

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

HERICKSON MESQUITA GOMES – 201420757
LUCAS OLIVEIRA DE DEUS GUIMARÃES – 201420441
MATHEUS ALVES GOMES DE OLIVEIRA – 201410626
RODRIGO OLIVEIRA BUENO - 201410640

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO
COMO COMBUSTÍVEL PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES**

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

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO
COMO COMBUSTÍVEL PARA VEÍCULOS AUTOMORES**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade UNIFOA de Volta Redonda, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Héricksn Mesquita
Lucas Oliveira de Deus Guimarães
Matheus Alves Gomes de Oliveira
Rodrigo Oliveira Bueno

Orientador:

Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe
ORIENTADOR

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal

DEDICATÓRIA

Dedicamos esse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) a todos os nossos familiares que acreditaram em nossos sonhos e que nos deram a oportunidade de iniciar uma carreira profissional.

Dedicamos também a todos os nossos amigos, que sempre nos apoiaram e estiveram conosco nos momentos de dificuldades que tivemos durante toda a trajetória que traçamos durante a realização desse curso.

Dedicamos a todos os nossos amigos que acabaram de alguma forma, fazendo parte desses momentos em períodos anteriores e que hoje não estão juntos conosco, porém, gostaríamos que estivessem fazendo parte desse momento tão sonhado e esperado por todos nós.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de nossa vida. A esta universidade, direção e administração. Agradecemos a todos os professores por nos proporcionar o conhecimento, por tanto que se dedicaram a nós, não somente por terem nos ensinado, mas por nos terem feito aprender. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado

EPÍGRAFE

“Toda ação humana, quer se torne positiva ou negativa, precisa depender de motivação.”

Dalai Lama

RESUMO

Esse trabalho tem como proposta o estudo da viabilidade da utilização do hidrogênio como forma de combustível em veículos automotores. O Tema é muito discutido em todo o mundo, porém ainda é muito difícil ter consciência de todos os efeitos dessa mudança. Faremos a avaliação do rendimento e autonomia do motor propulsionado por este combustível, fazendo comparações com os diversos tipos de sistemas já existentes como o ciclo Otto, ciclo Diesel, motor híbridos e por fim os motores elétricos, sendo que os motores com funcionamento por célula de hidrogênio, possuem o sistema de combustão interna ou motor elétrico. Revisaremos o seu poder calorífico, formas de armazenamento de hidrogênio, por possuírem alta taxa de combustão e por serem partículas muito pequenas tornando seu armazenamento mais difícil, além de mostrar como será feito o abastecimento desses veículos, mostrando a eficácia dos mesmo quando se comparado com os veículos automotores movidos a motores elétricos, levando em consideração ainda as questões ambientais empregadas em todo o desenvolvimento dessa tecnologia, demonstrando ainda os custos envolvidos desde a produção do combustível para funcionar esse motor, até os valores que os consumidores estarão passíveis, sendo eles de compra e manutenção destes veículos.

Palavras Chave: Hidrogênio, Automotores, Combustão interna, Motor elétrico

ABSTRACT

This work has as proposal the study of the viability of the use of hydrogen as a form of fuel in automotive vehicles. The theme is much discussed around the world, but it is still very difficult to be aware of all the effects of this change. We will evaluate the performance and autonomy of the engine powered by this fuel, making comparisons with the various types of existing systems such as the Otto cycle, Diesel cycle, hybrid engine and finally the electric motors, hydrogen, have the internal combustion system or electric motor. We will review its calorific power, forms of hydrogen storage, because they have a high combustion rate and because they are very small particles, making their storage more difficult, besides showing how they will be supplied to these vehicles, showing their effectiveness when compared with motor vehicles powered by electric motors, taking into account the environmental issues involved in all the development of this technology, also showing the costs involved from the production of the fuel to operate this engine, to the values that consumers will be able to, purchase and maintenance of these vehicles.

Key Words: Hydrogen, Self-Driven, Internal combustion, Electric Motor

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corrosão em um metal	6
Figura 2 – Chapa de aço-carbono com empolamento por hidrogênio	8
Figura 3 – Processo de separação dos átomos de O ₂ e H ₂	9
Figura 4 – Eletrolisador	10
Figura 5 – Carro sendo abastecido por hidrogênio	14
Figura 6 – Ilustração da esquematização do processo em uma célula de combustível	16
Figura 7 – Tanque de armazenamento de hidrogênio de um veículo da Honda	20
Figura 8 - Representação do experimento para se obter o desempenho de motores com Injeção Direta a Hidrogênio (Mohammadi et al., 2006)	23
Figura 9 – Efeitos do tempo de injeção θ_j ($^{\circ}$ APMS) com a eficiência térmica η_e , o aumento máximo da taxa de pressão $(dp/d\theta)_{max}$, o tempo de ignição θ_i e emissões de Nox para diferentes razões combustível / ar (Mohammadi et al., 2006)	24
Figura 10 - Representação do experimento para se obter o desempenho em motores de ignição por compressão com Injeção Direta a Hidrogênio (Gomes et al., 2009)... ..	26
Figura 11 - Emissões de NO _x para operação com hidrogênio como combustível e diesel (Gomes et al., 2009)	27
Figura 12 – Fluxograma da Metodologia	29
Figura 13 – Abastecimento de um Veículo Fuel-Cell	35
Figura 14 – Tanque de Hidrogênio localizado abaixo dos bancos do veículo	37
Figura 15 – Principais componentes do Mirai da Toyota	40
Figura 16 - Funcionamento da célula de combustível	43
Figura 17 – Componentes de um Veículo Fuel-Cell	44
Figura 18 – Toyota Mirai	46
Figura 19 – Honda Clarity Fuel-Cell	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados experimentais da análise de motor de ignição por compressão (Gomes et al., 2009)	27
Tabela 2 - Poder calorífico de diferentes combustíveis	34
Tabela 3 - Vantagens e Desvantagens da utilização do hidrogênio	51

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1 - Fórmula da taxa de inflamabilidade	4
---	----------

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ICEs – internal combustion engines

VHEs - veículos híbrido-elétricos

SI - spark ignition

NO_x – dióxido de nitrogénio

PEM – Próton Exchange Membrane

PEMFC – Protons Exchange Membrane Fuel Cell

AFC - Alkaline Fuel Cell

PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell

MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell

SOFC - Solid Oxid Fuel Cell

GM - General Motors Company

NASA - National Aeronautics and Space Administration

BMW - Bayerische Motoren Werke AG

FCV - Fuel Cell Vehicle

GNV - Gás Natural Veicular

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto	1
1.2. Objetivo	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. O hidrogênio	3
2.2. Corrosão	6
2.3. Tecnologias De Produção Do Hidrogênio	8
2.3.1. Eletrólise da água	10
2.4. Formação Da Mistura e Estratégias No Uso Do Hidrogênio	11
2.5. Poder Calorífico	13
2.6. Combustível Do Futuro	14
2.7. Células De Combustível e Tipos De Células De Combustível	15
2.8. Abastecimento	18
2.9. Armazenamento	20
2.10. Questão Ambiental	21
2.11. Motores	22
2.11.1. Motores a combustão por centelha	22
2.11.2. Motores a combustão por compressão	25
2.12. Ignição	28
2.12.1. Ignição por centelha	28
2.12.2. Ignição por compressão	28
3. METODOLOGIA	29
3.1. Desenvolvimento Da Tecnologia	30
3.2. Poder Calorífico	30
3.3. Abastecimento	30
3.4. Armazenamento	30
3.5. Questão Ambiental	31
3.6. Autonomia	31
3.7. Consumo	31

3.8. Funcionamento	31
3.9. Eficiência	32
3.10. Custos	32
3.11. Viabilidade	32
4. DESENVOLVIMENTO	33
4.1. Desenvolvimento Da Tecnologia Pelas Empresas	33
4.2. Poder Calorífico Do Hidrogênio	34
4.3. Abastecimento	35
4.4. Armazenamento	37
4.5. Questão Ambiental Do Combustível Hidrogênio	38
4.6. Autonomia De Veículos Automotores	39
4.7. Consumo	40
4.8. Funcionamento	42
4.9. Custo De Desenvolvimento, Fabricação e Aquisição	45
4.10. Eficiência	48
4.11. Viabilidade	49
4.11.1. Viabilidade no Brasil	51
5. CONCLUSÃO	52
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

O combustível pode ser qualquer substância que libera energia e produz calor quando entra em reação com o oxigênio. Essa energia é de suma importância para as atividades de produção industrial, uma vez que a maioria dos equipamentos funciona a partir dela.

A energia pode ser proveniente de várias substâncias, sendo as principais fontes os combustíveis fósseis, como o gás natural, o carvão e o petróleo. É imprescindível a procura de novos tipos de energia, já que os combustíveis fósseis possuem alta quantidade de carbono, o que causa vários problemas ambientais devido a combustão.

O futuro projeta uma substituição dos motores a combustão interna por motores elétricos, pois estes não causam poluição atmosférica, além do fato de que os combustíveis fósseis não são renováveis e são limitados, ou seja, um dia irão acabar. Atualmente o hidrogênio é chamado de o “combustível do futuro”, porque ser uma matéria prima não tóxica, abundante na atmosfera e por ser uma fonte completamente renovável. Quando usado como célula de combustível, suas emissões não agridem o meio ambiente, principalmente por não expelir gases que provoquem o efeito estufa. Além disso há também a questão da sustentabilidade, dado que o único subproduto do hidrogênio é a água.

O hidrogênio também é um elemento com altíssima capacidade de armazenamento de energia e possui baixo peso molecular, ocupando, no estado líquido, o equivalente a 1/700 do que ocupa no estado gasoso.

Fazendo uma análise em casos de veículos automotores que usam o hidrogênio como forma de combustível tem-se duas ocorrências, sendo elas I) a avaliação do hidrogênio sendo utilizado com motores de combustão interna no ciclo Otto (o hidrogênio passa pelo mesmo processo dos combustíveis fósseis) e II) fazendo conversão para a célula combustível (o hidrogênio gera energia elétrica para mover motores elétricos).

1.2. Objetivo

O objetivo do artigo é analisar a viabilidade, o custo e a sustentabilidade dessa nova modalidade de combustível, onde vamos contextualizar o funcionamento do motor, seu abastecimento, o quanto de autonomia se pode ganhar com essa adaptação e o quão menos poluente os carros podem se tornar com essa nova tecnologia.

O intuito é criar uma base técnica para o desenvolvimento do estudo da utilização do hidrogênio como forma de energia combustível em veículos automotores e criar uma alternativa para diminuir a utilização de combustíveis fósseis, para assim, diminuir a poluição atmosférica e suprir a futura ausência destes combustíveis.

Para o curso de engenharia, esse estudo é de ampla importância, devido a capacidade de produção, utilização e efeitos desse combustível em automotores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

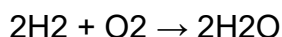
2.1. O Hidrogênio

Há algum tempo o hidrogênio vem sendo observado como uma forma alternativa de energia para motores de combustão interna, sendo utilizado como combustível.

O aumento no preço da matéria prima dos combustíveis fósseis junto a outros fatores, como poluição e restrição as questões ambientais, são os principais precursores da busca dessa nova forma de geração de energia. Especialistas assentem que em algumas décadas será possível essa utilização em vários setores de transporte.

A evolução do hidrogênio possui diversos obstáculos, como falta de infraestrutura e dificuldade no armazenamento, fazendo com que, atualmente, os combustíveis fósseis sejam mais eficientes e mais bem utilizados. Porém as qualidades do hidrogênio são um ótimo motivo para ele ser mais bem estudado e aproveitado.

O hidrogênio é uma substância com boas propriedades. A sua vasta presença na natureza unido a sua baixa quantidade de poluentes provenientes de sua combustão fazem deste um elemento muito atrativo. É uma partícula não tóxica, inodora e possui uma combustão completa. A queima do hidrogênio resulta em vapor de água e, lamentavelmente, formação de NOx. NOx são emissões indesejáveis formadas a partir da decomposição térmica e oxidação de N₂ que existem no ar atmosférico enquanto acontece a combustão.



