.....	45
Figura 13 - Efeito da mistura de hidrogênio na eficiência do motor a etanol	46
Figura 14 - Kit de geração de hidrogênio da HydroclubUSA	51
Figura 15 - Célula de geração de H ₂	52
Figura 16 - Esquema de montagem da célula.....	52
Figura 17 - Reservatório de água ou borbulhador	53
Figura 18 - Amperímetro digital.....	54

Figura 19 - Chip Volo Pergormance FS255

Figura 20 - Caminho percorrido pelo H₂55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Generalidades	12
1.2. Objetivo	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. Motores de Combustão Interna	13
2.1.1. Partes fixas	14
2.1.2. Partes móveis	15
2.2. Ciclo Otto	16
2.2.1. Trabalho realizado	20
2.2.2. Rendimento	21
2.2.3. Relação estequiométrica	23
2.2.3.1. Limite pobre	24
2.2.3.2. Mistura econômica	25
2.2.3.3. Mistura de máxima potência	25
2.2.3.4. Limite rico	25
2.2.4. Ciclo Otto real	25
2.3. Hidrogênio	28
2.3.1. Características	28
2.3.2. O hidrogênio como combustível	30
2.3.2.1. Combustão do hidrogênio	31
2.3.2.2. Fogo	32
2.3.2.3. Velocidade de combustão	32
2.3.2.4. <i>Flash Point</i>	33
2.3.2.5. Extensão da flamabilidade	34
2.3.2.6. Temperatura de autoignição	35
2.3.2.7. Octanagem	35
2.3.2.8. Energia de ignição	36
2.3.2.9. Distância de extinção das chamas	36
2.3.3. Geração de hidrogênio	37
2.3.3.1. Eletrólise	39
2.3.3.1.1. Solução eletrolítica ou eletrólito	40

2.3.4.	Armazenamento	41
2.3.4.1.	Hidrogênio gasoso.....	41
2.3.4.2.	Hidrogênio líquido	42
2.4.	O Hidrogênio em Motores de Combustão Interna	43
2.4.1.	Hidrogênio quando associado a outros combustíveis	44
3.	METODOLOGIA	47
3.1.	Levantamento das Bases Teóricas	47
3.2.	Estado da Técnica.....	47
3.3.	Modelo de Estudo	48
3.4.	Análise dos Parâmetros	48
3.5.	Modelo de Análise Econômica	49
3.6.	Orçamento Preliminar de Investimento.....	49
4.	ESTUDO DE CASO	50
4.1.	Kit Automotivo de Geração de Hidrogênio por Eletrólise	50
4.1.1.	Célula geradora	51
4.1.2.	Borbulhador	53
4.1.3.	Amperímetro	54
4.1.4.	Chip eletrônico	54
4.1.5.	Funcionamento.....	55
4.1.6.	Produção de H ₂	56
4.2.	Análise de Consumo de Combustível	57
4.2.1.	Etanol	57
4.2.2.	Gasolina	59
5.	ANÁLISE DE GANHOS ECONÔMICOS (Maio/2018)	62
5.1.	Investimento Inicial.....	62
5.2.	Economia de Combustível	63
5.3.	Retorno Econômico	63
6.	CONCLUSÃO	65
7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	67

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

O atual modelo de desenvolvimento se caracteriza por um excessivo consumo energético, onde os combustíveis fósseis representam cerca de 80% do fornecimento global de energia. Esta dependência predominante no cenário energético mundial acarreta significativas repercussões, tanto ambientais quanto econômicas. Hoje, a humanidade vive o ápice do consumo de combustíveis fósseis, e estimativas mostram que se o uso das reservas permanecer inalterado, tão logo a esgotaremos, e devido a queima incontrolável de combustível, teríamos alterações severas nas condições climáticas.

Neste contexto, tem-se procurado formas alternativas de produção de energia que possa vir a suceder os combustíveis fósseis. O hidrogênio surge como uma alternativa limpa para suprir parte da demanda energética uma vez que compõe 70% da superfície terrestre e pode ser obtido através de diferentes fontes primárias de energia, incluído os combustíveis fósseis, o que resultara em uma maior regularidade na disponibilidade e no custo da energia.

Contudo, o hidrogênio não pode ser apontado como uma fonte de energia primaria, como petróleo ou o gás natural, mas sim como um vetor de energia, ou seja, para obtê-lo é necessário extraí-lo de substâncias onde esteja presente, como composto orgânico e a própria água. Uma das formas de se obter hidrogênio é através da eletrólise da água, processo que consiste na dissociação das moléculas em seus elementos básicos, hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2), com o emprego de eletricidade.

Sendo produzido a partir de fontes livres de carbono, o uso deste vetor energético irá contribuir com a diminuição dos níveis de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa tanto no setor energético, através da conversão em eletricidade através de células de combustível, quanto no setor automotivo, com a utilização deste gás como combustível auxiliar ou único.

1.2. Objetivo

Produção de hidrogênio através da eletrólise da água, para utilização como gás auxiliar na queima do combustível fóssil em motores automotivos afim de avaliar a utilização do

hidrogênio como combustível auxiliar a outros combustíveis, nos quais o acréscimo de hidrogênio em proporções específicas para cada combustível gera aumentos de eficiência, em especial a mistura de hidrogênio e gasolina, e não necessita de grandes alterações no veículo

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna são motores nos quais a queima do combustível ocorre no interior de um espaço confinado, chamado de câmara de combustão, dentro do próprio motor. A reação exotérmica, ou queima, de um combustível com um agente oxigenador gera gases a altas temperaturas e pressão os quais são permitidos de se expandir. A queima, também conhecida como combustão, é o processo químico básico responsável pela liberação de energia através de uma mistura de ar e combustível.

Existem dois tipos de motores de combustão interna que são mais comumente utilizados: Motores de ignição por centelha (ciclo Otto) e motores de ignição por compressão (ciclo Diesel). A maioria destes motores utiliza ciclos de quatro tempos, ou seja, são necessários quatro tempos do pistão para completar o ciclo, que inclui quatro processos distintos: admissão, compressão, combustão e exaustão.

Motores de ignição por centelha e motores de ignição por compressão se diferem basicamente na forma como eles fornecem o combustível para queima e como esta queima acontece. Em motores de combustão por ignição, o combustível é misturado ao ar durante o processo de admissão e a mistura é comprimida. Ao final da fase de compressão, uma centelha causa o princípio do processo de combustão da mistura. A expansão dos gases em combustão empurra o pistão para baixo gerando trabalho. Nos motores de ciclo Diesel, apenas o ar é induzido ao motor e comprimido. Ao fim do processo de compressão, o combustível é lançado no ar comprimido e em alta temperatura o que causa a combustão espontânea do combustível.

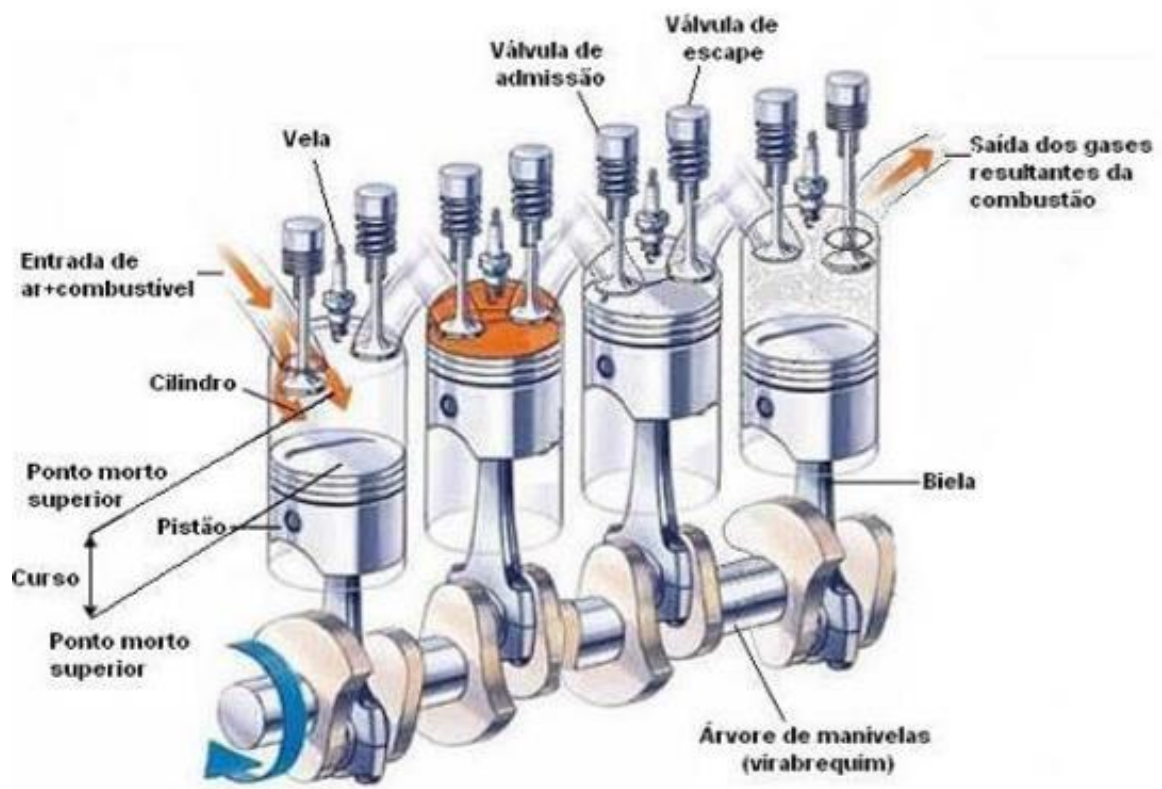


Figura 1 - Estrutura básica de um motor

Fonte: [Uol educação, Física do automóvel, adaptado]

Basicamente, o motor de combustão interna é constituído por peças fixas (bloco, cabeçote e cárter) e móveis (pistão, biela, eixo virabrequim, eixo de comando de válvula e válvulas de admissão e escape), onde as fixas são aquelas que abrigam as peças móveis. A figura 1 mostra parcialmente a configuração interna de um motor de combustão interna.

2.1.1. Partes fixas

As partes fixas podem ser definidas da seguinte maneira;

- Bloco – É nele que são usinados os cilindros ou os furos para acomodação das camisas. Ambos delimitam lateralmente a câmara de combustão, a diferença é que as camisas são intercambiáveis, ou seja, elas podem ser trocadas sem a necessidade de reparo no bloco, diferente de quando o cilindro é usinado diretamente no bloco.

A câmara de combustão é delimitada pelo PMI, que é o ponto mais baixo o qual o pistão alcança dentro do cilindro, e o cabeçote do motor. É dentro desta câmara que o pistão se movimenta e onde ocorre a queima do fluido de trabalho;

- Cabeçote – Pode ser definido como a tampa superior do bloco do motor, é o local onde estão instaladas as válvulas de admissão e de escape, as velas de ignição, os bicos injetores de combustível e eixo de comando de válvulas, que é um eixo dotado de cames que, girando em sincronismo com o eixo virabrequim, comanda o acionamento das válvulas nos tempos corretos de acordo com o processo que esteja acontecendo;

- Carter – É a parte inferior do bloco, ao mesmo tempo em que veda o motor e armazena o óleo lubrificante, também cobre o eixo virabrequim, bomba de óleo e as bielas;

2.1.2. Partes móveis

As partes móveis de um motor de combustão interna podem ser dispostas da seguinte maneira;

- Pistão – É a parte móvel que recebe a força da expansão dos gases provenientes da queima do fluido de trabalho dentro da câmara de combustão. O pistão é o responsável por transferir a força da expansão dos gases para a biela;

- Biela – Braço de conexão entre o pistão e o eixo virabrequim. É o conjunto pistão-biela-virabrequim o responsável por transformar o deslocamento retilíneo do pistão em deslocamento rotativo do virabrequim;

- Virabrequim – Conhecido como ‘eixo motor’, é o responsável por converter a força que movimenta os pistões para cima e para baixo, em uma força que gire as rodas do carro;

- Eixo de comando de válvula – O acionamento deste eixo é executado pelo virabrequim por meio de engrenagens, correntes de comando ou correias dentadas. Este eixo possui ressaltos (cames), que acionam as válvulas, de modo que abram e fechem nos tempos corretos de acordo com o tempo do ciclo;

- Válvulas – São dois os tipos de válvulas; de admissão e de escape. Em teoria, as válvulas possuem o mesmo formato e tamanho, se diferenciando apenas pela função exercida.

As válvulas de admissão são encarregadas de permitir a entrada do fluido de trabalho para dentro do cilindro, enquanto a válvula de escape tem o papel de permitir a saída dos gases provenientes da queima do fluido de trabalho;

2.2. Ciclo Otto

A base deste ciclo foi definida pelo engenheiro francês Alphonse Beau de Rochas, que desenvolveu teoricamente o funcionamento de um motor de quatro tempos que utilizava a compressão dos gases combustíveis no interior de um pistão para aumentar a potência do motor, porém a implementação deste ciclo em um motor real ficou a cargo do alemão Nicholas A. Otto, que desenvolveu um motor estacionário utilizando inicialmente gás como combustível. Além de a máquina ser conhecida como motor Otto, o ciclo termodinâmico utilizado por ele também recebeu o seu nome.