Devido a essas características, pesquisadores buscam por soluções para utilizar o hidrogênio como combustível alternativo, tanto em motores de combustão interna (ICEs – *internal combustion engines*), quanto na formação de célula combustível em veículos híbrido-elétricos (VHEs) (Yilmaz, 2010).

Existe a possibilidade de o hidrogênio ser usado como combustível puro em motores de ignição por centelha (SI - *spark ignition*), sendo ela feita por injeção direta ou a partir de um carburador (Das, 2002). É possível utilizar em motores por compressão, mas alguns problemas são encontrados, como veremos a seguir.

O hidrogênio dispõe de uma velocidade de queima superior a cinco vezes a velocidade de queima dos hidrocarbonetos. A facilidade que algo tem de queimar, gerando fogo ou combustão é chamado de Inflamabilidade. Levando em consideração essa informação, temos a taxa de inflamabilidade do hidrogênio, que é de $\Phi = 0,1$ (razão equivalente), muito menor que o da gasolina ($\Phi = 0,6$). Sendo assim, entendemos que, quanto maior a sua taxa de inflamabilidade, maior o perigo causado pela substância ao entrar em combustão. Em tese, é possível aumentar o limite da inflamabilidade para combustíveis de hidrocarbonetos, sendo líquido ou gasoso, adicionando uma certa quantidade de hidrogênio. A fórmula que define essa taxa de inflamabilidade é:

$$\Phi = \frac{\left[\frac{\text{Massa de combustível}}{\text{Massa de ar}} \right]_{\text{real}}}{\left[\frac{\text{Massa de combustível}}{\text{Massa de ar}} \right]_{\text{estequio}}}$$

Fórmula 1 - Fórmula da taxa de inflamabilidade

Abundância de ar resulta em uma combustão melhor e mais completa, aumento de eficiência e diminuição de picos de temperatura, auxiliando na redução da segregação do óxido de nitrogênio (NOx), pois elimina problemas relacionados a operação de misturas pobres (Jingding et al, 1998). Em sequência, uma maior velocidade de chama incrementa na taxa de combustão da mistura, deixando menores as variações ciclo a ciclo (Apostolescu e Chiriac, 1996). O hidrogênio possui uma disparidade comparado aos combustíveis de hidrocarbonetos, gerando uma melhor mistura, aumento da turbulência e da homogeneidade da carga. Ele também necessita de menos energia de ignição, casualmente isso se reverte em uma rápida ignição, facilitando a partida a frio.

O motor de combustão interna alimentado por hidrogênio possui a capacidade de operar com quase zero emissões, isso se deve a dois fatores: i) a única emissão indesejável é o NOx, e ii) o hidrogênio ter uma inflamabilidade baixa, permitindo uma combustão estável com alto teor de diluição. A junção desses dois fatores ocasiona numa temperatura de combustão suficientemente baixa, fazendo com que a taxa de formação de NOx sejam baixas e as emissões do motor fiquem próximas a zero. A eficiência do motor se deve a ii, pois a funcionalidade estacionária do motor é viável em cargas baixas.

As características de combustão de hidrogênio que possibilitam um tratamento limpo e efetivo em cargas baixas são as mesmas que demonstram contrariedades em cargas elevadas na operação. Como a energia de ignição da mistura hidrogênio-ar é baixa, causa uma combustão não programada, assim as altas temperaturas de combustão junto a composição estequiométrica geram um aumento na formação de NOx. Tais efeitos, na prática, diminuem a densidade de energia dos motores a hidrogênio. Pesquisas nesta área mostraram um desenvolvimento avançado de motores a hidrogênio com densidade de energia e baixas emissões de NOx (Das, 1991).

Já foram realizados testes em motores movidos a diesel, colocando o hidrogênio como combustível único, porém era muito complicado de operar o motor apenas através da compressão, devido à alta taxa de autoignição. Por isso é utilizado vela de ignição frequentemente. Para motores de ignição comandada, os problemas eram pré-ignição, emissões de NOx e detonação (Lee et al., 2001).

Estudos mostram que com misturas baixas e ponto de ignição lento, os lançamentos de NOx do sistema podem ser reduzidos a um valor abaixo dos de combustão de hidrocarbonetos comuns (Jingding et al., 1998). Hidrogênio possui um poder calorífico baixo, devido a isso seus motores possuem uma potência menor. Esse menor poder se deve ao volume e a fraca mistura de operação do elemento. Para isso, o ar de entrada deve ser reduzido, agregando a mistura e melhorando a potência na saída.

2.2. Corrosão

De acordo com Vicente Gentil (1996) a corrosão (figura 1) é uma reação química heterogênea ou reações eletroquímicas que ocorrem na superfície entre o metal e o meio corrosivo.

Tais reações são baseadas numa troca de elétrons, sendo assim, a corrosão é um processo em que ocorre a oxidação dos metais, sendo ele um redutor, transferindo elétrons para a substância corrosiva. Com isso, sabemos que a corrosão é uma forma de degradação da superfície do metal que ocorre gradualmente.



figura 1 – Corrosão em um metal (<http://www.tsambientali.com.br/wp-content/uploads/2018/02/image3.png>)

A corrosão acontece de diversas maneiras. Pode se considerar a aparência ou forma de ataque e as diversas formas de corrosão e seus mecanismos. Estas são divididas em i) morfologia; ii) causas ou mecanismos; iii) fatores mecânicos; iv) meio corrosivo; v) localização do ataque.

- i. A corrosão segundo a morfologia pode ser uniforme, filiforme, por placas, empolamento por hidrogênio, intergranular e em torno do cordão de solda, dentre várias outras maneiras.
- ii. Causas e mecanismos podem ser por aeração diferencial, em torno do cordão de solda, galvânica, fragilização pelo hidrogênio, eletrolítica, dentre outras.
- iii. Os fatores mecânicos podem ser por atrito, sob fadiga, sob tensão e associado a erosão.
- iv. O meio corrosivo pode ser pelo solo, pela água do mar, por sais fundidos, atmosférica etc.
- v. A localização do ataque pode ser uniforme, intergranular, transgranular, dentre outras.

Falaremos mais sobre a morfologia de corrosão e suas causas e características principais citadas:

- **Uniforme:** corrosão que ocorre na extensão da superfície, gerando uma perda uniforme de espessura.
- **Filiforme:** corrosão ocorre por filamentos finos e rasos, se propagando em direções aleatórias, porém sem se ultrapassarem. Normalmente ocorre em superfícies metálicas pintadas ou revestidas.
- **Por placas:** corrosão que ocorre em regiões da superfície, não em sua extensão.
- **Empolamento por hidrogênio:** corrosão em que o hidrogênio entra no material metálico e se espalha rapidamente, se transformando em hidrogênio molecular, gerando pressão e causando bolhas no metal, por isso o nome empolamento (figura 2).

- **Intergranular:** Essa corrosão ocorre na separação dos grãos da rede cristalina, tal efeito pode gerar perda de propriedades mecânicas, ocasionando fraturas. Assim se tem a corrosão sob tensão fraturante.
- **Em torno do cordão de solda:** Acontece em aços inoxidáveis não estáveis ou em metais com mais de 0,03% de carbono. A corrosão é realizada intergranularmente.



Figura 2 – chapa de aço-carbono com empolamento por hidrogênio
(<http://engenheirodemateriais.com.br/wp-content/uploads/2017/04/ABAAAASVEAE-17.jpg>)

2.3. Tecnologias De Produção Do Hidrogênio

O hidrogênio é o primeiro elemento da tabela periódica por conta de sua simplicidade e leveza, também é o componente mais abundante em todo o universo. Há anos se tem o conhecimento de que ele é um gás obtido a partir de um contato entre ácido sulfúrico e ferro. Testes constataram que ao entrar em contato com o ar e faíscas elétricas o gás tende a explodir e formar um composto semelhante a “água pura”. Seu nome “hidrogênio” vem do grego “formar água”.

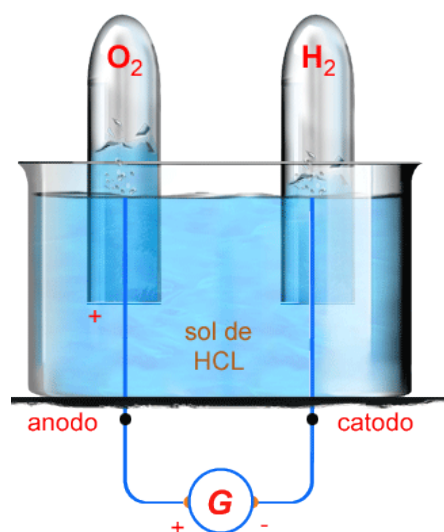


Figura 3 – Processo de separação dos átomos de O_2 e H_2
(<https://compranoexterior.com.br/wp-content/uploads/2015/05/eletrolise2.gif>)

Não é possível encontrar o hidrogênio puro na terra, sempre ele é encontrado unido a outros elementos. Para separar e deixá-lo “puro” é preciso gastar energia, decompondo fontes primárias (Figura 3). Por isso o hidrogênio não é conhecido como fonte primária, mas sim uma fonte intermediária. Também não podemos confundir-lo com fonte energética, ele é um “vetor energético”.

A forma de produção do hidrogênio vai ser realizada de acordo com a quantidade de produto que vamos utilizar e com o seu nível de pureza esperado.

Todas as formas de produção do hidrogênio exigem energia em suas várias formas, como iluminação, calor e eletricidade. Essas formas são bem diversificadas, como i) eletrólise da água; ii) a partir do gás natural; iii) fotobiológico; iv) gaseificação de biomassa e pirólises; focaremos no meio de produção de hidrogênio através da eletrólise da água.

2.3.1. Eletrólise da água

É um método fundado na utilização da eletricidade para dissociar os elementos da água, oxigênio e hidrogênio. O rendimento global desse processo é de aproximadamente 95%.



Existe um projeto patenteado em 1999 que é um eletrolisador (Figura 4). Nele, ao utilizar a água, libera-se o hidrogênio por eletrólise sem agredir o meio ambiente. Essa máquina utiliza uma Membrana de troca de prótons (PEM – *Próton Exchange Membrane*). A eletricidade pode chegar a partir de fontes renováveis, podendo ser a energia eólica, energia hidráulica, energia solar, energia geotérmica etc.



Figura 4 – Eletrolisador (https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-681359787-kit-de-hidrogênio-pmotor-ate-55l-_JM?quantity=1)

Com essa base energética, a eletrólise pode originar o hidrogênio limpo. Porém existem pontos negativos, pois é necessária uma alta quantidade de energia, levando em consideração que, normalmente, a energia utilizada não é renovável e, portanto, poluível.

2.4. Formação Da Mistura e Estratégias No Uso Do Hidrogênio

Com o desenvolvimento de tecnologias e o grande intervalo de limites de ignição do hidrogênio, propicia aos motores, que eles sejam operados de forma mais eficiente e com razões estequiométricas de ar/combustível menores quando comparado com os combustíveis utilizados de forma convencional. Através desse desenvolvimento tecnológico, foi possível observar o progresso em relação à mistura estequiométrica ar/combustível, cujo aumento da potência de saída foi notório quando comparado a pequenas razões estequiométricas. Porém, misturas que utilizam uma razão estequiométrica mais pobre de ar/combustível obtém melhor eficiência quando utilizada em motores.

Com relação à temperatura de autoignição, a temperatura do hidrogênio é consideravelmente superior as dos combustíveis normalmente utilizados nesses motores, o que preconiza a utilização de ignição por centelha, sendo a fonte geradora de calor para combustão, entretanto, operações utilizando o hidrogênio em motores com ignição a compressão obtiveram sucesso e tem sido utilizada em motores estacionários de grande cilindrada.

O processo adequado da formação da mistura ar/combustível é de suma importância para obter uma alta eficiência dos motores e ao mesmo tempo contemplar os limites de projeção de poluentes na atmosfera. Semelhantes aos motores que utilizam combustíveis convencionais, motores movidos a hidrogênio obtiveram melhoria contínua e um elevado refino em termos para obtenção de uma coesa formação de mistura.

A classificação desta formação de mistura, normalmente é realizada fundamentada no local de formação de mistura ou no local dos mecanismos de dosagem do hidrogênio. Formação de mistura externa reporta-se ao conceito de que o ar e o hidrogênio misturados na parte externa da câmara de combustão, enquanto

a formação de mistura interna reporta-se a inserção direta do combustível hidrogênio na câmara de combustão.