Ciclo Otto é o ciclo termodinâmico que descreve o funcionamento de um motor de combustão interna onde a ignição é feita através do uso de centelha, e o qual demonstra o que acontece com um gás submetido a variações de pressão, temperatura, volume, adição e remoção de calor com o objetivo de gerar trabalho líquido que possa ser aproveitado para mover um eixo qualquer.

O ciclo completo é mostrado nos diagramas p-V e T-s da figura 2, e é composto por quatro processos internamente reversíveis em série;

- 1 – 2 - compressão isentrópica do ar;
- 2 – 3 - transferência de calor para o fluido de trabalho, a volume constante;
- 3 – 4 - expansão isentrópica;
- 4 – 1 - processo de rejeição de calor a volume constante;

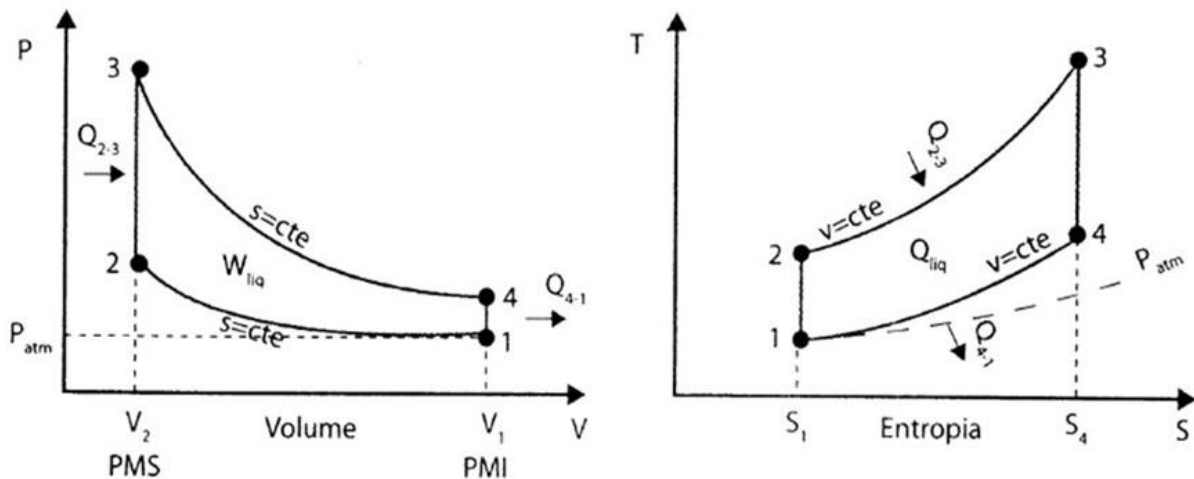


Figura 2 - Diagramas P-V e T-S do ciclo padrão Otto

Fonte: Franco Brunetti; Motores de combustão interna – Volume 1; Blucher, 2012

A área de cada figura pode ser vista como o trabalho líquido obtido ou o calor líquido retido. Analisando o ciclo, podemos afirmar que é constituído de dois processos nos quais há trabalho, mas não há transferência de calor (processos 1–2 e 3–4), e em dois processos nos quais há transferência de calor, mas não existe trabalho (processos 2–3 e 4–1).

Quando aplicados em motores, podemos representar os quatro processos que demonstram o funcionamento do ciclo separadamente:

- 1º tempo – Admissão

Ocorre a abertura da válvula de admissão juntamente ao aumento do volume da câmara de combustão por conta do deslocamento do pistão para baixo. Pode-se considerar a velocidade de avanço do fluido de trabalho igual à velocidade do pistão, de modo que a pressão no interior da câmara permaneça constante conforme o aumento do volume: Processo isobárico (A – B). Conforme figura 3.

Este processo se encerra quando o pistão atinge o PMI (Ponto Morto Inferior) e ocorre o fechamento da válvula de admissão.

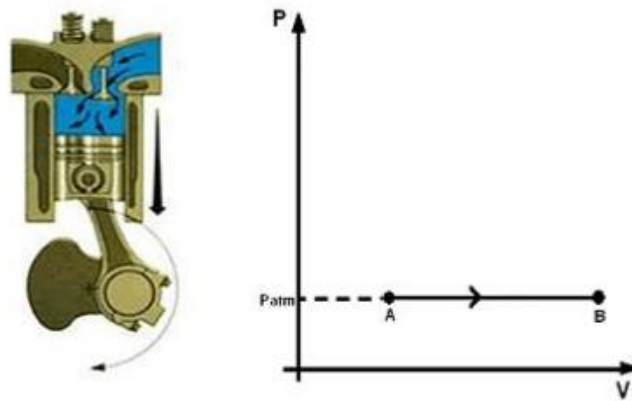


Figura 3 – Admissão, 1º tempo

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, adaptado]

• 2º tempo – Compressão

Com ambas as válvulas fechadas, o trabalho de compressão realizado pelo pistão no fluido é convertido em energia interna, o que se traduz em aumento dos valores de pressão e temperatura no fluido de trabalho, conforme o volume do cilindro diminui (B – C), conforme figura 4. Este processo termina quando o pistão atinge o PMS (Ponto Morto Superior).

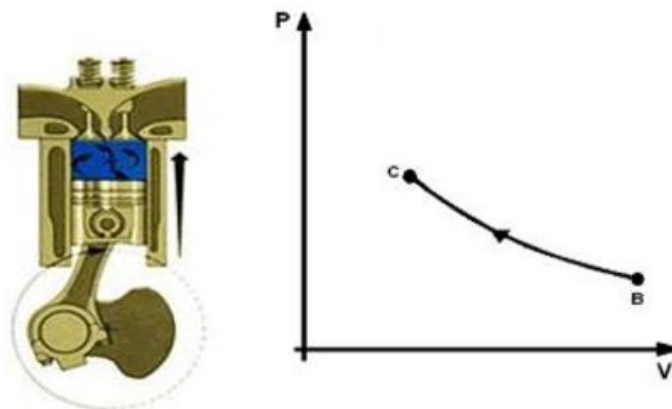


Figura 4 – Compressão, 2º tempo

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, adaptado]

- 3º tempo – Explosão

Este processo fica subdividido em duas fases, na primeira ocorre a queima do combustível a volume constante. Esta queima provoca um aumento de pressão e temperatura no interior do cilindro (C – D), conforme figura 5.

Durante a segunda fase da explosão, ocorre a expansão dos gases provenientes desta queima de forma a gerar trabalho no eixo do motor. (D – E).

Este processo termina com chegada do pistão em PMI e a subsequente abertura da válvula de escape.

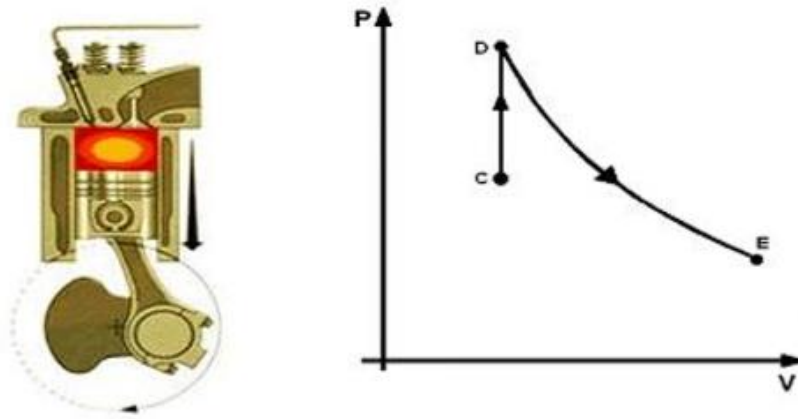


Figura 5 - Explosão, 3º tempo

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, adaptado]

- 4º tempo – Escape

Este processo também pode ser dividido em duas partes, onde a primeira consiste na variação de pressão no interior do cilindro devido a abertura da válvula de escape, porém como o pistão não se move durante esta primeira parte, podemos dizer que ocorre uma descompressão isométrica (E – B), conforme figura 6.

Durante a segunda parte do processo, o pistão inicia o processo de expulsão dos gases resultantes da queima. Nesta parte do processo, o volume do cilindro diminui na mesma proporção em que o volume de gás presente também diminui (B – A).

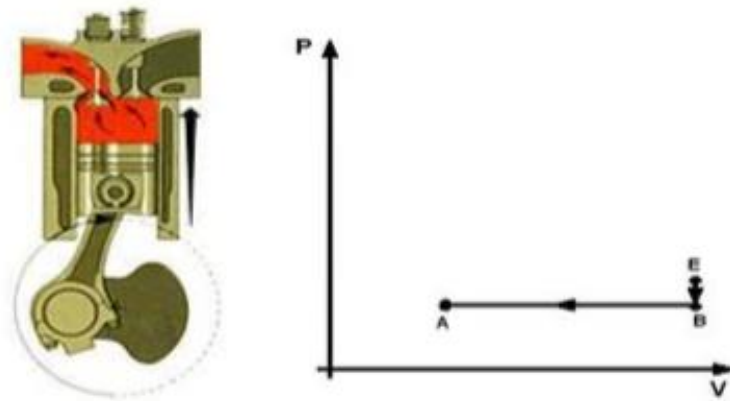


Figura 6 - Escape, 4^o tempo

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, adaptado]

Os processos descritos logo acima são mostrados de forma conjunta no diagrama P-v (figura 2) para o ciclo completo do motor a combustão interna.

2.2.1. Trabalho realizado

O trabalho é somente realizado durante o terceiro tempo do ciclo. Em todos os demais, onde ocorrem os processos de admissão, compressão e escape, o movimento do pistão advém de um trabalho externo causado pela inércia do volante motor ou do conjunto do sistema onde estão acoplados vários pistões ao eixo virabrequim. Uma parte do calor proveniente da combustão é eliminado na forma de energia interna dos gases e outra parte é perdida devido a troca de calor entre o motor e o meio onde se encontra. A parte restante do calor de combustão é relacionado ao trabalho realizado pelo pistão.

A consumação do trabalho e o aumento da energia interna devido à quantidade de calor estão de acordo com a primeira lei da Termodinâmica, ou, princípio de conservação de energia, expressa pela equação abaixo.

$$Q = \Delta U + W \quad [1]$$

2.2.2. Rendimento

O real rendimento de um motor de ciclo Otto está próximo de 21% a 25%, onde toda a energia restante é perdida mecanicamente, através do atrito das superfícies, inércia e energia sonora, e de forma térmica, através da troca de calor entre o motor e o ambiente e da energia interna dos gases da combustão.

O rendimento de uma máquina térmica é definido como a razão entre o trabalho realizado e a energia fornecida, conforme demonstrado na equação [2].

$$n = \frac{W}{Q} \quad [2]$$

Se toda a energia do combustível pudesse ser convertida em trabalho mecânico, o rendimento da máquina térmica seria de 100%, ou 1, situação a qual não ocorre na realidade devido as perdas. De acordo com o engenheiro francês N. L. Sadi Carnot, o motor pode ter um rendimento máximo de aproximadamente 50%, independente do combustível utilizado e desconsiderando questões técnicas. Devido a necessidade de aprimorar o rendimento das máquinas térmicas reais, foi formulado um ciclo ideal, o ciclo de Carnot. O rendimento obtido pela máquina de Carnot é o maior que o de uma máquina térmica qualquer, trabalhando entre os mesmos valores de temperatura da fonte quente e da fonte fria, pode atingir.

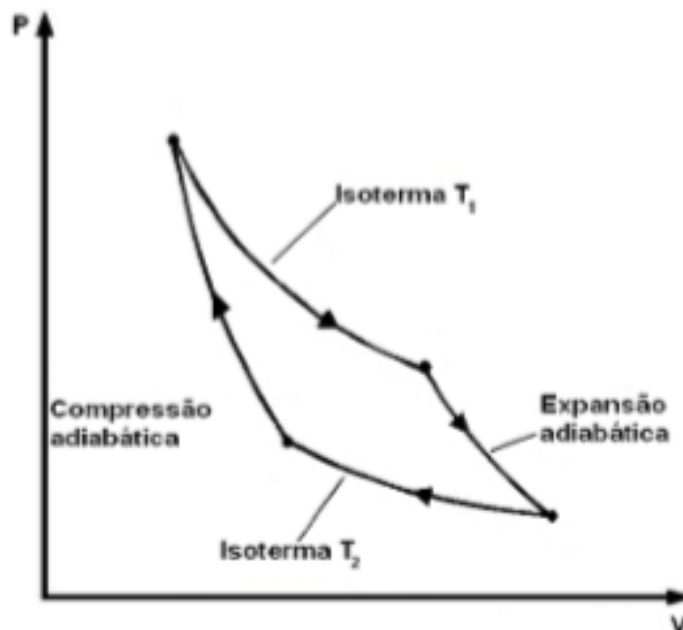


Figura 7 - Ciclo de Carnot

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, adaptado]

Pelos diagramas P-v e T-s da figura 2, podemos notar que a eficiência térmica do ciclo cresce conforme a taxa de compressão aumenta. O aumento na taxa de compressão causa a diminuição do volume dos pontos 2 e 3 e o aumento dos valores de pressão dos mesmos pontos. Uma vez que a temperatura de fornecimento de calor é maior e o processo de rejeição de calor permanece o mesmo, o ciclo obteria uma maior eficiência térmica. Este aumento da eficiência em relação ao aumento da taxa de compressão é demonstrado através da equação abaixo;

$$n = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad [4]$$

Onde “r” é a taxa de compressão definida por;

$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad [5]$$

E “k” é uma constante definida pela relação entre os calores específicos à pressão e à volume constante do fluido de trabalho;

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad [6]$$

Esta relação de aumento da eficiência térmica em função da taxa de compressão é mostrada no gráfico abaixo, para k = 1,4 (Valor de c_p/c_v do ar).

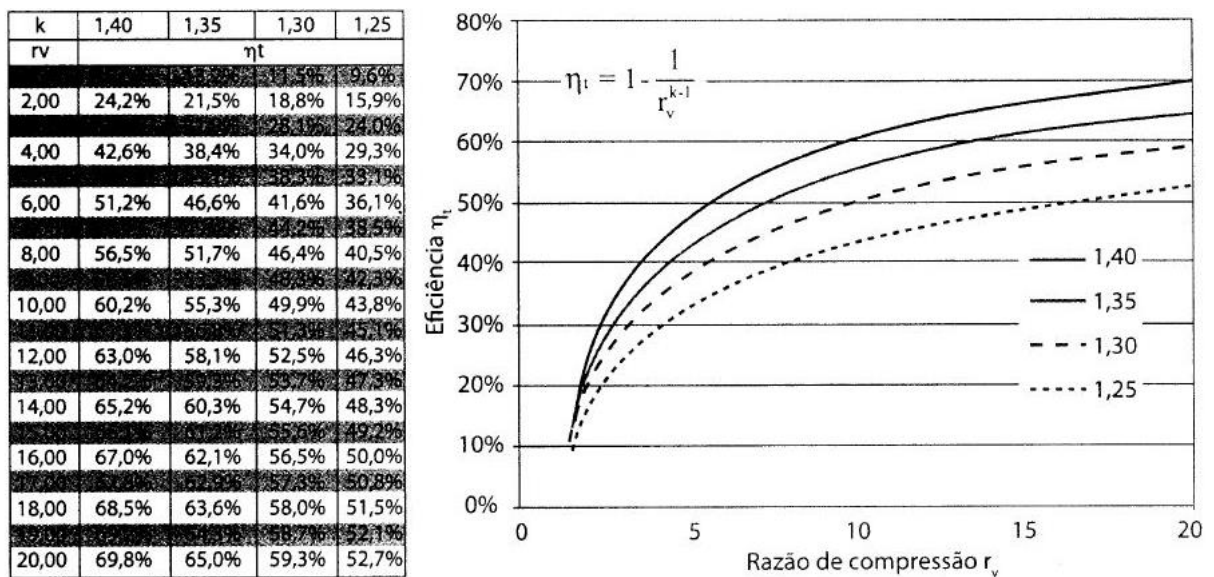


Figura 8 - Variação da eficiência térmica em função da taxa de compressão, para diferentes valores de k

Fonte: [Franco Brunetti; Motores de combustão interna – Volume 1; Blucher, 2012]

Para um mesmo fluido de trabalho (mesmo valor da constante k), a eficiência térmica de um motor depende apenas da taxa de compressão. Esta relação, porém, não é finita, e por isso os motores hoje utilizados não possuem taxas de compressão elevadas. Com o aumento da compressão do fluido de trabalho a possibilidade que ocorra a autoignição, ou, detonação, prematura do combustível também aumenta, o que indica um limite superior para a taxa de compressão utilizada em motores ciclo Otto de acordo com a resistência à autoignição do combustível utilizado, conforme mostrado na tabela 1. A ocorrência de autoignição resulta em ondas de alta pressão no interior do cilindro que pode causar danos ao motor e leva a perda de potência.

Taxa de compressão – ‘r’		
Ciclo Otto		Ciclo Diesel
Etanol hidratado	Gasolina E22	Diesel
10,1: 1 até 14,0: 1	8,5: 1 até 13,0: 1	15,0: 1 até 24,0: 1

Tabela 1 - Taxa de compressão de acordo com o combustível

Fonte: [Motores de combustão interna – Volume 1 – 2012]

2.2.3. Relação estequiométrica

Para que as condições de trabalho dos motores sejam ideais não basta apenas que seja feita a mistura entre ar e combustível, existe a necessidade que seja feita uma boa vaporização deste combustível de forma que ele se associe completamente com o ar.

Deve-se notar que esta relação se altera conforme o combustível utilizado pelo motor, e que cada combustível possui a sua taxa de compressão ideal. A gasolina por exemplo, possui uma relação estequiométrica ideal de aproximadamente 15,0: 1, porém este valor é para a gasolina pura, como a gasolina oferecida no Brasil apresenta 25% de álcool na composição, esta relação estequiométrica cai para aproximadamente 12,5: 1, ou seja, para cada porção de gasolina são necessários 12,5 porções de ar para que ocorra a queima completa da mistura

Essa relação está profundamente relacionada à quantidade de carbono e hidrogênio existente em uma estabelecida quantidade de combustível. Caso a proporção de ar seja menor que a ideal, ocorre a sobra de combustível, o que indica riqueza da mistura. Essa falta de oxigênio, e o subsequente excesso de combustível, geram um excesso no consumo de combustível no veículo e uma maior emissão de gases poluentes, além de prejudicar o funcionamento do motor. Caso ocorra o contrário, excesso de ar em relação a proporção ideal, essa mistura é considerada pobre, não sendo saudável ao motor ou ao meio ambiente. O excesso de ar gera aumento nos níveis de poluentes de óxido de nitrogênio e gera uma perda de desempenho no motor.

Para medir a relação estequiométrica usamos o que conhecemos como fator Lambda - λ , que é o quociente da mistura ar/combustível real pela ideal. O valor ideal desta relação é 1, ou seja, quando a mistura real é igual a mistura ideal. A tabela 2 mostra o tipo de mistura em relação ao fator lambda.

$$\lambda = \frac{\text{mistura real}}{\text{mistura ideal}} \quad [7]$$

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

Tabela 2 - Relação do fator lambda e o tipo de mistura

Fonte: [Motores de combustão interna – Volume 1 – 2012]

2.2.3.1. Limite pobre

É a mistura mais pobre possível em termos de combustível, que possibilita ao motor se manter estável e operando. Obviamente, o limite pobre não é uma situação desejável, afinal a sua apresentação visa apenas demonstrar que os motores Otto possuem um limite inferior e que abaixo dele o motor não será capaz de funcionar. Em condições normais, esse limite de operação existe para misturas com λ entre 0,7 e 0,85

2.2.3.2. Mistura econômica

É uma mistura sutilmente pobre, de maneira que o ar excedente provoque uma queima completa e adequada do combustível. Esta mistura, em condições ideais para o motor, é a que acarreta o menor consumo específico de combustível, o que contribui para a diminuição da emissão de monóxido de carbono.

2.2.3.3. Mistura de máxima potência

Em geral, a mistura é sutilmente rica, de maneira que o excesso de combustível provoque a queima completa do ar admitido pelo motor. Esta mistura, em determinada rotação e posição do acelerador, produz a maior quantidade de potência, em detrimento de um aumento dos níveis de emissões de gases poluentes.

2.2.3.4. Limite rico

Nesta condição o excesso de combustível atrapalha a propagação da chama no interior da câmara de combustão. Este excesso, sem a respectiva combustão devido à falta de ar, causa a diminuição da temperatura da câmara de combustão e, como consequência, a extinção da chama. Quando ultrapassado este limite rico, o motor não mais funcionará, o que popularmente chamamos de “motor afogado”.

2.2.4. Ciclo Otto real

Como em todo ciclo termodinâmico, existe uma diferença entre o ciclo teórico e o ciclo real, o que evidencia o distanciamento entre a teoria e a prática. Quando os ciclos estão associados à máquinas reais eles se diferem sutilmente do idealizado, já que os processos ocorrem de forma aproximada à maneira descrita na teoria e que os motores estão suscetíveis a fenômenos como o atrito e de dissipação de calor.

A figura 9 mostra a superposição de um ciclo Otto teórico com o ciclo real correspondente, ou seja, mesmos valores de volume inicial, taxa de compressão e de calor adicionado ao ciclo.

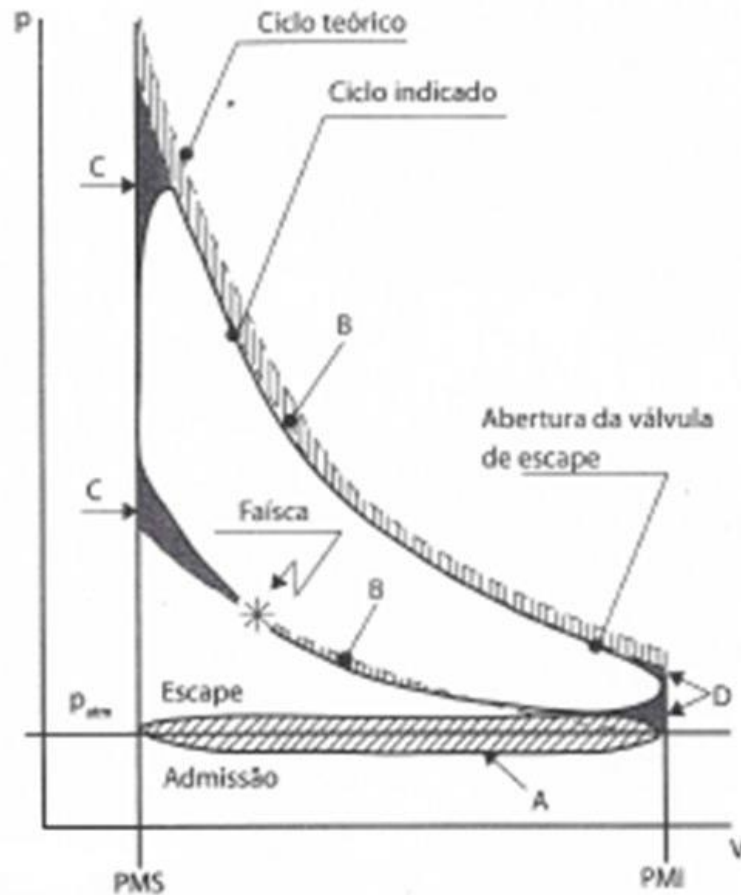


Figura 9 - Superposição de um ciclo Otto teórico com o real

Fonte: [DeMotor, Superposição de um ciclo Otto teórico com o real, traduzido]

Como podemos notar, existe uma diferença substancial, tanto na forma quanto nos valores de pressão e volume. Tais diferenças ocorrem por conta de perdas relacionadas aos seguintes fatores:

- Perdas de calor – Os processos de compressão e expansão são considerados entrópicos no ciclo teórico, enquanto no ciclo real as perdas de calor são perceptíveis. No processo de compressão a diferença entre o ciclo real e teórico não é tão grande, mas durante a expansão, onde a diferença de temperatura entre a

câmara de combustão e o meio é maior, a troca de calor realizada irá causar o afastamento sensível do ciclo real em relação ao teórico;

- Perda por tempo de combustão – No ciclo teórico a combustão é considerada instantânea, o que na prática não ocorre. A combustão consome um determinado tempo para que ocorra completamente, mesmo que este tempo possa parecer insignificante, quando comparado a velocidade com o qual o pistão se move, este deve ser levado em consideração. Por conta desta não instantaneidade na combustão, a faísca que desencadeia o processo deve ocorrer antes que o pistão atinja o seu ponto mais alto, fazendo com que a expansão seja iniciada antes de a combustão alcançar a máxima pressão possível;
- Perda pelo tempo de abertura da válvula de escape – No ciclo teórico, o processo que chamamos de escape foi substituído por uma expansão isocórica, na qual o sistema cede o calor rejeitado para um reservatório frio. No ciclo real, o tempo para saída dos gases resultantes do processo de combustão é finito, por isso, deve-se abrir a válvula de escape com alguma antecedência, para que quando o pistão comece a mover-se de forma a expulsar tais gases a válvula já esteja completamente aberta, o que resulta uma perda de área útil do curso do pistão durante a expansão;
- Admissão e Escape – Estes processos não estão presentes no ciclo teórico, e a área contida entre os dois se traduz em um trabalho negativo utilizado para realizar a troca do fluido de trabalho no cilindro. Esse trabalho é normalmente integrado no trabalho perdido por causa dos atritos e será tanto maior quanto maiores forem as perdas de carga nas tubulações de admissão e escape.

É estimado que o trabalho do ciclo real seja algo em torno de 80% do trabalho realizado no ciclo teórico correspondente. Essa perda pode ser distribuída em; cerca de 60% devidos as perdas de calor; aproximadamente 30% devidos ao menor tempo de combustão e outros 10% devido ao tempo de abrimento da válvula de escape.

2.3. Hidrogênio

O primeiro registro do gás de hidrogênio que se tem notícia, foi obtido pelo cientista Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim, por volta do ano de 1500 onde através de uma mistura de metais e ácidos ele obteve o que chamou de um “ar explosivo”. Esse “ar” nada mais era que o H₂. Henry Cavendish mostrou que o gás hidrogênio se figura pela ação de ácidos como o clorídrico ou o ácido sulfúrico em união com metais como zinco e o ferro. Em experimento, ele fez explodir misturas deste gás em contato com o ar com faíscas elétricas (1784), o que resultou em um produto que parecia “água pura”. Mais tarde Antoine Lavoisier explicou os resultados obtidos por Cavendish, e deu ao gás o nome de “hidrogênio”, originário do grego “que gera água”.