A tática de formação de mistura, em particular em funcionamento a hidrogênio, tem uma influência significativa na eficiência da saída do motor. A grande dissemelhança desta eficiência é ocasionada especialmente pela baixa densidade do hidrogênio, o que resulta numa atenuação considerável na densidade da mistura quando ocorre a formação de mistura externa.

Utilizando uma classificação constituída no equilíbrio de tempo e na profusão de combustível inserido, é possível distinguir os sistemas que usam carburadores, mecanismos de injeção mecânica controlada e mecanismos de injeção eletronicamente controlada. Motores modernos cuja combustão é do hidrogênio, utilizam, na maioria dos casos sistemas de injeção de combustível monitorado eletronicamente, porém, os requisitos e prescrições para tais sistemas modificam abundantemente de acordo com a localização da injeção e com a temperatura do combustível inserido. Usualmente, sistemas de injeção com utilização de mistura externa ar/hidrogênio operam a pressões mais baixas de injeção (2-8 atm), já os sistemas de injeção direta de hidrogênio possuem pressões maiores (5-250 atm).

Finalmente, uma classificação fundamentada na homogeneidade da mistura resultante que permite uma associação de motores de combustão a hidrogênio com mistura homogênea ou sedimentada. Devido ao período longo disponível, relativamente por assim dizer, para a mistura de ar/combustível, a mistura externa pode ser julgada homogênea. Entretanto, as características na formação da mistura interna na injeção de combustível imediatamente na câmara de combustão propiciam influir a classificação da mistura e sua homogeneidade. Com isso, pode-se diminuir a duração da combustão e refinar sua estabilidade nas condições de mistura extremamente pobres, ou para frustrar as emissões de NOx em situações críticas de ar/combustível com a criação intencional de zonas ricas e pobres.

2.5. Poder Calorífico

Após a crise petrolífera da década de 70, iniciaram-se buscas por recentes fontes de energia. O hidrogênio passou a ser considerado, sendo utilizado a partir de conversões eletroquímicas e utilizando células de combustível.

O hidrogênio possui a necessidade de ser produzido, transportado e armazenado antes de usá-lo. E ainda é necessária a busca por soluções tecnologicamente eficientes, com baixo custo e com segurança para o seu manuseio.

Apesar do hidrogênio possuir diversas vantagens para sua utilização como pilha de célula de combustível, ainda existe uma baixa infraestrutura, visto que o elemento necessita de uma produção com base em fontes energéticas primárias e formas de armazenamento. A categoria do combustível primário e a forma de processamento do “novo” combustível se encaminhará de acordo com a aplicação, disponibilidade e do tipo certo de pilha de célula de combustível. O combustível pode ser feito no local, com produção de energia estacionária, mas também pode ser realizado “a bordo”, na qual ocorre o transporte dessa energia.

Utilizado em vários tipos de pilha de célula, o hidrogênio tem uma alta reatividade em reações eletroquímicas no anodo e após a oxidação, o que se resulta é água, que não afeta o meio ambiente.

Grande parte do hidrogênio já é produzido na própria área de aplicação com processadores de combustível, mas em alguns casos isso ocorre em usinas de produção, depois é enviado e, posteriormente, conservado para uma futura utilização em pilhas. Hoje já pode ser encontrado tipos de infraestrutura que ajudam na produção e no abastecimento do elemento, pois está cada vez mais sendo utilizado pela indústria química.

Cientistas acreditam que o hidrogênio vem para substituir os combustíveis fósseis como uma forma de energia do futuro.

2.6. Combustível Do Futuro

Em termos numéricos, sabemos que o hidrogênio é a forma de combustível (figura 5) que fornece a maior quantidade de energia por unidade de peso. De acordo com seu poder calorífico, 1g de hidrogênio libera 142KJ, enquanto 1g de gasolina libera 48 KJ, quase um terço. É um gás que existe em grande quantidade em todo o universo e o único produto da combustão dele é a água, por isso ele é chamado de combustível do futuro, um combustível que não agrega ao efeito estufa, não danificando em nada o meio ambiente e existe em abundância. Além de outras vantagens, como uma maior velocidade de combustão e possuir um processo de produção descentralizado.



Figura 5 – Carro sendo abastecido por hidrogênio

(<https://fotos.jornaldocarro.estadao.com.br/jornal-do-carro/imagens/noticia/tecnologia-hidrogenio.jpg>)

Essa inovação limpa e sustentável não é novidade. Ela já vem sendo utilizada como combustível de foguetes e naves espaciais, e hoje, vem sendo observado a sua utilização em aviões, por conta de sua baixa densidade. Os maiores contratempos na utilização do hidrogênio são i) sua necessidade de obtenção a partir de um processo barato, pois hoje o seu custo ainda é bastante elevado, ii) seu armazenamento que, na forma gasosa, ocupa muito espaço.

Existe um estudo que mostra que o hidrogênio pode ser armazenado na forma líquida, que ocupa um espaço 700 vezes menor que ele na forma gasosa, porém este necessitaria de uma temperatura de -253°C . Esta temperatura torna o armazenamento não apropriado em usos domésticos ou em automóveis. Uma ideia de utilização é produzir o hidrogênio de acordo com a sua necessidade como combustível, unindo-o a um metal na forma de hidreto metálico, sendo assim, ele liberaria o hidrogênio em reação com a água ou quando aquecido.

Algumas montadoras estão se preparando para lançar veículos com essa tecnologia. O presidente da BMW, Joachim Milberg, disse que a partir de 2020, mais de um terço dos automotores das indústrias da Europa já seriam movidos a base de hidrogênio.

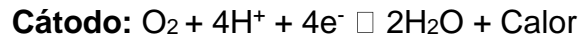
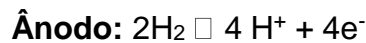
Esse avanço vem sendo instantâneo e parece não demorar para se alcançar tais objetivos e chegar as grandes metrópoles urbanas. Vários países vêm almejando essa utilização já em transportes públicos.

Enquanto não utilizamos essa energia por ainda ter algumas dificuldades, confia-se nos veículos elétricos que também não danificam o meio ambiente e não implicam em nosso futuro, apesar destes não serem renováveis.

2.7. Células De Combustível e Tipos De Células De Combustível

Inventadas no século XIX pelo advogado, juiz e físico britânico Sir William Robert Grove, as células de combustível são dispositivos de conversão de energia química, presente nos átomos de um elemento, em energia elétrica. Essa transformação de energia acontece graças a dois eletrodos, um de polo positivo, cátodo, e outro de polo negativo, ânodo, unidos por um eletrólito específico, onde ocorre, no ânodo, a oxidação de um combustível e no cátodo, a redução de um oxidante, auxiliados por catalisadores.

As reações nos eletrodos são representadas pelas equações abaixo:



Se considerarmos o hidrogênio como sendo o combustível e o oxigênio como oxidante, teremos a transformação desses átomos em vapor de água, calor e a liberação de elétrons capazes de alimentar carga a um motor elétrico ou bateria.

Na figura 6 podemos entender o processo de eletrólise em uma célula de combustível.

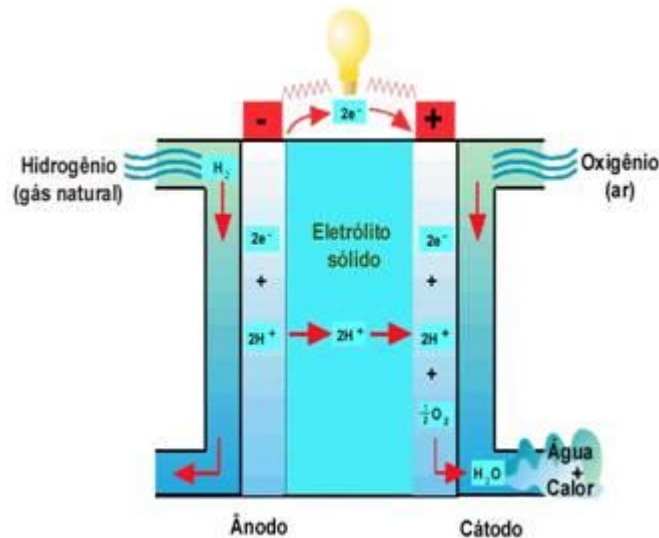


Figura 6 – Ilustração da esquematização do processo em uma célula de combustível
(http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000200007&script=sci_arttext)

Pela manutenção simples, por não emitirem poluição sonora e por serem compactas as células de combustíveis também estão sendo utilizadas em aplicações localizadas de até alguns MW (Megawatts) de potência, como por exemplo em hospitais, repartições públicas, agências bancárias, condomínios residenciais, entre outros.

Existem vários tipos de células de combustível, a principal apresentada por este trabalho é a célula de combustível com membrana de troca de elétrons (PEMFC – *Protons Exchange Membrane Fuel Cell*). Seu eletrólito é sólido e feito de um polímero

(H_3O^+), por isso tem uma alta resistência a passagem de gás, sua temperatura de trabalho é na faixa entre 20°C e 120°C , podendo ser utilizada em veículos automotores, espaçonaves, e unidades estacionárias. Como vantagens temos alta densidade de potência, operação flexível, mobilidade, células de tamanho compacto, e sendo a forma mais ecológica de se gerar energia. Nas desvantagens temos o custo elevado da membrana e catalisadores, e a contaminação do catalisador com monóxido de carbono, o que pode resultar na necessidade da substituição da peça, e o calor gerado no processo dificilmente pode ser reaproveitado para geração de mais energia.

A AFC (*Alkaline Fuel Cell*) foi desenvolvida para o programa espacial Apollo, e provou ser completamente útil para esse tipo de experiência espacial. Contudo, pesquisas visando utilizar essa célula na terra concluíram que a alimentação da mesma só poderia ser feita com hidrogênio puro, pois mínimas quantidades de CO_2 seriam capazes de danificar a membrana permanentemente. Para abastecer esta célula com fontes ricas em hidrogênio, de modo que o H_2 seja o único elemento chegando a célula, seria necessário um investimento alto e insustentável.

A célula de combustível PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), representada por H_3PO_3 possui um eletrólito ácido que não reage com o gás carbônico (CO_2) e nem com o ar. Suas temperaturas de funcionamento variam entre 160°C e 220°C , e devido a isso é uma boa alternativa na geração de energia elétrica. Com essa temperatura de funcionamento é possível ainda aproveitar o calor liberado pela célula para aquecer água ou ar, e trabalhar associada a outro tipo de gerador. Sua eficiência é a mais baixa entre todas as células, por volta de 37% a 42%. Como vantagens dessa célula temos o maior desenvolvimento tecnológico e a tolerância ao monóxido de carbono, e desvantagens eficiência limitada pela corrosão já que o gás CO afeta a catálise na entrada do ânodo quando trocado por uma reação de troca com vapor de água. São indicadas para unidades estacionárias e geração de calor.

A MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) tem uma aplicação mais específica, sendo utilizada para cápsulas de foguetes. Seu eletrólito é de carbonatos fundidos (CO_3^{2-}) e suas temperaturas de trabalho por volta de 550°C e 660°C . São tolerantes à CO e CO_2 . As principais vantagens estão na possibilidade de se utilizar materiais mais baratos, onde as reações ocorrem em catalisadores de níquel de baixo custo. Mas é necessária a utilização de uma fonte de CO_2 no cátodo para formar íons de carbonato,

e o eletrólito é muito corrosivo e móvel, sendo também sensível ao enxofre. Além de uma interface trifásica de difícil controle. São recomendadas para unidades estacionárias e cogeração de calor.

A SOFC (*Solid Oxid Fuel Cell*) possui eletrólito sólido de zircônia (ZrO_2), e está sendo desenvolvida desde meados de 1950. Possui eletrólito sólido e a célula pode ter formato plano, tubular ou monolítica. Devido a cerâmica sólida ser o composto do eletrólito, este não apresenta problemas com corrosão. O CO é utilizado como combustível graças a cinética da célula e não há necessidade de CO_2 no cátodo como é na célula MCFC. Sua temperatura de operação é em torno de $1000^\circ C$ e isso traz uma série de problemas, há expansões térmicas divergentes entre os materiais e é difícil conseguir uma perfeita vedação em células planas. Essa temperatura de trabalho dificulta o processo de fabricação e restringe o uso de alguns materiais. Essa célula ainda demonstra alta resistividade no eletrólito, não obtendo uma boa eficiência. Pode ser usada em unidades estacionárias e para cogeração de calor.

2.8. Abastecimento

O hidrogênio é uma fonte de energia renovável, por termos muitos recursos para produzi-lo. O mesmo pode ser produzido com fontes de energia renovável, nuclear ou fóssil.

Com foco em utilização do gás como fonte de energia para automóveis estudamos duas maneiras de se fazer esse tipo de uso i) para veículos adaptados para a combustão do hidrogênio; ii) o hidrogênio sendo utilizado em veículos avançados, que trabalham com célula de combustível (*fuel cell*). Uma das premissas a ser estudadas é o funcionamento do abastecimento do hidrogênio.

O gás em estudo é armazenado nos veículos a altas pressões por conta de estar comprimido, ele exige uma tecnologia para que seja armazenado com segurança em seu tanque. O funcionamento desse sistema consiste de maneira ilustrativa com o abastecimento de veículos movidos a GNV, o hidrogênio é armazenado em um tanque para ser utilizado como fonte de energia. Os postos de hidrogênio fornecem o mesmo a altas pressões para armazenamento nos veículos os quais tem capacidade por volta de 5 kg do gás com uma autonomia de 500 km.

No posto de abastecimento o hidrogênio é enviado para o tanque do veículo através do acionamento do mecanismo da bomba e o hidrogênio comprimido é guiado para o armazenamento através de uma mangueira, de forma parecida aos abastecimentos convencionais.

O Japão pretende abrir cerca de mais oito postos de abastecimento de hidrogênio, chegando à marca de cem postos de abastecimento em atividade, sendo o país com mais estrutura para receber essa tecnologia. Outros países como os estados unidos tem mais de trinta postos, a Alemanha por volta de quarenta postos, além de outros países como a Noruega que tem sete postos de hidrogênio que fazem parte da HyNor, estrada que permite cruzar todo o país abastecendo com o combustível.

2.9. Armazenamento

Os carros movidos a hidrogênio especialmente os veículos *fuel cell*, onde se investe no estudo do armazenam o gás em tanques pressurizados (figura 7). O hidrogênio fica numa forma altamente comprimida na temperatura ambiente. Como exemplo podemos usar o Mirai, utilitário da Toyota que já está no mercado, tem dois reservatórios ultraprotégidos debaixo do assoalho, compostos por fibra de carbono e filamentos que produz em reservatórios que armazenam o gás de forma extremamente segura. Que além de armazenar o combustível melhora o centro de gravidade o que aumenta a dirigibilidade.



Figura 7 – Tanque de armazenamento de hidrogênio de um veículo da Honda
(<http://revistapesquisa.fapesp.br/2006/08/01/reforma-energetica/>)

Com uma célula de combustível localizada no centro da carroceria do Mirai, o processo eletroquímico ocorre dentro da mesma transformando hidrogênio em energia elétrica onde podemos carregar a bateria de níquel-hidreto metálico.

Com autonomia de 500 km com um tanque de combustível o Mirai se compara a utilitários que funcionam no ciclo Otto e no ciclo Diesel, o que torna essa tecnologia cada vez mais viável ao olhar do consumidor.

Vem sendo estudadas outras formas de se armazenar o hidrogênio, já que o mesmo armazenado de maneira mais eficiente tem papel fundamental no aumento da autonomia dos utilitários, sabendo disso há mais de 20 anos, pesquisadores no Japão vem tentando adaptar ao sistema a decalina-naftaleno, que quando está na forma de decalina (C₁₀H₁₈) e recebe calor, se transforma em quimicamente em naftaleno (C₁₀H₈), ocorrendo alteração nas suas ligações, esse elemento libera cinco moléculas de hidrogênio.

2.10. Questão Ambiental

Há alguns anos as empresas e indústrias automotivas não estavam focadas nas questões ambientais, estavam apenas trabalhando para obtenção de lucro em cima de seus produtos fabricados, pois não lhe era exigido a preocupação com a sustentabilidade.

Na atualidade, muitos fatores contribuem de alguma forma para o surgimento e agravamento da degradação ambiental, como por exemplo a industrialização e urbanização. Esses fenômenos, por sua vez, vêm deteriorando a qualidade de vida humana, conseqüentemente degradando o meio ambiente.

Com o surgimento de órgãos capazes de gerenciar e controlar as questões ambientais, houve a necessidade de estabelecer parâmetros para suavizar a degradação do meio ambiente, e a forma que tais órgãos adotaram foi a implementação de normas para regulamentação, como por exemplo a ISO 14001, cuja função é conscientizar e exigir que as empresas empreguem em seus processos sistemas monitorados e auditados capazes de norteá-las na busca de soluções inteligentes de minimização de impactos ambientais.

Baseado nessas normas impostas por órgãos regulamentadores, as indústrias têm trabalhado incansavelmente em busca da obtenção de veículos menos poluentes. Através disso, os veículos propulsionados por combustíveis fósseis vêm perdendo espaço no mercado, não só pela quantidade de poluentes emitidos no meio ambiente, mas também pela autonomia e consumo de veículos híbridos e elétricos. Os automóveis cujo motores são híbridos ou elétrico vieram com sistemas bastante

eficazes de combate a emissão de poluentes, não solucionando o problema, porém, minimizando de forma grandiosa.

Há ainda uma tecnologia bastante cara, porém, com uma eficácia ainda maior a ser implementada pelas indústrias, que são os motores propulsionados por hidrogênio. Além de aumentar a autonomia e o consumo do automóvel, tais motores tem como característica principal a não emissão de poluentes, haja visto que o mesmo, quando em funcionamento, tem como resultado da queima, apenas vapores de água, que não são nada prejudiciais ao meu ambiente.

2.11. Motores

2.11.1. Motores a combustão por centelha

O hidrogênio, assumindo a forma de combustível, tem características boas quando colocado em motores a combustão através de ignição por centelha. Sua extensa faixa de limites de inflamabilidade concede uma execução suave em misturas pouco ricas, com emissões baixas de NOx. Outro aspecto positivo encontrado no hidrogênio, é o fato dele possuir alta velocidade na emissão de chama, podendo assim, atingir maior eficiência térmica em um menor tempo de combustão. Além disso, a energia de ignição requerida é baixa, o que diminuiria a oscilação de ciclo a ciclo de combustão.

Como ponto negativo, podemos destacar a rápida forma na qual o hidrogênio entra em combustão, que por conta desta característica pode ocasionar uma combustão anormal em motores, tais como pré-ignição, detonação e combustão contrária em elevadas cargas, com isso, não asseguraria um desempenho seguro e limitação de potência no motor. Ademais, uma amplificação considerável da velocidade de combustão do hidrogênio ocasiona decréscimo da eficiência térmica quando confrontado com outros combustíveis em estado gasoso em consequência da dissipação de calor.

Teorias e ensaios efetuados por Ali Mohammadi e Masahiro Shioji onde eles utilizavam um cilindro com combustão obtida através de ignição por centelha (figura 8), elevada pressão de injeção de hidrogênio e monitoramento dos tempos de ignição, cujo objetivo era supervisionar a vazão mássica de hidrogênio na injeção, lograram boas conclusões em relação ao desempenho do motor.

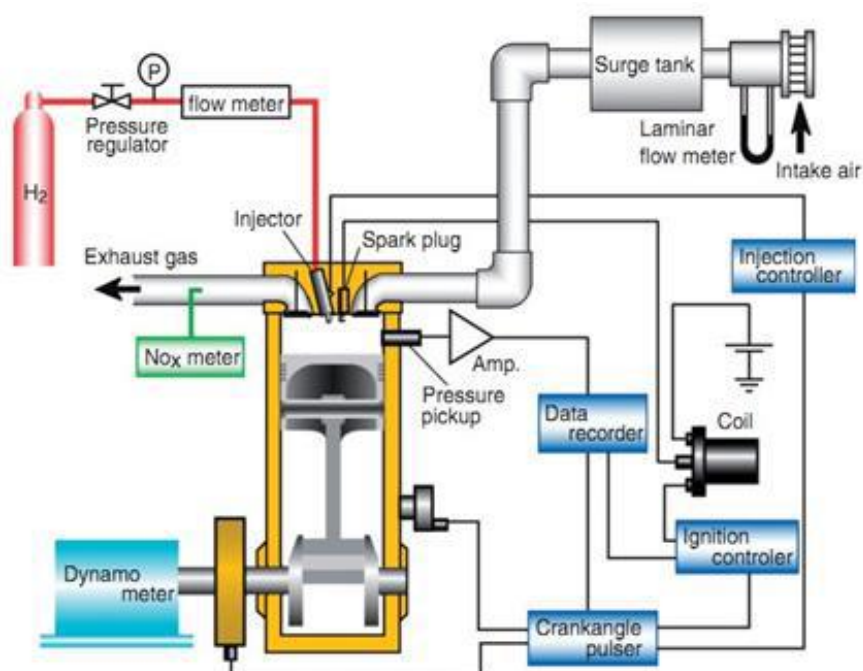


Figura 8 - Representação do experimento para se obter o desempenho de motores com Injeção Direta a Hidrogênio (Mohammadi et al., 2006)

Quocientes atingidos após esse ensaio (figura 9):

- Injeção de hidrogênio no decorrer da emissão, preserva a combustão contrária. Entretanto, a potência de saída do motor e sua eficiência térmica são limitadas por conta da detonação ocasionada pela atenuação de eficiência volumétrica.
- Injeção de hidrogênio no decurso do estágio de compressão acautela detonação, eleva a eficiência térmica e propicia máxima potência de saída.

- Protelando a injeção do hidrogênio ao terminante estágio de compressão, é possível alcançar um rendimento térmico máximo de 38,9% em elevadas cargas do motor, oferecendo também notáveis reduções na emissão de NOX

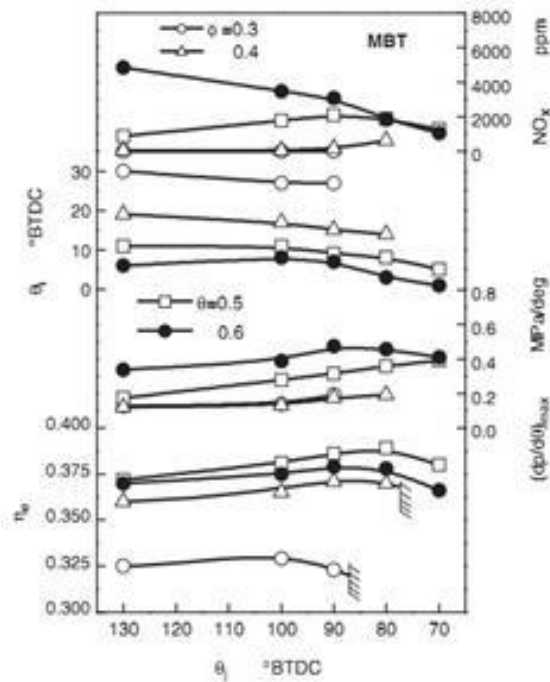


Figura 9 - Efeitos do tempo de injeção θ_i (°APMS) com a eficiência térmica η_e , o aumento máximo da taxa de pressão $(dp/d\theta)_{max}$, o tempo de ignição e_i e emissões de NOx para diferentes razões combustível / ar (Mohammadi et al., 2006)

2.11.2. Motores a combustão por compressão

A utilização do hidrogênio como combustível em motores com ignição por compressão é de difícil operação, assim como, funcionar um motor de combustão a diesel com hidrogênio exclusivamente pelo meio de elevação de taxa de compressão, ocasionado pela elevada temperatura de autoignição do hidrogênio. Empregar uma pré-mistura de hidrogênio na admissão de ar nos motores a diesel é capaz de monitorar de maneira mais eficaz a ignição. Sistemas que usam o hidrogênio na admissão, possuem o benefício de melhorar ambientalmente a queima do combustível, consentindo a utilização de combustíveis com ignições fracas, por exemplo, biocombustíveis. A indispensabilidade de seus tanques de combustível, difícil municiamento e complexos mecanismos de injeção fazem menos ambicionável o conceito de combinação de dois combustíveis.