2.3.1. Características

O hidrogênio é o elemento mais abundante na crosta terrestre, compondo aproximadamente 75% da massa do planeta Terra, é também o mais simples e leve da tabela periódica de Mendeleiev, possuindo número atômico e de massa iguais a 1. Em condições de pressão e temperatura ambientes O hidrogênio, quando em condições normais na superfície terrestre, é um gás incolor, inodoro, insípido e atóxico, sendo a mais simples substância encontrada.

Do ponto de vista ambiental, não é poluente e sua utilização como combustível gera apenas água como produto. Apesar de o hidrogênio compor grande parte da massa terrestre ele não é encontrado puro, mas sim, agregado a diversos outros elementos devido ao fato de ser quimicamente ativo, que o faz estar sempre em busca de outro elemento para se combinar.

Quando em sua forma gasosa (H₂), a sua combinação com oxigênio para formação de água (H₂O) libera uma quantidade expressiva de energia. Quando verificada a equação da reação entre estes dois elementos, percebemos que não há geração de nenhuma outra substância além da água, o que faz do hidrogênio um combustível limpo para geração de energia.



No estado líquido, ele ocupa um volume cerca 700 vezes menor do que em forma de gás, porém para atingir o estado líquido, este deve estar a temperaturas abaixo de -253°C quando em pressão atmosférica.

Tendo em vista a segurança, visto que é um gás explosivo, as principais características do elemento são relacionadas a seguir:

- Detonação não acontece ao ar livre;
- Não é tóxico, porém pode causar asfixia se reagido com todo o oxigênio do ambiente;
- Não emite radiação;
- Não causa corrosão;
- Não contamina a água;
- Autoignição não ocorre em temperatura ambiente;
- Difunde rapidamente no ar;
- Não emite produtos de perigosa decomposição;

Na tabela 3 são apresentadas algumas informações técnicas do hidrogênio:

Informações sobre o hidrogênio		
Símbolo Químico	H	
Estado físico a pressão e temperatura ambiente	Gás	
Temperatura de autoignição	584°C	
Poder calorífico superior (HHV do H ₂)	142000 J/g	
Densidade	0,0899 kg/m ³ (gás)	70,79 kg/m ³ (líquido)
Ponto de ebulição	- 252,8 °C (1 atm)	
Coefficiente de difusão	0,61 cm ² /s	

Tabela 3 - Informações técnicas do hidrogênio

Fonte: [Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, NETO, EMILIO H. G.]

2.3.2. O hidrogênio como combustível

Quando utilizado como combustível, a quantidade de energia cedida pela reação do hidrogênio com o oxigênio é medida e quantificada através do que chamamos por poder calorífico inferior (LHV) e poder calorífico superior (HHV). A diferença entre estes dois poderes caloríficos é o “calor de vaporização”. Ele representa a porção necessária de energia para transformar o combustível líquido em combustível gasoso. É a mesma relação da energia necessária para que se converta água em vapor.

Combustível	Poder Calorífico Superior (25°C e 1 ATM)	Poder Calorífico Inferior (25°C e 1 ATM)
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Tabela 4 - Poder calorífico de diferentes combustíveis.

Fonte: [Motores de Combustão Interna – 2ª Edição – 2006]

A quantidade de energia cedida durante a queima do hidrogênio é cerca de 2,5 vezes maior que o poder de queima de um hidrocarboneto comum, como pode ser visto na tabela 4. Ou seja, para satisfazer um determinado consumo energético, a massa de hidrogênio necessária é de aproximadamente um terço da massa de um hidrocarboneto. Logo, para os mesmos valores de massa as explosões do gás hidrogênio são mais agressivas e mais rápidas.

A tabela 5 mostra algumas das mais importantes propriedades do uso de H₂ como combustível em motores de combustão interna, propriedades as quais falaremos em seguida.

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 de chama (m/s)	0,37 a 0,43	0,38	1,85	Boa estabilidade
Número de octano	87 a 99	140	>120	Alta taxa de compressão
Temp. de chama (K)	2580	2214	2480	
Energia mínima de ignição (mJ)	0,24	0,28	0,02	
Temperatura de autoignição (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	45,98	119,7	
Calor de Combustão (mJ/Kg)	2,83	2,9	3,37	

Tabela 5 - Propriedades do hidrogênio como combustível

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

2.3.2.1. Combustão do hidrogênio

A mistura de oxigênio com hidrogênio armazenado sob pressão, tanto no estado líquido quanto no estado gasoso, tem capacidade de queima muito severa. Habitualmente quando há vazamento de hidrogênio em lugares abertos a queima dura frações de segundos, entretanto, se o vazamento acontecer em lugares fechados, a dissipação do hidrogênio é muito deficitária e caso este entre em combustão, pode ocasionar graves acidentes devido a rapidez em que a chama se propaga ser alta, cerca 40cm/s.

Quando ocorre o vazamento de hidrogênio no estado líquido, a sua baixa temperatura pode fazer com que uma estrutura metálica entre em colapso, pois o metal passaria da fase dúctil para a fase frágil muito rapidamente, podendo ocasionar trincas ou fraturas. Em locais fechados, o vazamento de hidrogênio líquido pode ser ainda mais perigoso devido a violenta expansão que sofre o gás por causa da grande variação de temperatura (de -253°C para 25°C), fato que se torna um potencial combustível para alimentar as chamas, caso ocorra sua ignição.

Durante a combustão do hidrogênio ocorre um fenômeno chamado de *flash-fire*, é o evento da combustão em baixa ou na ausência de pressão positiva, e como sugere o nome, é um processo que ocorre em um breve intervalo de tempo até o hidrogênio seja consumido em sua totalidade. A queima durante este processo ocorre em regime laminar, com velocidades variando de 102 a 346 cm/s de acordo com a concentração de hidrogênio presente.

2.3.2.2. Fogo

O fogo é um fenômeno de não explosão que acontece entre misturas de oxigênio e combustível. Neste fenômeno a chama pode ser considerada estacionária, ou seja, com o ar e o combustível se difundindo liminarmente dentro da zona de combustão. Este evento é chamado de difusão, pois o oxigênio presente no ar e o combustível se mesclam por processo de difusão molecular de forma lenta durante a combustão. A chama do fogo tem pouca energia liberada devido a sua baixa velocidade, mas produz a mesma quantidade de energia de um evento de deflagração.

Misturas de ar e hidrogênio queimam de forma que não produzem fumaça e cuja chama é de difícil detecção devido ao alcance de cor ultravioleta, cujo espectro é praticamente invisível a olho nu.

2.3.2.3. Velocidade de combustão

Velocidade de combustão é a velocidade com a qual a chama viaja através da mistura combustível, sendo diferente da velocidade da chama, que é o somatório da velocidade de queima e da velocidade de deslocamento da mistura de gás não queimado. A velocidade de combustão indica a gravidade de uma explosão, uma vez que as altas velocidades de

combustão têm uma tendência maior para suportar a transição da deflagração para a detonação em túneis longos ou tubos, variando de acordo com o acúmulo de gás e tendo menores valores em ambas as extremidades da faixa de inflamabilidade e sendo zero fora dos limites.

A velocidade de queima de hidrogênio varia entre 2,65 e 3,25 m/s sendo de aproximadamente uma ordem de magnitude maior que a do metano ou da gasolina em condições ideais de estequiometria. Assim, os fogos de hidrogênio queimam rapidamente e, como resultado, tendem a ser relativamente de curta duração.

2.3.2.4. *Flash Point*

Somente ocorre a queima dos combustíveis, misturados ao ar, quando estes se encontram em forma de vapor ou em estado gasoso. *Flash Point* é a característica que descreve a facilidade desses combustíveis serem convertidos em vapor. É definido como a mínima temperatura em que o combustível é capaz de produzir vapor para formação da mistura necessária para que ocorra a combustão, ou seja, se o combustível estiver a temperaturas abaixo do seu *flash point*, não será produzido o vapor necessário para a queima. Sempre que a temperatura for maior que seu *flash point*, haverá a presença de vapores.

O *flash point* se diferencia da temperatura de autoignição, a qual é a temperatura onde o combustível incendeia em chamas espontaneamente, e tendo sempre valores abaixo dos valores de ebulição do combustível. Os valores de *flash point* estão listados na tabela 6.

Combustível	Flash Point
Hidrogênio	< - 253°C
Metano	-188°C
Gasolina	-43°C
Metanol	11°C

Tabela 6 - Valores de *flash point*

Fonte: [Hydrogen Properties, College of the Desert]

2.3.2.5. Extensão da flamabilidade

A extensão da flamabilidade do hidrogênio é definida pelo Limite Mínimo de Flamabilidade (Lower Flammability Limit – LFL) e pelo Limite Máximo de Flamabilidade (Upper Flammability Limit – UFL). O LFL de um gás é o menor valor de concentração capaz de suportar uma chama, provocada por uma centelha, que se propague quando este é misturado ao ar. Abaixo deste limite não há combustível suficiente para suportar a combustão, ou seja, a mistura ar/combustível é pobre. Uma consequência deste limite é que, quando armazenado o H₂, seja em forma líquida ou gasosa, não é inflamável devido à ausência de oxigênio no reservatório.

O ponto de UFL de um gás é a máxima concentração capaz de suportar uma chama, também provocada por um processo de ignição, que se auto propague quando mistura ao ar. Acima deste limite não há oxigênio suficiente para manter a combustão, ou seja, a mistura ar/combustível é considerada rica.

Estes limites, mostrados na figura 10, definem as proporções de ar/combustível os quais são propícias para que ocorra a queima quando sob um processo de ignição.

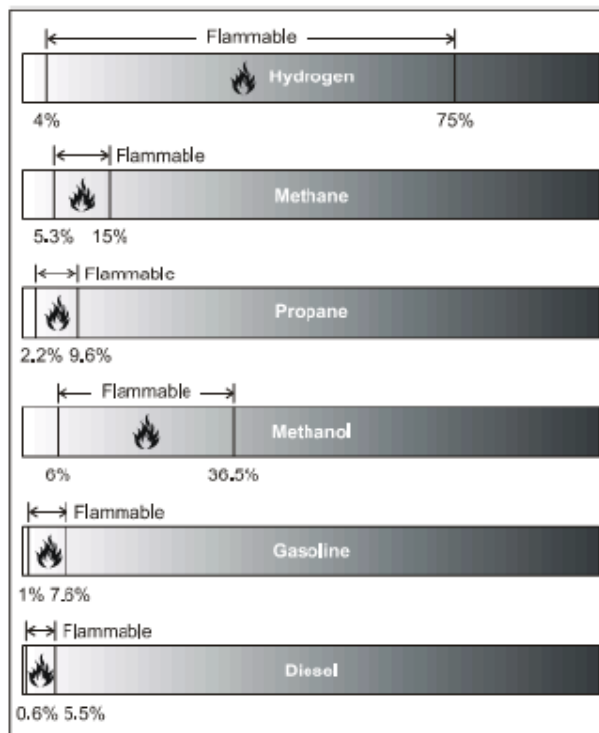


Figura 10 - Extensão da flamabilidade

Fonte: [College of the Desert, Hydrogen Properties]

2.3.2.6. Temperatura de autoignição

É chamada temperatura de autoignição a temperatura na qual a mistura ar/combustível irá iniciar espontaneamente a sua combustão, sendo esta uma temperatura particular para cada combustível, como mostrado na tabela 7.

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

Tabela 7 - Temperatura de autoignição

Fonte: [Hydrogen Properties, College of the Desert

2.3.2.7. Octanagem

Cada combustível possui valor de octano próprio, conforme mostrado na tabela 8. Octanagem é o nome dado a grandeza que representa a capacidade de uma mistura de ar/combustível de suportar à autoignição, responsável pela detonação, um fenômeno relacionado a combustão espontânea e não desejada.

Detonação é uma explosão secundária que acontece depois da ignição do combustível por conta do aumento de calor em algum ponto particular da câmara de combustão, de modo que a temperatura no local ultrapasse a de autoignição do combustível.

O H₂ tem um número alto de octano e, em misturas fracas, tem resistência a auto detonação quando queimado.

Combustível	Número de Octano
Hidrogênio	120 + (Queima Branda)
Metano	125
Propano	105
Gasolina	87
Metanol	30

Tabela 8 - Valores de octanagem

Fonte: [Hydrogen Properties, College of the Desert]

2.3.2.8. Energia de ignição

A quantidade de energia externa a ser empregada para o acendimento de uma mistura de combustível, pode ser denominada como energia de ignição. Uma fonte externa deve ter uma produção de energia superior a temperatura de autoignição e ter duração suficiente para que aqueça o vapor de combustível até que atinja a temperatura correta para ignição. Faísca é o nome dado a uma fonte comum de ignição. O H₂ tem energia de ignição igual a 0,02mJ, entrando em ignição muito facilmente, mesmo que tenha uma elevada temperatura de autoignição se comparado ao metano, propano e gasolina.

2.3.2.9. Distância de extinção das chamas

A distância de extinção de chama avalia a distância, entre as paredes do cilindro do motor, em que as chamas se dissipam devido à perda de calor. A distância de extinção de chama do H₂ é cerca de três vezes menor em relação a outros combustíveis como por exemplo, gasolina e metano, sendo de aproximadamente 0,064 cm.