Empregando injeção direta de hidrogênio em uma câmara de combustão de um motor com ignição por compressão, tem como consequência uma potência menor de saída que na utilização de uma pré-mistura de hidrogênio na admissão. Isso também suplanta os motores com combustíveis convencionais, contanto que o calor estequiométrico seja mais elevado para o hidrogênio (em torno de 3,37 MJ para hidrogênio e contraposto com 2,83 MJ para gasolina). Inclusive não haveria problemas como detonação ocorrendo na válvula de admissão.

Estudos e pesquisas realizados por J. M. Gomes Antunes, A.P. Roskily e R. Mikalsen demonstram um desenvolvimento de uma experimentação para averiguar as características do hidrogênio em motores com ignição por compressão (figura 10). Apropriado de um cilindro de motor a diesel, adaptado para injeção direta de hidrogênio para realização de testes, é monitorado a concentração de hidrogênio juntamente com seu tempo de injeção, localização do cilindro no período de injeção, potência de saída e emissão de NOx. Em razão da elevada temperatura de autoignição do hidrogênio, um aparato de pré-aquecimento é usado, de forma a aumentar temperatura do hidrogênio a 120°C, propiciando assim uma combustão propícia.

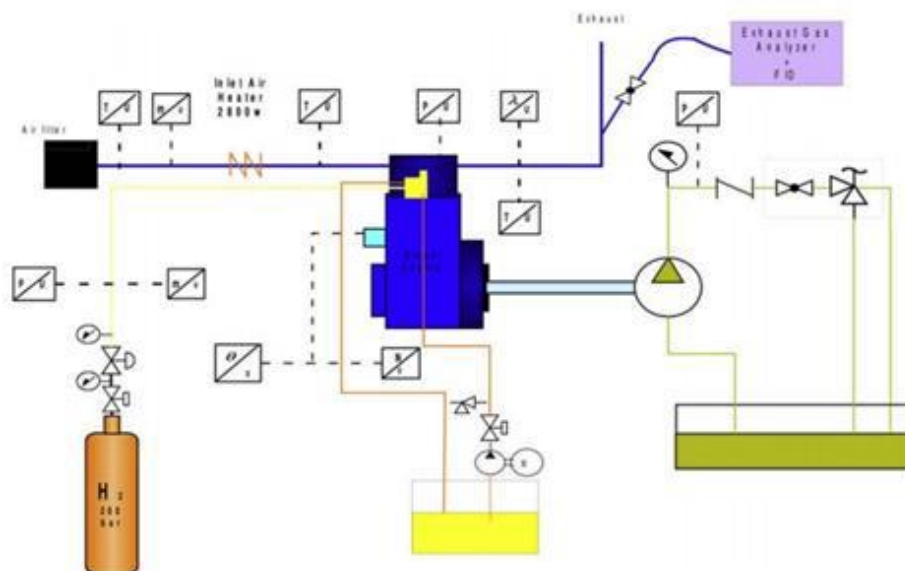


Figura 10 - Representação do experimento para se obter o desempenho em motores de ignição por compressão com Injeção Direta a Hidrogênio (Gomes et al., 2009)

Os resultados obtidos demonstraram que a utilização do hidrogênio elevou a potência em 14% quando contraposto ao uso de diesel, já a eficiência do motor obteve um aumento em torno de 15% (tabela 1), isso ocorre pois as perdas de calor e atrito nas paredes do tanque em que ocorre a combustão são inferiores por efeito das propriedades do combustível gasoso, ocasionando um enriquecimento da mistura ar/combustível. A graduação de NOx obtida foi em torno de 20% quando contrastado em operações com diesel ainda que os picos de pressão interna na câmara de compressão são mais elevados com o hidrogênio, provocado pela elevada taxa de combustão do hidrogênio (figura 11).

Tabela 1 - Resultados experimentais da análise de motor de ignição por compressão (Gomes et al., 2009)

	Diesel DI	Dual fuel (diesel + H ₂)	H ₂ HCCI	H ₂ DI
Shaft output [%]	27.9	33.9	48.0	42.8
Cooling system [%]	42.2	31.2	20.4	17.3
Exhaust gases [%]	35.3	34.9	31.6	39.9
Shaft power [W]	9000	8950	7076	10,280

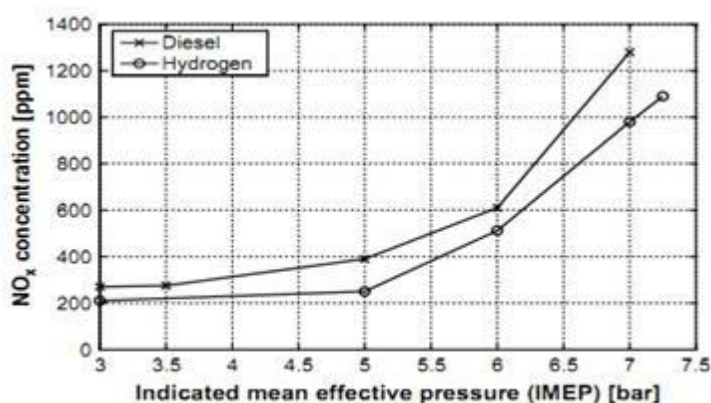


Figura 11 - Emissões de NOx para operação com hidrogênio como combustível e diesel (Gomes et al., 2009)

2.12. Ignição

2.12.1. Ignição por centelha

Para esse tipo de motor o hidrogênio deve explodir o gás combustível, assim como no ciclo otto, diesel etc. Nesse caso vamos analisar algumas formas para que ele exploda na câmara de compressão dos motores.

Fazendo a ignição por centelha podemos classificá-la como ignição com centelha com a mistura externa ou mistura interna chamada também injeção direta. Para isso temos que tomar referência em alguns conceitos, podemos atingir maiores temperatura dos gases na combustão a hidrogênio com uma razão equivalente de ar e combustível, de um de hidrogênio para um de ar, porém nessa mistura temos pouca presença do oxigênio e então a concentração do NOx não é tão alta assim (Salimi, 2009), em contraproposta quando a mistura se torna mais pobre, temos mais oxigênio presente o que acaba compensando a menor temperatura dos gases presentes na explosão.

2.12.2. Ignição por compressão

Pesquisas vem sendo realizadas com aplicações estacionárias de hidrogênio em motores de automóveis para buscar melhorar o rendimento do motor. O hidrogênio possui temperatura elevada de autoignição quando comparado com os combustíveis fósseis convencionais, e isso, em todos os casos, resultou num intervalo limite de operação. Nesse caso temos necessidade de um pré-aquecimento do ar antes de ser admitido ou taxas elevadas de refluxo dos gases da emissão, para atingir tais temperaturas de autoignição, ou seja, sem necessidade de centelhamento.

Com essa forma de operação temos a ausência do mecanismo de centelhamento que daria início a combustão, definindo como característica o aumento da densidade e da temperatura, por meio da compressão, até que a mistura ar/hidrogênio reaja por completo naturalmente.

3. METODOLOGIA

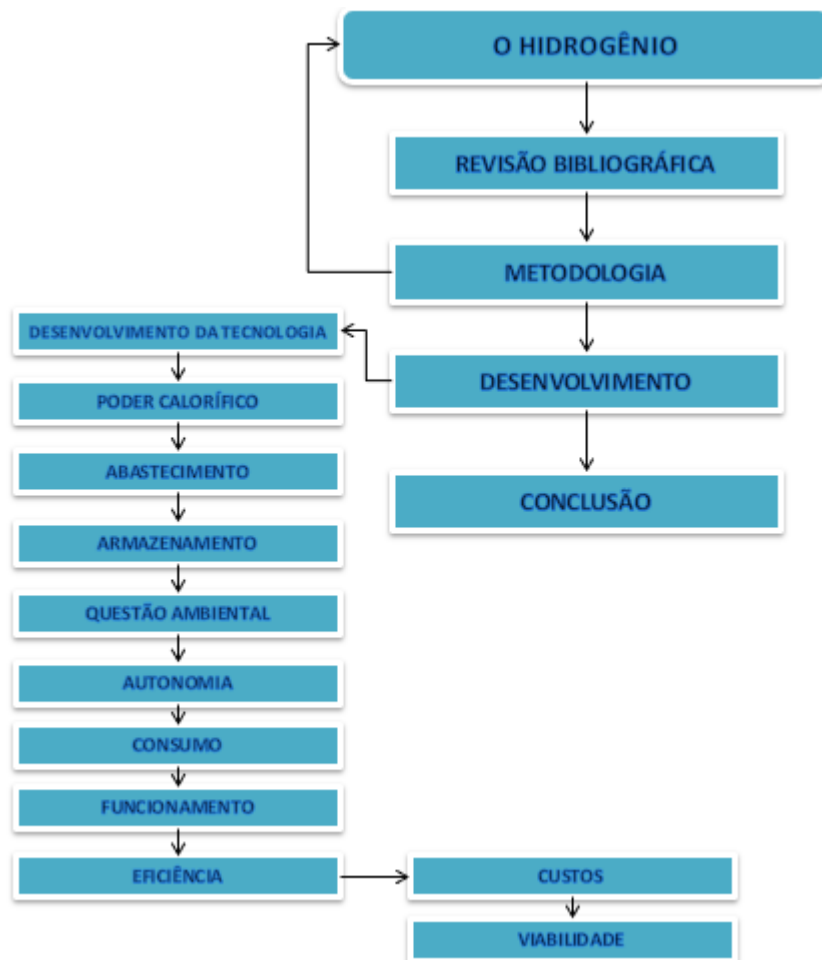


Figura 12 – Fluxograma da Metodologia

Neste passo introduziremos a importância de cada um dos tópicos necessários para o desenvolvimento dessa viabilidade.

3.1. Desenvolvimento Da Tecnologia Pelas Empresas

A célula *fuel cell* é a forma de combustível que está sendo aguardada a décadas e é visto como um dos maiores desafios se tratando de funcionamento de motores. Muitas empresas estão buscando aprimorar essa tecnologia para aproveitar seus benefícios. As pioneiras são Toyota e Honda que já possuem carros que utilizam dessa célula.

3.2. Poder Calorífico

Todos os combustíveis liberam uma certa quantidade de energia quando reagem com o oxigênio. Em poder calorífico veremos como é o poder do hidrogênio com essa reação e compararemos com outras formas de combustível.

3.3. Abastecimento

Como o hidrogênio vem se tornando cada vez mais viável nos dias de hoje vamos abordar o abastecimento do mesmo e dificuldades para se implantar o sistema com a infraestrutura necessária para que possamos nos adaptar a essa tecnologia que é muito mais limpa do que as atuais usadas como forma de energia nos dias de hoje.

3.4. Armazenamento

Por se tratar da questão de autonomia dos utilitários movidos a célula de energia, já que os projetos que se tratam da combustão interna não tem andado de maneira viável, a autonomia é uma das partes mais importantes, daí vem à necessidade de desenvolver tecnologia para que o hidrogênio seja armazenado de forma mais segura e barata a bordo dos veículos. Hoje em dia já temos tecnologia e utilitários sendo vendidos de carros *fuel cell*. O armazenamento do gás tem solução para esses protótipos, com tanques bem dimensionados, temos autonomia de forma que torna o hidrogênio um combustível do futuro.

3.5. Questão Ambiental

O hidrogênio é um combustível renovável, inesgotável e sobretudo limpo, o que o torna espontaneamente mais chamativo quando comparado os contratempos relacionados na obtenção do petróleo, que além de ser poluente é não-renovável. Quando um veículo automotor utiliza desse artefato como propulsor, seu funcionamento ocorre com o hidrogênio puro movendo-se do tanque em direção ao motor, como consequência desta ação resulta uma fonte de alimentação para o motor elétrico, além disso, as impurezas produzidas provenientes dessa reação são os vapores de água.

3.6. Autonomia

A autonomia de um veículo é a capacidade que ele possui de utilizar o combustível que o impulsiona de forma efetiva atribuído ao melhor custo benefício possível. Essa característica é de suma importância para demonstrar a viabilidade de um determinado investimento, que no caso, é a utilização do hidrogênio como combustível para veículos automotores.