Assim, as chamas de hidrogênio se aproximam da parede do cilindro antes de serem extintas, tornando-as mais difíceis de resfriar do que as chamas de gasolina. Essa menor distância de resfriamento pode aumentar a tendência da chama de uma mistura de ar e hidrogênio passar mais rapidamente por uma válvula de admissão quase fechada do que a

chama de uma mistura de um combustível fóssil com o ar, não sendo saudável para eficiência do ciclo ou para a vida útil do motor.

2.3.3. Geração de hidrogênio

Existem inúmeros processos físicos e químicos através dos quais se obtém hidrogênio, como podemos ver na tabela 9. Entre esses processos podemos destacar os processos onde o hidrogênio é o produto principal obtido e aqueles onde o hidrogênio é um subproduto, podendo ser aproveitado.

Hoje, a maioria da produção de hidrogênio provém de derivados fósseis como: gás natural, gás de carvão e reforma de petróleo. Com a mentalidade de cada vez mais utilizarmos de fontes renováveis para produção de energia, a eletrólise e a gaseificação da biomassa são algumas das alternativas já existentes para a obtenção de hidrogênio de forma sustentável, entretanto, apenas 5% do total produzido, provém de fontes renováveis.

Fonte de H₂	Energia	Processo
Água	Eletricidade	Eletrólise; Eletrólise do vapor; Fotólise; Decomposição termoquímica; Processo fotoeletroquímico;
Gás Natural	Gás natural	Reforma Catalítica; Craqueamento térmico
Petróleo	Petróleo	Reforma ou gaseificação do petróleo
Carvão	Carvão	Reforma ou Gaseificação do Carvão
Etanol	Etanol	Reforma do Etanol
Metanol	Metanol	Reforma do Metanol
Biomassa	Biomassa	Gaseificação da Biomassa
Biomassa ou Lixo Urbano	Calor	Biológico (biogás)
Bactérias fermentativas	Bactérias fermentativas	Fermentação de compostos orgânicos
Bactérias fotossintetizantes	Energia Solar	Biofotólise
Hidrocarbonetos Pesados	Hidrocarbonetos	Oxidação parcial

Tabela 9 - Principais fontes, processos e tipos de energias utilizadas na obtenção do H₂.

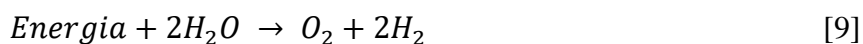
Fonte: [Utilização Avançada da Capacidade Excedente de Sistemas de Transmissão CCAT para produção de Oxigênio e Hidrogênio – 2008]

Este trabalho irá focar particularmente o processo de obtenção de hidrogênio através da eletrólise da água.

2.3.3.1. Eletrólise

A eletrólise da água é um dos mais conhecidos meios de produção de hidrogênio, porém não muito disseminada devido aos altos custos da eletricidade gasta durante a geração, custos que podem representar mais de 50% do valor total.

O processo de eletrólise da água é um processo eletroquímico, que possui como característica principal o acontecimento de reações de oxirredução em uma solução condutora ao se estabelecer uma diferenciação de potencial elétrico entre dois eletrodos submersos nessa solução, em outras palavras, é uma reação de decomposição da água nos elementos que a constituem, oxigênio e hidrogênio, através do uso de eletricidade.



Quando é atravessada uma corrente elétrica pela água, a ligação existente entre os elementos se rompe gerando dois átomos de hidrogênio de carga positiva, e um átomo de oxigênio de carga negativa. As espécies iônicas H^+ e OH^- presentes na água líquida, aumentadas em quantidade por uma solução de um composto químico, ácido ou base (em geral KOH), movem-se para os eletrodos introduzidos na solução quando estes são polarizados (negativamente o catodo e positivamente o anodo), ocorrendo a transferência de cargas entre os íons e os eletrodos, produzindo-se átomos de hidrogênio no catodo e oxigênio no anodo, conforme figura 11.

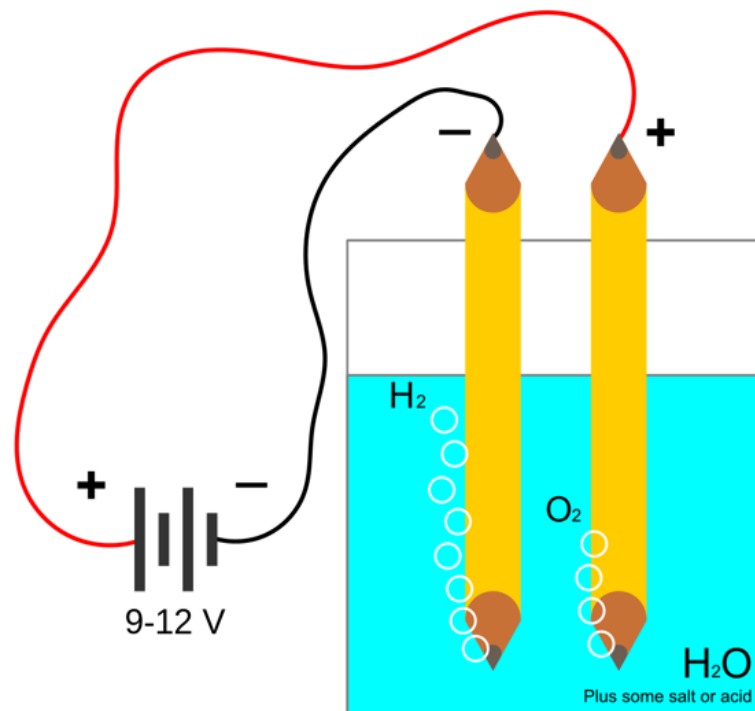


Figura 11 - Geração de hidrogênio por eletrólise

Fonte: [Wikipédia, Eletrólise da água]

2.3.3.1.1. Solução eletrolítica ou eletrólito

Eletrólito é qualquer substância que contenha íons independentes que façam uma substância eletricamente condutiva, se dão por soluções de ácidos, bases ou sais embora alguns gases também possam agir como eletrólitos em condições com elevada temperatura ou pressões baixas.

Soluções eletrolíticas são formadas no momento em que um sal é misturado a um solvente e os elementos individuais se dissociam por causa da interação termodinâmica entre as moléculas de solvente e soluto.

Uma solução pode ser considerada concentrada se um eletrólito possuir alta concentração de íons, ou diluída se a solução possuir baixa concentração. Se uma grande proporção de soluto se separa para formar íons independentes, o eletrólito é forte, se em maior parte, os solutos não se separam, o eletrólito é fraco.

2.3.4. Armazenamento

Em qualquer veículo onde a potência não seja fornecida através de baterias ou por uma conexão externa de energia elétrica, ela é armazenada no próprio veículo em forma de combustível que pode ser gasto e convertido em outros moldes de energia. Pontos importantes como a segurança, o espaço interior necessário para armazenar uma quantidade suficiente de combustível para garantir um bom abastecimento e as condições necessárias para o armazenamento devem ser levados em consideração, pois, toda substância utilizada como combustível depende de um armazenamento apropriado para que atenda todos os pontos salientados.

Relacionado a questão da segurança, o gás hidrogênio sempre foi visto de uma maneira pejorativa por conta de suas propriedades explosivas e difícil armazenamento. Certamente, o hidrogênio é inflável e explosivo no ar, com propriedades comparáveis ou até melhores que os combustíveis fósseis, entretendo, os perigos de se usar este gás como combustível não acarreta perigos maiores que os de usar combustíveis fósseis, apenas perigos diferentes, que requerem cuidados diferentes.

A questão de espaço varia de acordo com o método de armazenamento utilizado, pois cada tipo de armazenamento requer condições específicas, seja para manter o combustível confinado no reservatório ou para extraí-lo.

Atualmente, as tecnologias de armazenamento disponíveis que apresentam maior viabilidade são sob gás comprimido e sob líquida. Existem diversas outras formas de armazenamento em fases de desenvolvimento e teste, as quais podem vir a ser opções no futuro, mas no momento não se tem uma conclusão sobre suas viabilidades e segurança.

2.3.4.1. Hidrogênio gasoso

Esta é a forma mais comum de armazenamento de hidrogênio, amplamente utilizada quando são necessárias pequenas quantidades de gás e a solicitação não é contínua. O hidrogênio é armazenado sob pressão em cilindros ou tanques, os quais podem ser obtidos em diferentes tamanhos e materiais, de acordo com a necessidade de fornecimento, podendo ser utilizada a mesma tecnologia utilizada de armazenamento de gás natural para o hidrogênio.

A pressão de compressão utilizada varia entre 200 e 600 bar, sempre aumentando a densidade do material utilizado na construção do tanque de acordo com o aumento da pressão. Em relação ao custo da compressão para uma pressão de aproximadamente 350 bar, poderá ser imposta uma energia de aproximadamente 5% do total valor energético do hidrogênio a ser comprimido, sendo que estes valores variam de acordo com a capacidade de fluxo da eficiência dos compressores utilizados.

As vantagens de armazenar hidrogênio como gás comprimido são a simplicidade do sistema e a inexistência de perdas de energia com o passar do tempo após a compressão. Entretanto, a deficiência deste sistema se encontra no espaço ocupado pelos cilindros de armazenamento, pois como já foi dito, o hidrogênio em sua forma gasosa ocupa um espaço considerável, além de que, quando se pretende armazenar uma quantidade maior de hidrogênio, deve ser aplicada uma pressão de compressão maior, fazendo com que o cilindro necessite ser mais robusto, o que pode colocar em dúvida a segurança do sistema.

2.3.4.2. Hidrogênio líquido

As tecnologias de armazenamento de hidrogênio são ótimas alternativas, pois desta maneira podemos armazenar maiores quantidades de hidrogênio por unidade de volume, afinal, no estado líquido, ele ocupa um volume 700 vezes menor do que em forma de gás, o que também influencia de maneira positiva o transporte.

A transformação do hidrogênio gás para o estado líquido necessita uma grande quantidade de energia, o que transforma este em um processo caro. Cerca de 40% da energia presente no hidrogênio pode ser perdida, pois para este somente se manter no estado líquido em temperatura abaixo de -253°C . Os sistemas de armazenamento são por isso construídos de maneira que não ocorra a transferência de calor entre o reservatório de hidrogênio e ambiente e se baseiam em sistemas criogênicos que conseguem manter a temperatura necessária.

O hidrogênio líquido requer pequenos espaços para armazenar grandes quantidades de energia, o que torna este sistema ideal para a aplicação em automóveis, pois os tanques são pequenos e leves. Mesmo sendo imensamente mais denso que a forma gasosa, ainda é mais volumoso que a gasolina. Sistemas com as mesmas quantidades de energia podem ser de 4 a 10 vezes mais pesados que reservatórios de gasolina equivalentes.

Existem menos perigos na utilização de sistemas de armazenamento de hidrogênio líquido quando comparado aos de hidrogênio gasoso, isso se deve ao fato de se ocorrer uma fuga de combustível, ele primeiro terá de se aquecer de forma a evaporar, de forma que vai se libertando sobre forma gasosa lentamente para a atmosfera.

2.4. O Hidrogênio em Motores de Combustão Interna

Algumas propriedades do hidrogênio o tornam favorável à utilização como combustível, são elas; baixa energia de ignição; alta temperatura de autoignição; alta velocidade de chama; alta difusidade e baixa densidade. Em comparação com outros combustíveis o hidrogênio tem ampla inflamabilidade, o que possibilita ser queimado no motor ao longo de uma grande gama de misturas de ar-combustível.

A alta difusidade do hidrogênio representa que o mesmo possui grande facilidade em se dispersar no ar, algo que é vantajoso por dois motivos; auxilia na uniformidade da mistura de ar/combustível e se caso ocorra um vazamento de hidrogênio em algum dos sistemas de alimentação, ele irá se dispersar rapidamente, minimizando condições inseguras.

Uma propriedade que atrapalha na combustão é sua baixa densidade, o que resulta em dois problemas principais. Primeiro que é necessário um volume muito grande de H_2 armazenado para que possa dar ao veículo boa autonomia, em segundo, a baixa densidade energética de uma mistura ar/hidrogênio diminui notavelmente a potência na saída do motor.

A baixa energia de combustão do hidrogênio é outra característica importante quando se fala da utilização do hidrogênio em motores de combustão interna. A quantidade de energia necessária para que entre em combustão o hidrogênio é muito menor que a necessária para os demais combustíveis analisados, o que permite uma rápida ignição mesmo de mistura consideradas pobres. Infelizmente, a baixa energia de ignição necessária também pode ser considerada um problema, uma vez que pode servir como fontes de inflamação quando existem pontos quentes no cilindro ou com o aquecimento dos gases, e prevenir esse problema tem sido um dos desafios associados ao funcionamento de um motor movido a hidrogênio.

Quanto a elevada temperatura de autoignição, esta possui implicações relevantes na determinação da taxa de compressão que possa ser utilizada no motor, uma vez que a temperatura atingida ao final da fase de compressão não pode ultrapassar a temperatura de autoignição do combustível para que não ocorra a ignição prematura do mesmo.

Altas temperaturas de autoignição permitem que maiores taxas de compressão sejam aplicadas aos motores que utilizam o hidrogênio como combustível. Este aumento na taxa de compressão está diretamente relacionado ao aumento da eficiência térmica do motor, uma vez que esta se baseia na taxa de calor específico do combustível e na taxa de compressão do motor, conforme mostrado no item 2.2.2.