3.7. Consumo

Consumo é uma das vertentes principais, junto com autonomia, para verificar se vale a pena utilizar certos tipos de combustíveis. Aqui constam as propriedades que definem o quão rentável será esse automóvel a curto, médio e longo prazo e se valerá a pena o investimento.

3.8. Funcionamento

Nesse tópico explicaremos o funcionamento de motores movidos a hidrogênio utilizando a célula de combustível e mostrando o passo a passo desse funcionamento.

3.9. Eficiência

A eficiência tem o intuito de mostrar se vale a pena ou não utilizar automóveis movidos a hidrogênio. Compararemos os motores de ciclo otto, ciclo diesel e a célula de combustível, inclusive se atentando a suas emissões de poluentes.

3.10. Custos

Com a Toyota e Honda sendo as pioneiras nesse processo pegamos informações de valores dos automóveis Mirai e Clarity, que já utilizam essa tecnologia.

3.11. Viabilidade

O passo final do processo, mostrando e colocando em pauta todos os pontos da utilização do hidrogênio como combustível. Falaremos dos aspectos positivos e negativos relacionando com a economia e a questão ambiental. Por fim vemos como está sendo desenvolvida essa tecnologia no Brasil.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Desenvolvimento Da Tecnologia Pelas Empresas

A célula de combustível (*Fuel Cell*) é sem sombras de dúvidas a tecnologia do futuro. Em pouco mais de duas décadas é esperado que o hidrogênio, através dessa tecnologia, seja o combustível mais utilizado em veículos automotores, devido à sua emissão zero de poluentes e a mudança não tão drástica na forma de abastecimento, comparando à facilidade dos postos de hidrogênio à necessidade de investir milhões em infraestrutura para atender a demanda elétrica de abastecimento se a maior parte da frota mundial for de veículos elétricos.

Essa tecnologia ainda está restrita a poucos veículos. Os motores movidos à hidrogênio ainda estão em desenvolvimento e sendo estudados apesar de já estarem em fase de teste. As primeiras marcas a entrarem nesse mercado foram as japonesas Toyota e Honda, a coreana Hyundai, e as alemãs BMW e Mercedes-Benz, com um núcleo de desenvolvimento e protótipos já nas ruas.

A Mercedes-Benz foi pioneira no desenvolvimento de um veículo movido a hidrogênio e a estabelecer datas para lançamento, com a tecnologia da *GLC Fuel Cell*, porém o aumento da autonomia das baterias e a diminuição do tempo de recarga fizeram com que a comercialização fosse adiada. Recentemente, no salão dos automóveis de Frankfurt, a Mercedes-Benz apresentou sua nova frota, que está sendo desenvolvida, com essa tecnologia *GLC Fuel Cell*, que garante 437km com um tanque de hidrogênio ligado à uma bateria de íons de lítio, com carregamento na tomada, fornecendo 49km extras, em veículo com potência equivalente à 200cv. A frota desses veículos se encontra em testes antes de iniciar a sua comercialização.

Por parte da Honda, a ideia é continuar o desenvolvimento da nova geração do Clarity, que fez sucesso no seu lançamento em 2009. Com um tempo de abastecimento menor do que cinco minutos, e uma autonomia próxima dos 600km, números difíceis de serem alcançados pelos veículos exclusivamente elétricos.

A Toyota, por sua vez, compartilha do pensamento da Honda e continua o desenvolvimento do seu veículo com célula de combustível, o Mirai.

O desenvolvimento dessa tecnologia da célula de combustível é visto como um dos maiores desafios se tratando de funcionamento de motores, em função dessa célula ser vista como uma minicentral de geração de energia elétrica, utilizando a reação química entre o hidrogênio e o oxigênio contido no ar para produzir uma corrente que posteriormente alimenta uma bateria que faz o motor elétrico do veículo funcionar.

4.2. Poder Calorífico Do Hidrogênio

Todos os combustíveis liberam certa quantidade de energia ao reagir com o oxigênio para formação de água. Essa energia é calculada experimentalmente através do poder calorífico superior (HHV) e poder calorífico inferior (LHV) (tabela 2). O que difere esses dois tipos de poder calorífico é o “calor de vaporização”. Este calor demonstra a quantidade de energia que se necessita para a transformação do combustível da forma líquida para a forma gasosa, assim também é o que ocorre para a transformação de água em vapor.

Tabela 2 - Poder calorífico de diferentes combustíveis

Combustível:	Valor do Poder Calorífico Superior (a 25° C e 1 atm)	Valor do Poder Calorífico Inferior (a 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

Se formos comparar o hidrogênio com qualquer outra forma de combustível podemos observar que ele possui a maior energia por unidade de peso em todos os casos, isso ocorre devido ao seu baixo peso e a ausência de carbono, este que possui

átomos pesados. Devido a isso, muitos programas espaciais vêm utilizando esse elemento, porque nestes casos o peso é extremamente importante. Comparando o combustível proveniente do hidrogênio com os combustíveis de hidrocarbonetos (gasolina, metano, propano etc.) observamos que a energia liberada é de até 2,6 vezes maior que o poder de combustão destes. Isso ocorre por conta da energia de explosão do hidrogênio. Em comparação com a mesma massa, o hidrogênio possui uma explosão mais destrutiva e mais rápida do que os hidrocarbonetos.

4.3. Abastecimento

A implantação das bombas de hidrogênio vem acontecendo em países como Estados Unidos, Alemanha, Japão e Noruega. Com um sistema visualmente simples para o abastecimento dos automóveis (figura 13), temos a visão da bomba que ao se acionar o seu mecanismo guia o hidrogênio para o tanque através de uma mangueira. Porém nesse mesmo ato tempo muita tecnologia para estudar e melhorar, por conta das dificuldades de se armazenar o hidrogênio de forma gasosa, já que o gás é transportado e abastecido nos tanques de maneira comprimida a grandes pressões de até 10000 psi em alguns casos.



Figura 13 – Abastecimento de um Veículo *Fuel Cell* (<https://carroeletrico.com.br/blog/carros-hidrogenio/>)

A viabilidade do abastecimento e dada a partir da quantidade de postos temos disponíveis e quão cara é a implantação dessa tecnologia, visto que é muito mais vantajosa olhando pelo ponto de vista ecológico e o financeiro a cada dia vai melhorar com o lançamento de novos utilitários das marcas envolvidas no estudo da tecnologia, utilitários estes que vem com o objetivo maior autonomia com a quantidade de combustível armazenada. Então o estudo do armazenamento vem a partir das regiões aonde essa tecnologia vem aplicada podemos citar o estado da Califórnia nos Estados Unidos, que tem 33 postos ativos e pretende chegar a 100 postos de hidrogênio até 2019.

Como uma fonte de energia limpa o hidrogênio ganha vantagens sobre os carros elétricos exatamente nesse ponto, para se abastecer um tanque de hidrogênio com 5 kg do gás leva cerca de 3 minutos, já o carro elétrico leva em média 40 minutos para que ele possa atingir 80% da carga da sua bateria.

4.4. Armazenamento

O armazenamento dos veículos *fuel cell* vem avançando em duas formas, tanto no desenvolvimento do tanque dos utilitários e em maneiras mais eficientes e viáveis de armazenar o gás como de maneira líquida ou até com substâncias que quando aquecidas liberam moléculas de hidrogênio para que o mesmo ao contato com o ar conceda corrente elétrica de grandezas de maneira que possamos alimentar o motor elétrico, motor esse que torna essa tecnologia limpa, o que se dá muita importância nos dias de hoje, por isso esse segmento automobilístico tende a crescer nos próximos anos, assim como o mesmo vem crescendo em alguns países.

O hidrogênio é armazenado de acordo com o projeto da montadora, geralmente na parte de baixo da carroceria (figura 14), geralmente de baixo do banco traseiro, e a célula de combustível, responsável pela conversão do hidrogênio em corrente elétrica, no centro do veículo responsável pela alimentação do motor elétrico.



Figura 14 – Tanque de Hidrogênio localizado abaixo dos bancos do veículo
(<https://carroeletrico.com.br/wp-content/uploads/2017/12/Mirai-interior-2-1024x665.png>)

O reservatório de hidrogênio é composto por materiais compósitos os quais contém fibra de carbono e alguns filamentos. Os materiais têm que alinhar leveza, que para um projeto automobilístico é essencial por conta de o rendimento do carro ser

relacionado diretamente com o seu peso, e tem que ser resistente suficiente para aguentar o hidrogênio comprimido e se adaptar as variações de volume do mesmo por conta do volume do gás.

4.5. Questão Ambiental Do Combustível Hidrogênio

O hidrogênio é um combustível renovável, inesgotável e sobretudo limpo, o que o torna naturalmente mais atraente quando comparado as contrariedades relacionadas na obtenção do petróleo, que além de ser poluente e não-renovável, sua predominância está situada na região do Oriente Médio, cuja região possui uma série de dificuldades, sendo elas política, econômica, entre outras, ocasionando assim, estorvos na sua extração em alguns casos.

A utilização do hidrogênio como combustível de veículos automotores está tendo um crescente de suma importância no mercado atualmente. Isto tem ocorrido, única e exclusivamente, porque os veículos convencionais vem apresentando alguns problemas relacionados a utilização de combustíveis fósseis como meio de impulsão desses automóveis, principalmente quando tais questões estão relacionadas ao meio ambiente, pois os órgãos que utilizam da legislação para fazer o controle e atenuação das questões ambientais, com o passar dos anos, andam cada vez mais rígidos e menos coniventes com a emissão de poluentes lançados na atmosfera.

Quando um veículo automotor utiliza dessa ferramenta como propulsor, seu funcionamento ocorre com o hidrogênio puro se movimentando do tanque em direção ao motor, onde esse entra em contato com o ar, através desse choque de elementos, a reação obtida é capaz de gerar uma corrente elétrica que futuramente será utilizada como fonte de alimentação para o motor elétrico e as impurezas criadas provenientes dessa reação são os vapores de água, que, como produto final, possui um teor de toxicidade ou grau de contaminação ao meio ambiente muito menor quando se comparado aos gases expelidos por motores que utilizam combustíveis fósseis e o calor é dissipado.

Outra forma de utilização e a mais comum não é o hidrogênio puro, pois encontra-se uma certa dificuldade na obtenção deste combustível de forma pura, em

consequência disso, utiliza-se baterias de células que adquire o hidrogênio de combustíveis fósseis, tais como o gás natural (GNV). Embora este método ainda produza poluentes, esses gases obtêm um poder tóxico ou de contaminação inferiores aos adquiridos através de outros métodos, como motores de combustão interna ou de usinas termelétricas.

Através do uso das células a combustível tem geração de energia em torno de 0,7V. Tal característica modular unida ao fato da produção de energia limpa habilita a possibilidade da geração distribuída de energia, conseqüentemente reduzindo custos e impasses com a transmissão, como por exemplo.

4.6. Autonomia De Veículos Automotores

Quando uma pessoa pretende investir o seu dinheiro na compra de um automóvel uma das questões mais importantes é a autonomia que esse veículo possui. Esse quesito é de suma importância para obtenção desse bem. A autonomia de um veículo é a capacidade que ele tem de utilizar o combustível que o propulsiona de forma eficaz e tendo o melhor custo benefício possível.

Os projetistas, estando ciente da importância desse tema, vem trabalhando forte na implementação de tecnologias para aumentar cada vez mais a autonomia que esses automóveis devem possuir. Atualmente a tecnologia que vem dando resultado no ramo é a implementação de carros com motores híbridos e elétricos. Tais motores tem elevado a autonomia desses automóveis consideravelmente.

Os veículos híbridos demonstraram uma grande melhoria da autonomia dos motores quando comparado aos motores propulsionados por combustíveis fósseis. Podemos citar o Toyota Prius como exemplo, cujo mesmo pode obter uma autonomia de 812 km, com um consumo médio de 18,9 km/l na cidade (dados obtidos do site da Toyota), porém eles necessitam de um tempo relativamente grande para abastecer.