Devido à simplicidade de sua estrutura molecular, o H_2 possui valor de constante $k=1,4$ (taxa de calor específico vide item 2.2.2.), enquanto a gasolina, com uma estrutura molecular mais complexa, possui $k=1,1$. Esta diferença entre os valores da constante 'k' proporciona ao hidrogênio um melhor rendimento térmico, o que resulta em aumento da eficiência térmica quando adicionado, em proporções ideais a outros combustíveis para formar a mistura ar/combustível.

2.4.1. Hidrogênio quando associado a outros combustíveis

De acordo com estudos realizados por Ceviz (gasolina), Baghdadi (etanol), Savarabab e Nagarajan (diesel) a eficiência térmica de um motor varia de acordo com a adição de hidrogênio às misturas de ar/combustível. Quando é gasolina o combustível utilizado a eficiência aumenta cerca de 4% para uma adição de 2,14% de hidrogênio, de 18% para uma adição de 5,28% de hidrogênio e de 14% para uma adição de 7,74% de hidrogênio à mistura. A melhoria verificada na eficiência é devido à alta inflamabilidade e à velocidade de queima do hidrogênio, que originam uma combustão mais rápida e completa, particularmente em misturas pobres.

As figuras 12 e 13 mostram o aumento da eficiência térmica de acordo com a adição de hidrogênio às misturas de ar/combustível para a gasolina e para o etanol.

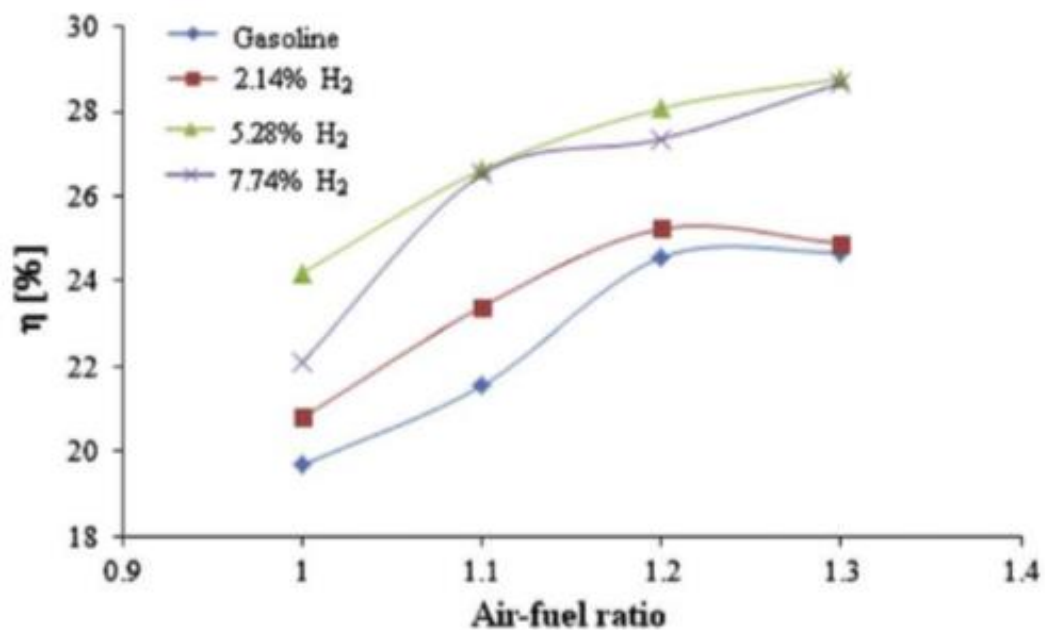


Figura 12 - Variação da eficiência térmica do motor a gasolina para diferentes percentuais de hidrogênio

Fonte: [M. Akif Ceviz, Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variation in a lean-burn SI engine fueled by gasoline-hydrogen blends]

Conforme pode-se notar pelo gráfico da figura 12, quando adicionado acima de 5,28% de hidrogênio à mistura de gasolina ocorre a redução do rendimento térmico, sendo este o limite ideal a ser admitido pela mistura. Quando o combustível utilizado é o etanol, este limite passa para cerca de 8%, onde ocorre o aumento da eficiência em cerca de 4%, como podemos notar na figura 13.

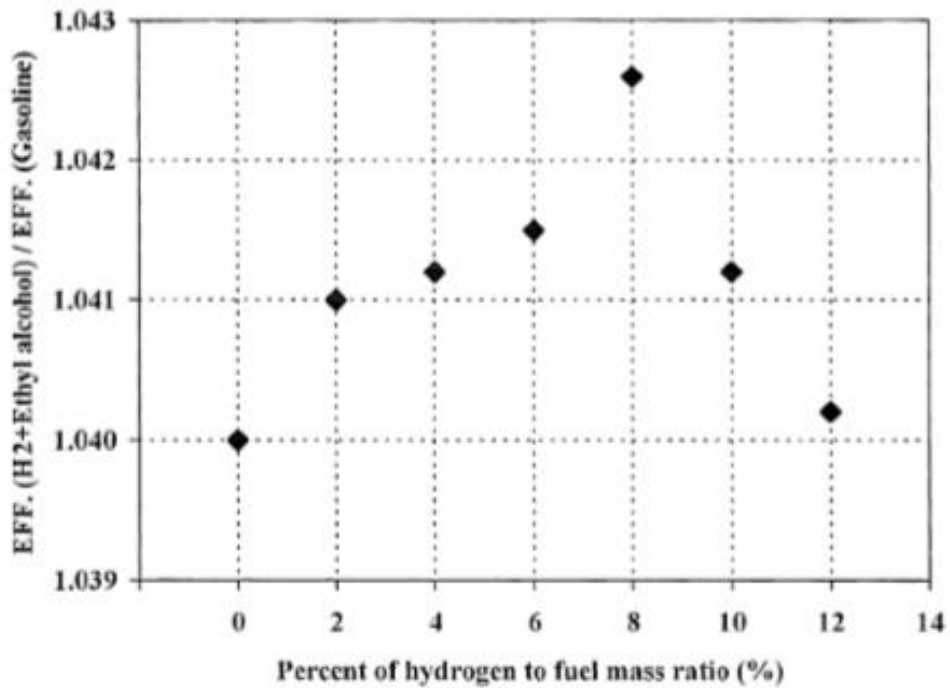


Figura 13 - Efeito da mistura de hidrogênio na eficiência do motor a etanol

Fonte: [Maher Abdul-Resul Sadiq Al-Baghdadi, A study on the hydrogen ethyl alcohol dual fuel spark ignition Engine]

Veículos que utilizam diesel como combustível também podem se beneficiar da adição de hidrogênio a mistura para melhorar a eficiência do motor. De acordo com estudos, o limite ideal a ser adicionado na mistura é de 30%, onde foi obtido um aumento da eficiência térmica de 5,1%

3. METODOLOGIA

3.1. Levantamento das Bases Teóricas

O Hidrogênio é uma fonte renovável de energia e inesgotável devido a sua abundância, compondo 70% do planeta, não gera poluentes quando queimado para geração de energia, e possui propriedades de queima que favorecem a sua utilização como combustível para geração de energia. Possui maior quantidade de energia por unidade de massa que qualquer outro combustível utilizado atualmente. Suporta maiores temperaturas que a gasolina quando comprimido, o que favorece a utilização de taxas de compressão maiores e consequentemente obtendo maiores rendimentos nos motores. Sua queima é rápida e de grande liberação de energia, tendo apenas água e calor como produtos. Esses entre outros fatores como fácil obtenção e baixo valor agregado favorecem a utilização deste elemento químico como uma solução viável para a substituição, mesmo que parcial, dos combustíveis fósseis em motores.

3.2. Estado da Técnica

O sistema de geração de hidrogênio através de células geradoras de hidrogênio por eletrólise foi escolhido devido a sua viabilidade financeira e facilidade de ser adquirido, instalado e manuseado. É um sistema compacto, que não necessita muita energia para gerar hidrogênio ou para mantê-lo e pelo fato de o gás ser consumido na medida em que é produzido, não gera perigo aos ocupantes do veículo. É um sistema simples, de poucos componentes, já utilizado de maneira independente por várias empresas no mundo, porém como todo sistema em desenvolvimento possui suas limitações.

Os sistemas que necessitam de abastecimento exterior, em forma de gás sob pressão e hidrogênio líquido, foram excluídos principalmente devido à ausência de fontes de abastecimento. Quanto ao hidrogênio sob gás pressurizado, um tanque que contenha a mesma quantidade de energia de um tanque de gasolina seria aproximadamente 3000 vezes maior, isso devido à baixa densidade energética do hidrogênio, dessa forma, um tanque para que o veículo rode uma quilometragem relevante já seria de grandes dimensões, o que inviabilizaria o sistema.

Quanto ao sistema de hidrogênio líquido, somente o fato de que para manter o hidrogênio nesta forma seja preciso mantê-lo a temperaturas abaixo de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ já faz com que seja desconsiderado um sistema com essa propriedade dentro de um veículo comum. A alta quantidade de energia demandada para manter a temperatura, o tamanho do sistema criogênico, e o perigo envolvido em manter esse sistema dentro de um carro faz com que não seja viável.

3.3. Modelo de Estudo

Em um primeiro momento serão analisados os níveis de consumo de um veículo operando com misturas de combustíveis hidrogênio/gasolina e hidrogênio/álcool. Para tal análise usaremos os dados do GM – Onix 1.4 Eco LT. Este modelo foi escolhido devido a sua grande aceitação pelo mercado, sendo hoje o veículo mais vendido do país, o que torna fácil a obtenção de dados sobre ele.

Será também analisada teoricamente a quantidade de gases resultantes da queima do hidrogênio junto a outros combustíveis e sua composição. O hidrogênio ao ser queimado gera apenas água como subproduto, dessa maneira, ao ser queimado junto a outro combustível ele reduz os níveis de gases nocivos emitidos pelo veículo.

3.4. Análise dos Parâmetros

Os parâmetros utilizados para o estudo teórico foram retirados de um artigo científico publicado em revista específica. Ele trata a questão da relação ideal de combustível e hidrogênio a ser utilizado para maior eficiência do motor, é ele: “Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variations in a lean-burn SI engine fueled by gasoline–hydrogen blends”, publicado em Abril de 2012 no jornal “Applied Thermal Engineering” pelos cientistas M. Akif Ceviz, Asok K. Sem, Alp K. Küleri e I. Volkan Öner.

Já os dados de consumo do veículo escolhido para análise foram retirados de informações fornecidas pela própria montadora a sites especializados em automóveis.

3.5. Modelo de Análise Econômica

Será analisada neste trabalho a economia proveniente da redução de consumo de combustível do veículo quando utilizado hidrogênio como combustível auxiliar.

Conforme visto na revisão bibliográfica, a adição de hidrogênio ao combustível fóssil gera aumentos significativos nos valores de eficiência do motor qualquer que seja o combustível utilizado, o que reflete diretamente em um menor consumo de combustível. Como o hidrogênio é proveniente de uma reação eletroquímica da água ele não gera custos para aquisição, e pelo fato de o processo ser realizado dentro do veículo, a energia elétrica necessária para que ocorra tal reação é proveniente do próprio funcionamento do motor.

3.6. Orçamento Preliminar de Investimento

O valor de investimento se resume basicamente no valor do kit e na mão de obra para instalação, uma vez que o kit vem com todos os itens necessários para a instalação, desde mangueiras a conectores e parafusos.

Os kits de geração de hidrogênio possuem valores entre R\$200,00 e R\$3.000,00, sendo os mais caros, logicamente, os mais avançados e que possuem maiores rendimentos, possibilitando também ao motor maiores rendimentos. Em nenhum lugar foram encontrados valores de instalação, uma vez que todos os fabricantes pesquisados incentivam que o consumidor faça esta instalação em casa, por ser um processo relativamente fácil, que não necessita de ferramentas específicas. Entretanto, levando em conta o tempo necessário para a instalação de acordo com o fabricante e o valor médio cobrado pela mão de obra de um mecânico por hora pode-se tirar uma média de quanto custaria tal instalação.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Kit Automotivo de Geração de Hidrogênio por Eletrólise

O hidrogênio para ser utilizado como combustível ele pode tanto ser fornecido por uma fonte externa ao veículo e armazenado de diferentes maneiras (item 2.3.4.) como pode ser produzido dentro do veículo e injetado diretamente no motor, sendo esta a forma que iremos analisar neste trabalho. Para que seja produzido dentro do veículo são necessários equipamentos capazes de gerar o gás de hidrogênio de forma suficiente a suprir a demanda por combustível do motor. Estes equipamentos compõem o que chamamos de Kit de geração de H_2 .

Existem diversos kits de geração disponíveis na internet, de diversos fabricantes. O escolhido por nós é da marca HydroclubUSA, possuindo capacidade de geração de 2.5 litros de gás por minuto. Tanto este como outros kits disponíveis na internet, não produzem exclusivamente H_2 , eles produzem o que chamamos de HHO, que é uma mistura dos gases hidrogênio e oxigênio. Isso ocorre devido a estes kits não conseguirem fazer a separação dos gases quando gerados através da eletrólise. Existem meios de realizar esta separação com pequenas alterações nos kits, como por exemplo a instalação de um filtro de nylon entre as placas. Devido a esta incapacidade de separação dos gases pelos kits encontrados, para fins de estudo iremos adotar que toda a capacidade de geração da célula será traduzida em produção de H_2

O kit de geração de hidrogênio, conforme mostrado na figura 14, é composto basicamente por uma célula geradora de hidrogênio, reservatório de água ou borbulhador, chip de controle eletrônico, amperímetro e as tubulações necessárias para circulação do gás.



Figura 14 - Kit de geração de hidrogênio da HydroclubUSA

Fonte: [Manual de instalação do fabricante HydroclubUSA]

4.1.1. Célula geradora

É um mecanismo eletroquímico que por meio da eletrólise de uma solução eletrolítica, água e hidróxido de potássio, converte os elementos presentes, H_2 e O_2 , em gás. O gás produzido é encaminhado por mangueiras para a admissão de ar do motor, onde será combusto na câmara de combustão, e substituirá em parte o combustível fóssil, de modo a auxiliar a queima da mistura.

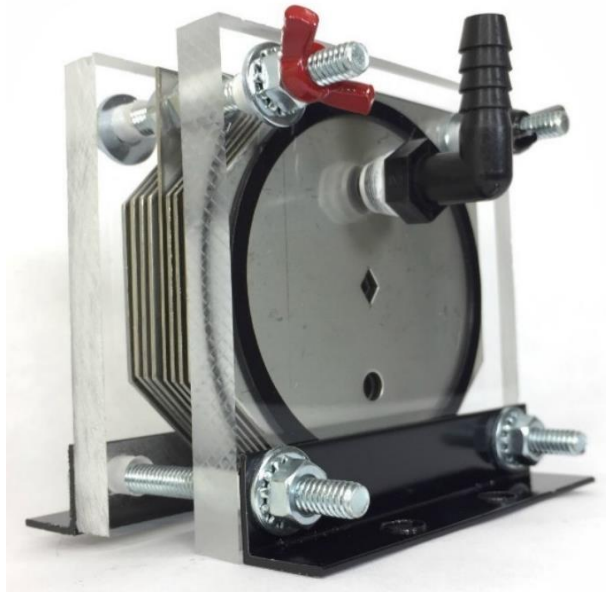


Figura 15 - Célula de geração de H₂

Fonte: [Manual de instalação do fabricante HydroclubUSA]

A célula, mostrada na figura 15, é composta por 09 placas de inox 316 separadas por anéis de borracha que fazem a vedação do sistema para que não ocorra vazamento, seja de água ou de gás, montados entre placas de acrílico. A montagem é feita conforme figura 16.

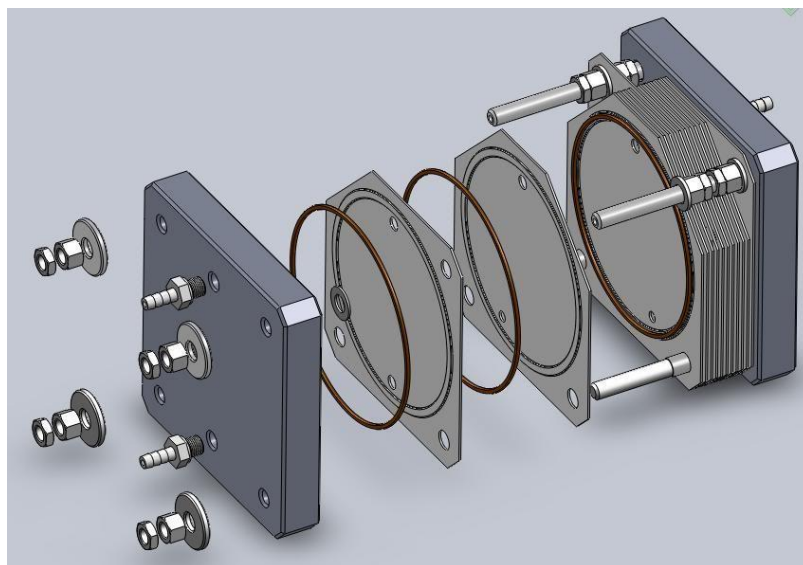


Figura 16 - Esquema de montagem da célula

Fonte: [Manual de instalação do fabricante HydroclubUSA]

Conforme mencionando anteriormente, a célula não faz a separação do gás hidrogênio do gás oxigênio, por isso é necessária a adaptação de um filtro entre as placas para que não ocorra a mistura dos gases. Entre cada placa existe uma borracha de vedação, a alteração se daria na instalação de um filtro de nylon após a borracha e instalação de outra borracha após o filtro, antes da próxima placa. Este filtro faria com que o gás de hidrogênio ficasse de um lado e o oxigênio do outro. Para a saída desses gases separados seria necessária a abertura de outro caminho, de modo que o oxigênio presente de um lado do filtro sairia por um canal e o hidrogênio do outro lado sairia por outro canal. Esta separação é possível pois o gás hidrogênio é atraído pelo polo negativo da célula, enquanto o gás oxigênio é atraído pelo polo positivo.

4.1.2. Borbulhador

O borbulhador, mostrado na figura 17, tem a função de armazenar a solução eletrolítica, para consumo do gerador, e reter o gás H_2 proveniente da eletrólise para ser direcionado ao motor do veículo



Figura 17 - Reservatório de água ou borbulhador

Fonte: [Manual de instalação do fabricante HydroclubUSA]

4.1.3. Amperímetro

O amperímetro, mostrado na figura 18, é uma ferramenta usada para medição do fluxo da corrente elétrica em direção a célula geradora de hidrogênio e tem a função orientar visualmente o condutor para que possa corrigir o eletrólito caso a corrente esteja fora dos limites do equipamento.

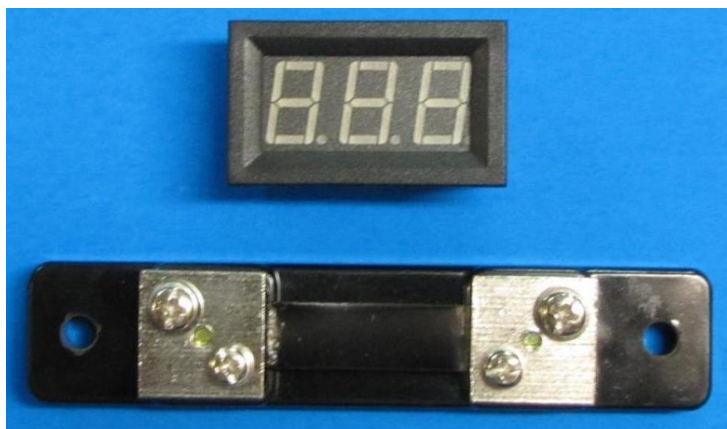


Figura 18 - Amperímetro digital

Fonte: [Manual de instalação do fabricante HydroclubUSA]

4.1.4. Chip eletrônico

Utilizando H₂ como um aditivo do combustível, o chip eletrônico, mostrado na figura 19, regula o fornecimento de combustível de modo a melhorar a eficiência do motor. O chip de controle eletrônico é um microcontrolador de 20MHz, personalizado e específico do veículo. Ele utiliza sua entrada / saída serial de alta velocidade para se comunicar diretamente com a ECU (Eletronic Central Unit) fazendo os ajustes necessários na injeção. É um chip dinâmico, o que significa que ele considerará os níveis de oxigênio no escapamento, juntamente com a velocidade e carga do motor, temperatura e volume do ar de entrada e outras variáveis para determinar a taxa de distribuição de combustível mais eficiente a ser utilizada.

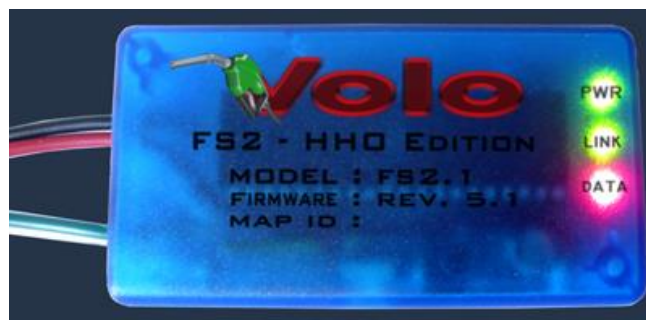


Figura 19 - Chip Volo Performance FS2

Fonte: [Volo Performance]

4.1.5. Funcionamento

O funcionamento do kit no veículo é detalhado na figura 20, o qual mostra o caminho percorrido pelo fluido do reservatório, à sua transformação em gás e a injeção no motor.



Figura 20 - Caminho percorrido pelo H₂

Fonte: [Fábio Leandro Wollmann, Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores]

A altura do borbulhador em relação ao gerador de H₂ deve ser de no mínimo a 12” (304,8mm) de altura, através da gravidade o eletrólito se deslocará até o gerador. As setas pretas demonstram a tubulação de borracha ¾” (19,05mm), e a orientação de circulação da solução. Chegando no gerador à solução aquosa aceita o processo de eletrólise, escapando em forma de bolhas de H₂ e O₂.

A mistura de eletrólito e bolhas sobe mais uma vez para o reservatório inicial se separando totalmente, neste momento o gás vai para o filtro, que irá bloquear qualquer quantidade de eletrólito que possivelmente chegue até esta zona. Do filtro o H₂ é deslocado para a aspiração de ar, sendo a sucção do motor a encarregada da movimentação interna do gás no sistema.

4.1.6. Produção de H₂

Como dito anteriormente, este kit possui a capacidade de produção de 2,5 litro de HHO por minuto, porém, como já acordado, para fins de estudo iremos considerar que toda a produção seja convertida em somente H₂.

As porcentagens de adição de H₂ informadas no item 2.4.1. estão em valores referentes a massa, desta maneira é preciso converter a produção de H₂ de litros para quilogramas. Utilizando a densidade do gás, informada na tabela 3, de 0,0899 kg/m³ e conversões de litros para m³ e horas para minutos, alcançamos o valor da produção de H₂ em kg/min conforme demonstrado abaixo.

$$1 \text{ m}^3 \rightarrow 0,0899 \text{ kg} \quad [10]$$

$$2,5 \text{ L/ min} \rightarrow 0,0025 \text{ m}^3/\text{min} \quad [11]$$

$$0,0025 \text{ m}^3/\text{min} \rightarrow 0,00022475 \text{ kg/min} \quad [12]$$

A capacidade de produção da célula é de 0,22475 gramas de hidrogênio por minuto.

4.2. Análise de Consumo de Combustível

O veículo escolhido para análise foi o GM – Onix 1.4 Eco LT. Este possui uma média de consumo de gasolina de 13,7 km/l, considerando um trajeto misto, entre ciclo urbano, onde o consumo é de 12,5 km/l, e ciclo rodoviário, onde o consumo é de 14,9 km/l. Quando abastecido com etanol, a média de consumo em trajeto misto é de 9,4km/l, onde o consumo em ciclo urbano é de 8.6 km/l e em ciclo rodoviário de 10,2 km/l [Carros BR; Tabela de consumo Chevrolet Onix].

Para fins de estudo, iremos considerar o veículo rodando a uma velocidade constante de 100 km/h quando o consumo neste instante será igual ao consumo médio de um trajeto misto.

4.2.1. Etanol

Quando abastecido com etanol, conforme estudo feito por Baghdadi, quando adicionado 8% em massa de hidrogênio ao etanol, o motor aumenta em 4% sua eficiência, desta maneira o consumo médio que antes era de 9,4 km/l, passaria a ser de 9,776 km/l, conforme tabela 10.

Relação de consumo - Etanol	
Desempenho com Etanol	9,4 km/l
Percentual de aumento de desempenho quando adicionado 8% de H ₂	4 %
Desempenho com Etanol + Hidrogênio	9,776 km/l

Tabela 10 - Efeito da adição do H₂ no consumo de etanol

Fonte: [Autor]

Conforme estudo feito pela Folha de São Paulo, um brasileiro roda em média 20mil quilômetros de carro por ano. De acordo com esse dado, quando utilizado hidrogênio

misturado ao etanol combustível, para rodar esta mesma quilometragem se gastaria 121,83 litros a menos de combustível, conforme tabela 11.

	Km/Ano	Litros gastos
Etanol	20.000	2.167,66
Etanol + Hidrogênio	20.000	2.045,83
Economia de combustível em 01 ano		121,83 L

Tabela 11 - Comparação de litros de etanol gastos por ano

Fonte: [Autor]

Conforme estabelecido no item 4.2 onde um veículo rodando a 100 km/h possui consumo igual ao consumo médio de um trajeto misto, podemos dizer que o veículo neste instante possui consumo específico de 0.177 l/min de combustível. Através da densidade do etanol combustível, de 0.809kg/l, encontramos o consumo médio específico de 0.143 kg/min. A massa de hidrogênio necessária para que se obtenha os 4% de rendimento pode ser calculada de acordo com o consumo médio específico de etanol, sendo igual a 8% do total e mostrada na tabela 12.

Consumo de H ₂ em relação à etanol	
Consumo de Etanol	0,177 l/min
Densidade do Etanol	0,809 kg/
Consumo específico de Etanol	0,143 kg/min
Porcentagem de hidrogênio em relação ao total	8%
Consumo específico de Hidrogênio	0,0114 kg/min

Tabela 12 - Consumo específico de H₂ - etanol

Fonte: [Autor]

A produção de hidrogênio por uma única célula geradora, conforme tabela 11, não será então suficiente para suprir a necessidade do veículo nestas condições. Para que seja mantida a relação de hidrogênio e etanol, seriam necessárias 51 células, conforme tabela 13.