Já os veículos propulsionados a hidrogênio possuem uma autonomia tão elevada quanto aos híbridos e elétricos, com a vantagem de poluir menos e com o abastecimento mais rápido, o que deixa a utilização dessa tecnologia ainda mais atraente. O Toyota Mirai (Figura 14), em questão de autonomia, está bem próximo aos híbridos, tendo números em torno de 500 km, obtendo consumo médio de 28,5 km/l (dados obtidos pela Agência de Proteção Ambiental - EPA- sigla em inglês).

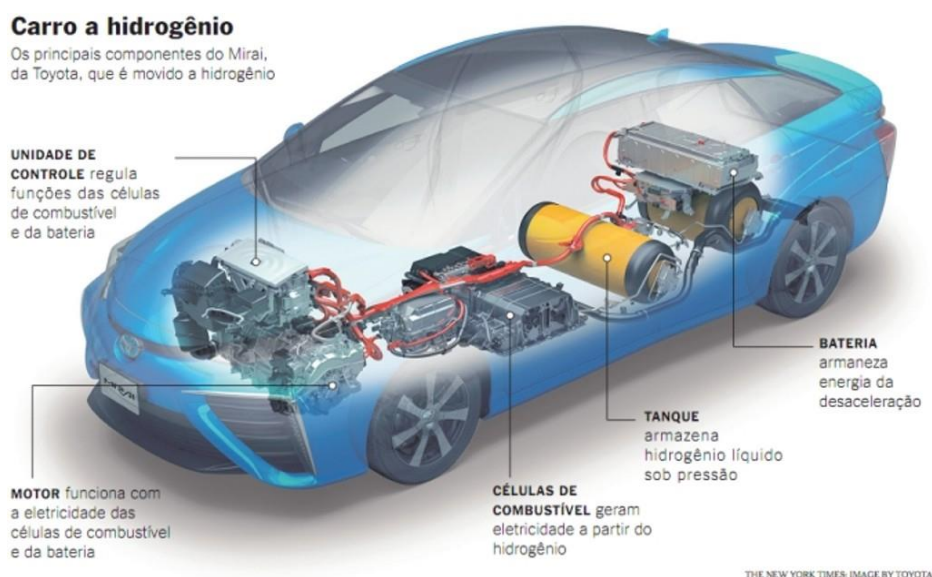


Figura 15 – Principais componentes do Mirai da Toyota

(https://www.gazetadopovo.com.br/ra/mega/Pub/GP/p4/2015/01/20/Mundo/Imagens/Vivo/carro_hidrogenio_20115.jpg)

4.7. Consumo

O consumo de combustível de um veículo e sua autonomia são uma das vertentes que devem ser muito bem analisadas na compra dele, pois são essas propriedades que definem o quão rentável será esse automóvel a curto, médio e longo prazo, para o tamanho do investimento que será feito.

Autonomia nada mais é do que o tempo de durabilidade de funcionamento de um sistema ou equipamento sem a necessidade de recorrer à alimentação ou recarga através de fonte externa. A autonomia veicular resume-se na distância percorrida por um veículo com um tanque cheio com a dispensabilidade de reabastecimento. Essa

propriedade dos automóveis vem sendo cada vez mais indispensável no mercado atual, pois o consumidor quer ter o menor gasto possível com despesas fixas relacionadas ao seu veículo.

Associado a autonomia, o consumo médio veicular é tão importante quanto, pois através do mesmo é possível planejar e controlar os gastos com combustível para determinado veículo. O consumo médio é a fração que divide o intervalo em quilômetros, percorrido pelo automóvel, pela quantia em litros, consumida de combustível.

$$C_M = \frac{S}{v}$$

Onde:

- C_M – Consumo Médio
- S – Distância (km)
- v – Volume do tanque (L)

Recentemente uma tecnologia vem ganhando espaço e dando resultado na área de produção, que foi a implementação de automóveis com motores híbridos e elétricos. Tais motores trouxeram um melhor consumo e como consequência disso aumenta a autonomia veicular.

Os veículos propulsionados por motores híbridos demonstraram um aumento considerável quando comparado aos motores tradicionais, o qual utiliza de combustíveis fósseis como meio de propulsão. Através de dados obtidos pela Toyota, citamos o Prius, carro cuja tecnologia de motores híbridos já foi implementada alguns anos atrás. O modelo 2018, possui em sua ficha técnica uma autonomia de 812 km, atingindo assim um consumo médio urbano em torno de 18,9 km/l. Porém essa tecnologia possui um revés que é o tempo de abastecimento, por ser um veículo híbrido, ele necessita de várias horas parado para o abastecimento total de sua bateria.

No caso dos automóveis propulsionados pelo hidrogênio, dispõem de uma autonomia tão elevada quanto aos híbridos e elétricos com o benefício de poluir menos e possuir um abastecimento muito mais rápido, o que propicia a utilização dessa tecnologia no mercado. O Toyota Mirai é um lançamento da Toyota que adota essa tecnologia. Alguns desse modelo estão sendo testados no Japão e na Europa. De acordo com dados obtidos da empresa, o automóvel garante uma autonomia aproximadamente de 500 km, atingindo um consumo médio urbano de 28,5 km/l (Dados obtidos pela EPA – Agência de Proteção Ambiental – sigla em língua estrangeira inglesa).

4.8. Funcionamento

A tecnologia da célula de combustível, também chamada de pilha de combustível, tem funcionamento simples e prático, é um dispositivo de conversão contínua, transformando energia química em energia elétrica (figura 16). A pilha é constituída de dois eletrodos revestidos por catalisadores ligados por uma membrana de troca de prótons (PEM - proton exchange membrane), um eletrodo chamado de ânodo, onde ocorre a oxidação e representa o polo negativo. E outro eletrodo, chama de cátodo, representa o polo positivo. O hidrogênio é admitido no interior da célula do lado do ânodo revestido por um catalisador, sendo que parte do hidrogênio passa diretamente pelo canal de fluxo e não é utilizado, retornando para o exterior da célula. A parcela do hidrogênio que foi captada pelo ânodo catalisador será dividida em elétrons e prótons. Os elétrons são conduzidos até uma bateria para armazenamento de carga ou diretamente para o motor elétrico para alimentá-lo. Os prótons viajam através da membrana para chegar ao cátodo, onde o catalisador combina esses prótons com parte dos elétrons que retornam do sistema e com o oxigênio do ar. O resultado dessa combinação é calor e vapor de água, constituído por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio (H₂O).

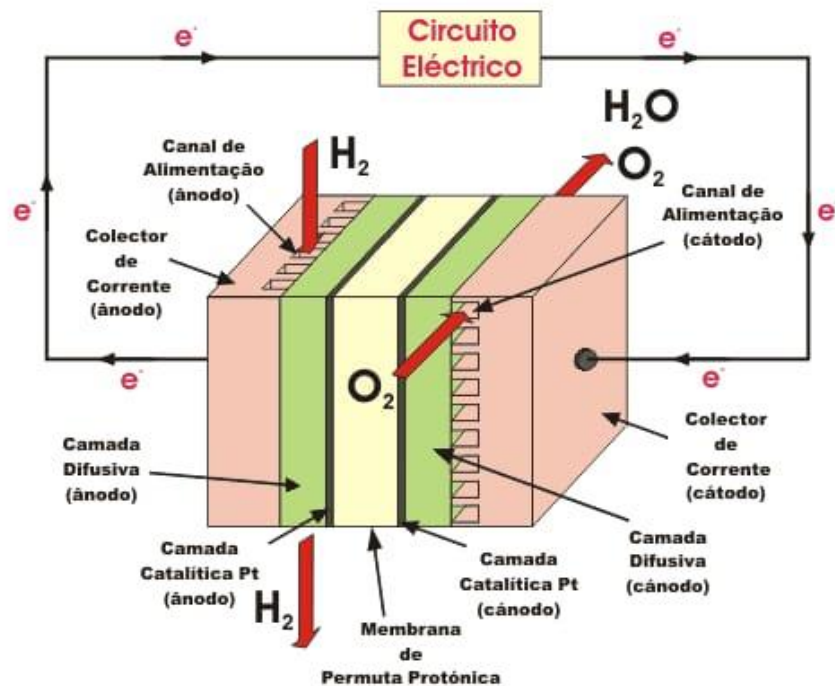


Figura 16 - Funcionamento da célula de combustível
 (<https://celulascombustiveis.wordpress.com/>)

O hidrogênio que será admitido na célula de combustível fica armazenado em reservatórios de fibra de carbono e para garantir um centro de gravidade mais baixo ao veículo são posicionados na parte dianteira e na parte traseira, sempre abaixo dos bancos. Esses reservatórios são responsáveis por armazenar o hidrogênio com segurança sob alta pressão, até que o gás seja conduzido por meio de linhas de alta pressão até o interior da célula de combustível. Na célula ocorre uma oxirredução e elétrons do hidrogênio são liberados e conduzidos pelo catalisador através de uma corrente elétrica até a bateria que será responsável pelo armazenamento dessa carga que, posteriormente, alimentará o motor elétrico e transformará essa energia elétrica em energia cinética para as rodas. A partir daí o funcionamento convencional é o mesmo dos veículos elétricos ou híbridos.

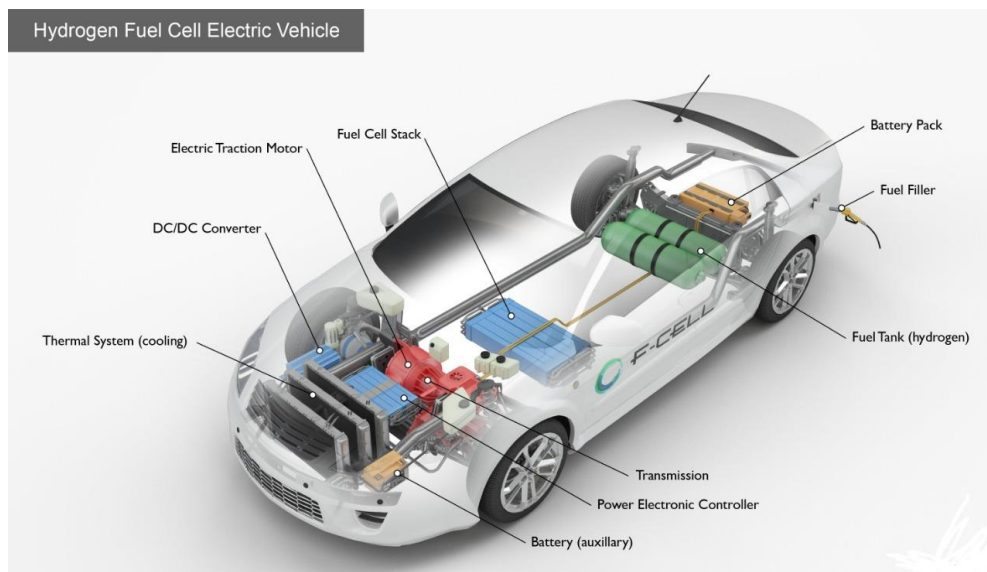


Figura 17 – Componentes de um Veículo *Fuel Cell* (<http://mai.org.my/hydrogen-fuel-cell-vehicles-a-quick-look/>)

O tempo de abastecimento muito inferior aos veículos “plug-in” elétricos e híbridos é traduzido em números quando levamos em consideração que o tempo médio para recarregar 80% da bateria dos veículos híbridos é de 40 minutos e o abastecimento completo de um veículo com células de combustível é de 4 a 5 minutos. A autonomia dos FCV também é consideravelmente superior à de veículos exclusivamente elétricos. Por outro lado, é uma tecnologia mais cara e as células de combustível, apesar de mais leve que as baterias convencionais, possuem maior custo de fabricação. E não há ainda estrutura para atender veículos movidos à célula de combustível com exceção de alguns países da Europa e o estado da Califórnia nos Estados Unidos.

Os carros FCV possuem também um sistema de frenagem regenerativa, assim como a maioria dos carros elétricos e híbridos, onde parte da energia cinética que seria dissipada na forma de calor durante as frenagens é transformada em energia elétrica e utilizada para recarregar essa bateria. Dessa forma, a bateria é capaz de manter o motor em funcionamento e o veículo em movimento mesmo após os tanques de hidrogênios estarem vazios, apesar da autonomia dessas baterias não serem impressionantes, na casa de 50 quilômetros.