Número de células necessárias	
Produção de uma única célula	0,000225 kg/min
Massa necessária para suprir demanda	0,0114 kg/min
Quantidade de células necessárias	50,666

Tabela 13 - Quantidade de células para atender demanda - etanol

Fonte: [Autor]

4.2.2. Gasolina

As análises de hidrogênio quando misturado com gasolina são baseadas no estudo de Ceviz, que através de seus estudos, relatou que quando se adiciona 5,28% de massa de hidrogênio à gasolina existe um aumento de 18% no rendimento do motor. O veículo analisado, quando abastecido com gasolina, possui consumo médio em trajeto misto de 13,7 km/l. Quando adicionada a proporção ideal dita por Ceviz, o consumo de combustível passa para 16,166 km/l, conforme tabela 14.

Relação de consumo - Gasolina	
Desempenho com Gasolina	13,7 km/l
Percentual de aumento de desempenho quando adicionado 5,28% de H ₂	18 %
Desempenho com Gasolina + Hidrogênio	16,166 km/l

Tabela 14 - Efeito da adição do H₂ no consumo de gasolina

Fonte: [Autor]

Utilizando o mesmo estudo da Folha de São Paulo, que diz que o brasileiro roda em média 20.000km/ano, podemos dizer que quando adicionado hidrogênio em sua devida proporção o veículo irá rodar a mesma quilometra com 222,69 litros a menos de combustível, conforme mostrado na tabela 15.

	Km/Ano	Litros gastos
Gasolina	20.000	1.459,85
Gasolina + Hidrogênio	20.000	1.237,16
Economia de combustível em 01 ano		222,69 L

Tabela 15 - Comparação de litros de gasolina gastos por ano

Fonte: [Autor]

Através dos parâmetros estabelecidos no item 4.2, o veículo quando rodando nestas condições consome 0,122 l/min. Através da densidade da gasolina de 0.735 kg/l, encontramos o consumo médio específico de 0.0897 kg/min. A massa de hidrogênio necessária para que se obtenham os 18% de rendimento pode ser calculada de acordo com o consumo médio específico de gasolina, sendo igual a 5,28% do total e é mostrada na tabela 16.

Consumo de H ₂ em relação à gasolina	
Consumo de Gasolina	0,122 l/min
Densidade do Gasolina	0,735 kg/l
Consumo específico de gasolina	0,0897 kg/min
Porcentagem de hidrogênio em relação ao total	5,28%
Consumo específico de Hidrogênio	0,00466 kg/min

Tabela 16 - Consumo específico de H₂ - gasolina

Fonte: [Autor]

Assim como quando utilizado etanol como combustível base, a célula não é capaz de produzir a quantidade de hidrogênio necessária para manter a relação ideal de 5,23% de massa em relação á gasolina. Para que seja mantida tal relação seriam necessárias 21 células geradoras, como mostrado na tabela 17.

Número de células necessárias	
Produção de uma única célula	0,000225 kg/min
Massa necessária para suprir demanda	0,00466 kg/min
Quantidade de células necessárias	20,711

Tabela 17 - Quantidade de células para atender demanda - gasolina

Fonte: [Autor]

5. ANÁLISE DE GANHOS ECONÔMICOS (maio/2018)

5.1. Investimento Inicial

O valor do kit completo no site da fabricante é de \$277,65, porém como foi calculado no item 4.2.1, quando utilizado o hidrogênio misturado com etanol são necessárias 51 células para atender a demanda, e conforme calculado no item 4.2.2., quando utilizado misturado com gasolina são necessárias 21 células. Cada célula avulsa tem o valor de \$30,98. Utilizando o dólar como sendo R\$4,00 para fins de estudo e simplificação dos valores (cotação média maio/2018 - R\$ 3,634), o valor do kit com as células adicionais, em reais, é de R\$6.306,60 para quando misturado com etanol, e de R\$3.589,00 para quando misturado com gasolina. Estes valores não consideram possíveis taxas de importação.

Quanto à instalação, não existe um valor determinado de quanto possa vir a custar tal serviço, o que pode ser feito é uma aproximação deste valor com base na hora cobrada pela mão de obra. O manual de instalação do kit incentiva a instalação caseira do sistema, o que pode levar cerca de 4 horas. A hora de mão de obra qualificada em uma oficina mecânica custa em média R\$50,00, com isso chegaríamos ao valor de R\$200,00 para instalação do sistema, considerando que não seja necessária a compra de nenhum material. Este valor seria referente ao kit único, como são necessárias células adicionais, podemos considerar um acréscimo de 2 horas ao processo de instalação. O valor total de investimento é mostrado na tabela 18.

	Etanol	Gasolina
Kit de geração de H ₂	R\$1.110,60	R\$1.110,60
Células de geração avulsas	R\$5.196,00	R\$2.478,40
Instalação	R\$300,00	R\$300,00
Total de investimento	R\$6.606,60	R\$3.889,00

Tabela 18 - Investimento para instalação do kit de geração de hidrogênio.

Fonte: [Autor]

5.2. Economia de Combustível

O aumento de eficiência do motor reflete diretamente na economia de combustível, o qual vem sofrendo aumentos diários dos valores. Hoje, o valor médio da gasolina (maio/2018) no Brasil é de R\$ 4,284 enquanto o valor médio do etanol é de R\$ 2,802. Com as quantidades de combustível economizadas em 1 ano, demonstradas na tabela 12, para etanol, e na tabela 16, para gasolina, chegamos aos valores de economia financeira para cada combustível mostrados na tabela 19.

	Etanol	Gasolina
Economia de combustível em 01 ano	121,83 litros	222,69 litros
Valor do litro	R\$ 2,802	R\$ 4,284
Valor economizado em 01 ano	R\$ 253,65	R\$ 954,00

Tabela 19 - Economia financeira

Fonte: [Autor]

5.3. Retorno Econômico

Levando em consideração apenas os valores gastos com aquisição e instalação do sistema e os valores de economia de combustível chegamos aos valores de retorno do investimento. Quando analisada a mistura de hidrogênio com etanol, o sistema leva aproximadamente 26 anos para se pagar. Quando analisado a mistura com gasolina, o sistema leva aproximadamente 4 anos para se pagar.

Essa grande diferença se baseia em alguns fatores, primeiramente nos níveis de rendimento de cada motor de acordo com o combustível e segundo nos valores dos combustíveis. Quando utilizado etanol como combustível base, é necessário um acréscimo maior de hidrogênio, 8%, para que se tenha um menor rendimento, 4%, o que reflete em um menor aumento da autonomia. Como é necessária uma quantidade maior de hidrogênio o valor necessário para aquisição dos componentes também se torna maior. Aliado ao menor

valor do combustível, o aumento da autonomia não gera uma economia financeira tão atraente.

Quanto à gasolina, quando utilizada como combustível base os fatores todos se invertem. A gasolina possui maior valor de mercado, necessita uma menor porção de hidrogênio, de 5.28%, para gerar maior eficiência, 18%, e conseqüentemente o valor do equipamento necessário é mais em conta. A soma destes fatores torna a utilização da gasolina como combustível base mais atraente, como pode ser visto na tabela 20.

	Etanol	Gasolina
Total de investimento	R\$6.606,60	R\$3.889,00
Valor economizado em 01 ano	R\$ 253,65	R\$ 954,00
Tempo necessário para que obtenha retorno	26,05 anos	4,08 anos

Tabela 20 - Tempo de retorno do investimento

Fonte: [Autor]

6. CONCLUSÃO

O estudo realizado para elaboração deste trabalho evidenciou a necessidade de busca por combustíveis alternativos, tanto para suprimento de necessidades futuras devido à escassez do petróleo quanto para amenização dos níveis de emissão de poluentes.

A utilização teórica de hidrogênio como combustível alternativo é extremamente viável devido a suas propriedades como combustível como, por exemplo, o elevado poder calorífico, entretanto, as mesmas características que o qualificam como um ótimo combustível também dificultam a sua aplicação nos motores como conhecemos hoje. Para que fosse utilizado como combustível único seriam necessárias complexas alterações na estrutura básica dos motores, o que provavelmente levaria a total descontinuação dos motores veiculares utilizado atualmente.

A produção de hidrogênio e o armazenamento do mesmo são outras questões que dificultam a sua utilização, uma vez que os gastos com estas questões muitas vezes superam a capacidade energética da queima do H_2 . Neste trabalho analisamos a produção de hidrogênio por meio de células geradoras de hidrogênio através da eletrólise da água, processo que pode ocorrer dentro do veículo e não necessita armazenamento da produção, uma vez que todo o gás produzido é queimado instantaneamente no motor.

O sistema escolhido, entretanto, possui limitações quanto a capacidade de geração de gás de H_2 , a começar pelo fato de a célula geradora ser incapaz de realizar a separação dos gases de H_2 e O_2 sem que sejam feitas alterações na estrutura, gerando então o gás que chamamos de HHO. Para fins de estudo, consideramos que toda a produção da célula seja de apenas gás hidrogênio, pois com a adição de O_2 iriam alterar as relações de maneiras imprevisíveis, pois não temos controle sobre a quantidade produzida de cada gás. Mesmo considerando que a célula fosse capaz de gerar apenas H_2 , apenas uma não seria capaz de suprir o necessário para que se mantenham as proporções ideais de H_2 nos combustíveis de modo que se obtenham as maiores eficiências, sendo necessária a adição de células extras.

Analisando apenas financeiramente, o acréscimo de células avulsas ao sistema faz com que o investimento total aumente em até 4x, tornando inviável a utilização do sistema devido ao longo tempo necessário para retorno do investimento. Analisando fatores técnicos, no caso da utilização da mistura de hidrogênio e etanol, são necessárias 50 células extras para manter a relação ideal de combustível, o que tomaria o espaço total do porta malas, sem levar

em conta necessidade de baterias extras para atender a demanda energética deste alto volume de células.

Os resultados verificados neste trabalho mostram o quanto são fraudulentos os kits ofertados na internet, que prometem aumentos de rendimento na faixa de 60% utilizando apenas uma célula, enquanto o maior rendimento obtido com a utilização de hidrogênio misturado à gasolina foi de 18% e para atingir esta relação são necessárias 21 células.

Hoje a utilização destes kits para aumento da eficiência é inviável, mas não quer dizer que em um futuro próximo não poderemos ter veículos movidos a hidrogênio em grandes números rodando pelas ruas, o que é preciso é uma evolução tecnológica destes sistemas de modo a aumentar a capacidade de produção.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Paulo Penido Filho; Os motores a combustão interna – Lemi, 1983
2. Franco Brunetti; Motores de combustão interna – Volume 1; Blucher, 2012
3. Michael J. Moran & Howard N. Shapiro; Princípios de termodinâmica para engenharia – 4ª edição; LTC, 2002
4. Fábio Leandro Wollmann; Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores – 2013; Disponível em: <http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1877/TCC%20-%20VERSAO_FINAL.pdf?sequence=1>
5. Tânia Esmeralda Rodrigues Estêvão; O Hidrogênio como combustível – 2008; Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>>
6. Lorena de Melo Pinheiro Cardoso; Fontes Renováveis: o hidrogênio como uma possibilidade energética – 2009; Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAsLkAL/hidrogenio-como-combustivel>>
7. Vahid sharifi, Nader Nabhani; Investigation on the application of using hydrogen fuel for furnaces – 2012; Disponível em: <<http://www.ipcbee.com/vol32/016-ICESE2012-D043.pdf>>

8. Tiago Leonel Almeida Soares; Sistemas de produção de electricidade descentralizada baseados em energia renovável – 2009; Disponível em: <https://web.fe.up.pt/~ee02227/index_ficheiros/Dissertacao.pdf>

9. Vanessa Rossato Bach; Dimensionamento da capacidade de produção de hidrogênio a partir da energia vertida turbinada de Itaipu e sua utilização em veículos automotivos – 2013; Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/35300/TCC%20Vanessa%20Rossato%20Bach%20PDF.pdf?sequence=1>>

10. Jorge Martins; Motores de Combustão Interna – 2ª Edição; Publindústria, 2006; Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/10844506/motores-a-combustao-interna--jorge-martins>>

11. Yasin Karagöz, Emre Orak, Levent Yüksek, Tarkan Sandalcı; Effect of hydrogen addition on exhaust emissuins and performance of a spark ignition engine - 2012; Disponível em: <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol14/no3/full/22_736_Karagoz_13.pdf>

12. Fernando Miguel Soares Memede dos Santos, Fernando António Castilho Mamede dos Santos; O combustível “Hidrogênio” – 2008; Disponível em: <http://www.ipv.pt/millenum/millenum31/15.pdf>

13. Hydrogen Properties, College of the Desert, December 2001, Disponível em: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf

14. M. Akif Ceviz, Asok K. Sem, Alp K. Küleri e I. Volkan Öner; Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variations in a lean-burn SI engine fueled by gasoline–hydrogen blends – 2012

15. James Larminie; Andrew Dicks; Fuel Cell Systems Explained; Second Edition – 2003, Disponível em:
<https://www.ucursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Fuel_Cell_Systems_Explained.pdf>

16. Volo performance inc. Disponível em:
<<http://voloperformance.com/fs2hhoedition.html>>

17. Hydroclub USA: Disponível em <<https://www.hydroclubusa.com/>>