4.9. Custo De Desenvolvimento, Fabricação e Aquisição

A razão pela qual ocorra divergência no pensamento de empresas em relação à estratégia do mercado atual e o mercado futuro é explicada não pelas dificuldades técnicas e necessidade de investimentos altos, mas sim pelas alianças que foram estabelecidas para o desenvolvimento de tal tecnologia. A Toyota, por exemplo, firmou parceria com a BMW, para desenvolver tecnologias voltadas para a área de hidrogênio, conhecendo o histórico da marca alemã no assunto. A Honda também estabeleceu, em 2017, com a *General Motors Company* (GM) um acordo para a criação de uma unidade de produção de células de combustível em Detroit nos Estados Unidos da América. A GM foi a primeira marca a exibir veículos movidos a células de combustível, no ano de 1966, com uso da tecnologia que havia sido desenvolvida para o programa espacial da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Mais tarde, no ano de 2007, a GM trouxe à tona um grande programa com cerca de 100 veículos Chevrolet *Equinox Fuel Cell*, que percorreram mais de cinco milhões de quilômetros em condições reais, nas mãos de utilizadores normais. Acordos entre empresas como estes, viabilizam o avanço da tecnologia e a redução nos custos de desenvolvimento e pesquisa.

Os valores finais dos veículos movidos à célula de combustível ainda são números altos e por isso, não podem ser acessíveis por grande parte da população. Muitas empresas estão utilizando de artifícios na hora de atrair o tipo de consumidor que procura utilizar pela primeira vez o FCV (*Fuel Cell Vehicle*). A Toyota, por exemplo, está dando aos consumidores que desejam possuir um Toyota Mirai (Figura 17), isenção no valor das revisões para os três primeiros anos e um auxílio combustível no valor de 15 mil dólares, dessa forma, aumentando consideravelmente o número de exemplares do modelo rodando pelas ruas da Califórnia nos Estados Unidos da América. O preço final do veículo para o consumidor é de 58 mil dólares, no câmbio atual representado por um pouco mais de 214 mil reais. Já o Clarity *Fuel Cell* (Figura 18) é vendido para empresas no Japão, desde o ano de 2016, por valores equivalentes a 68 mil dólares, aproximadamente 250 mil reais, no câmbio atual.



Figura 18 – Toyota Mirai (https://t1-cms-1.images.toyota-europe.com/toyotaone/ptpt/01_tcm-3032-276211.jpg)



Figura 19 – Honda Clarity Fuel Cell (<https://allthecars.files.wordpress.com/2015/10/honda-clarity-fuel-cell-fcv-2.jpg>)

O processo de produção do hidrogênio para FCV ainda é considerado caro e não vantajoso para as empresas, pois se faz necessário que o hidrogênio seja vendido a preços altos nos postos de hidrogênio. Na Califórnia o preço médio do hidrogênio, que é vendido à quilograma, é de 15 dólares por quilo. Incentivos por parte dos governos e o aumento da frota de FCV seriam cruciais para reduzir drasticamente os valores cobrados diretamente ao consumidor final.

Não se tem indícios, até o momento, de que as montadoras tenham interesse em trazer esta tecnologia para o Brasil. Mas incentivos já estão sendo viabilizados pelo governo para a utilização de FCV, como por exemplo, os impostos para importação serem zero para esse tipo de veículo e incentivos fiscais para veículos híbridos e elétricos.

4.10. Eficiência

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, energia não pode ser criada, mas sim transformada. Esse termo representa a capacidade de um determinado corpo de realizar trabalho ou gerar força em um sistema físico ou substância. O que faz os veículos se locomoverem é a transformação da energia elétrica contida nas baterias em energia mecânica através dos motores e posteriormente em energia cinética para as rodas dos automóveis.

Quando falamos em eficiência, ou rendimento, estamos falando da parcela energética que efetivamente será transformada em trabalho, descontando a parcela que não será utilizada e irá se dissipar na forma de energia térmica, o calor, e nos subprodutos desse processo de transformação. O que ocorre dentro das células de combustível é a transformação da energia atômica contida nos átomos de hidrogênio em energia elétrica através do processo químico chamado eletrólise. Obtemos dessa transformação além de energia elétrica, calor e a formação de moléculas de água.

É impossível falar da eficiência energética dos veículos movidos a células de combustível, processo de oxirredução, e não comparar com a eficiência dos motores tradicionais, processo de combustão. Os motores Ciclo Otto são capazes de converter em média apenas de 18 a 22% da energia presente no combustível em trabalho efetivo. Já os motores à Ciclo Diesel conseguem um rendimento pouco superior, algo próximo de 25%. A eficiência dos motores a células de combustível alcança, facilmente, valores entre 35 e 60%, e os produtos gerados nesse processo são apenas calor e vapor de água, bem diferente dos processos à combustão que produzem gases poluentes como o CO e o HC.

É inaceitável continuar com uma tecnologia que não aproveita 75% da energia contida em seu combustível. O hidrogênio, a longo prazo, será o combustível mais utilizado do mundo, não só nos automóveis, como em indústrias, residências e eletrodomésticos.

4.11. Viabilidade

O hidrogênio já provou ser, não só viável, como o combustível do futuro (tabela 3). Estudos sobre o uso do hidrogênio como combustível para motores a combustão, sejam eles com ignição por compressão ou por centelha, estão avançados e alguns já concluídos, comprovam a viabilidade do combustível. No motor a combustão com ignição por compressão temos a necessidade de um pré-aquecimento desse gás, antes de sua admissão na câmara de combustão, ou até mesmo taxas mais altas de recirculação dos gases gerados no processo de compressão, solicitações que dificultam e não viabilizam a utilização do hidrogênio dessa maneira. No uso do hidrogênio como combustível para motores a combustão com ignição por centelha temos a necessidade de retardar a injeção de hidrogênio até o terceiro estágio, estágio da compressão, por se tratar de um motor quatro tempos, gerando assim dificuldade de se manter a rotação do motor controlada devido a detonações antes do tempo desejado. Uma correta relação estequiométrica é necessária em ambos os motores, isso representa que o controle da quantidade de ar/hidrogênio admitida na câmara de combustão garantirá uma mistura rica ou uma mistura pobre. Essa mistura é diretamente responsável pela eficiência do motor e pela geração de gases de combustão. Alguns testes já foram realizados com motores ciclo Otto e ciclo Diesel, funcionando com o gás hidrogênio como combustível, porém os resultados não são satisfatórios o suficiente para viabilizar e iniciar a produção de veículos com motores a combustão trabalhando com o hidrogênio. No ponto de vista ambiental, o hidrogênio não emite poluentes mesmo nesse processo de combustão, e o nível de NOx emitido é baixo se algumas precauções forem tomadas. No ponto de vista financeiro, o maior custo para fabricação de um sistema desse, sistema que se assemelha bastante com o sistema de GNV (Gás Natural Veicular), que utiliza o gás metano como combustível, é oriundo da fabricação dos cilindros de armazenamento de hidrogênio, já que este necessita ser mantido a altas pressões e os materiais desses cilindros devem ser, em sua maior parte, constituídos de materiais de última tecnologia, como fibra de carbono e outros. Além de analisar o custo de fabricação, se faz necessário analisar a vida útil desse sistema, e sua manutenção. Dessa forma as pesquisas e o desenvolvimento de protótipos para serem utilizados em situações reais, por usuários comuns, em período determinado de tempo são obrigatórios para conhecer o desgaste natural do

sistema e os agentes externos como corrosão, já que nesse processo o hidrogênio sofre uma oxidação. E é nesse ponto que os motores a combustão de hidrogênio se tornam inviáveis devido a problemas com rotação e necessidade de pré-aquecimento do gás.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
✓ Não emite nenhum tipo de óxido de carbono. Não polui, tudo que é emitido na atmosfera é água.	x Custo de fabricação elevado.
✓ Maior autonomia em relação aos veículos elétricos.	x Produção ainda em pequena escala.
✓ Tempo de abastecimento menor em relação aos veículos elétricos.	x O processo de produção do hidrogênio através da hidrólise ainda é caro.
✓ Manutenção fácil e vida útil próxima de um motor à combustão.	x Não há infraestrutura suficiente para abastecer à uma grande frota de veículos movidos à hidrogênio.
✓ Sistema totalmente seguro.	

Tabela 3 – Vantagens e Desvantagens da utilização do hidrogênio

A solução para a utilização do hidrogênio como combustível foi encontrada no desenvolvimento das células de combustível, ou pilhas de combustível, em um processo químico, a eletrólise, que consiste em dividir o átomo de hidrogênio em elétrons e prótons. Um canal de fluxo admite o hidrogênio e os elétrons são captados por um eletrodo de polo negativo e conduzidos até a bateria para armazenamento de carga, já os prótons são conduzidos por uma membrana até o eletrodo de polo positivo onde se juntam novamente a elétrons formando átomos de hidrogênio e esses átomos se unem a átomos de oxigênio, produzindo uma corrente elétrica, calor e água. Do ponto de vista ambiental, não há contraindicações, essa é a melhor alternativa para substituição dos combustíveis fósseis, pois os veículos

com células de combustível não geram poluentes como monóxido de carbono e hidrocarboneto. No ponto de vista financeiro as células de combustível possuem valores altos e sua produção ainda é em pequena escala, o que ajuda a elevar os preços finais dos veículos. Os reservatórios também possuem um custo elevado. No ponto de vista da confiabilidade, a vida útil é a mesma de um veículo com motor a combustão e sua manutenção fácil de ser realizada.

Outra dificuldade e que ainda afasta boa parte dos possíveis clientes de um FCV desistir da compra é abastecer o veículo, apesar de existir, na Europa, países que estão em níveis avançados de infraestrutura com postos de hidrogênio, e possuem protótipos de ônibus rodando inteiramente com o uso de hidrogênio produzindo energia através das células de combustível. O estado da Califórnia nos EUA é outra referência, com 11 postos de abastecimento espalhados por toda sua extensão, com o auxílio do governo na isenção de impostos, a maioria dos carros utilizados por empresas são veículos movidos a pilha de combustível.

4.11.1. Viabilidade no Brasil

Hoje a frota brasileira é composta em sua massiva maioria de veículos a combustão, e que emitem todos os dias gases poluentes prejudicando não só a qualidade do ar nas cidades, como também a saúde das pessoas e do meio ambiente. Os carros híbridos começaram a ser popularizados recentemente e o índice desses veículos trafegando pelas ruas ainda é extremamente baixo. Não há no Brasil produção de veículos com células de combustível, todos os que percorrem nossas ruas são automóveis importados. O governo garante a isenção dos impostos de importação para esse tipo de veículo como forma de incentivar essa tecnologia. O verdadeiro problema hoje é que não há infraestrutura para atender uma frota de veículos com célula de combustível já que não existem postos de hidrogênios que atendam diretamente aos proprietários destes veículos.

5. CONCLUSÃO

O hidrogênio é o elemento com maior abundância no planeta terra com possibilidades inexploradas até o momento. Com o desenvolvimento de tecnologias para utilização desse gás como combustível temos a certeza de que estamos diante do combustível do futuro. Seu poder calorífico, quando utilizado dessa forma, é consideravelmente maior do que os outros combustíveis fósseis. O rendimento é muito superior aos outros combustíveis, podendo ser até quatro vezes maior.

Através do processo químico conhecido como eletrólise, é possível separar os átomos de hidrogênio e oxigênio contidos nas moléculas de água. Existem ainda algumas dificuldades para o seu total armazenamento, mas ele é armazenado em tanques à alta pressão e podem ser facilmente abastecidos em postos de hidrogênio. Para fornecer energia elétrica aos motores elétricos, é necessário o uso de células de combustível que por meio de eletrodos fazem a separação dos elétrons e prótons contidos nos átomos de hidrogênio.

Suas questões ambientais são muito melhores que a de qualquer outro tipo de combustível consumido atualmente, pois após a sua utilização ocorre a liberação apenas de vapor de água. O custo desses automóveis é bastante elevado, mas com o desenvolvimento e melhora da tecnologia, podemos ter certeza de um futuro mais limpo e rentável.

Por fim, levando em consideração todos os seus pontos, podemos concluir que é um combustível absolutamente viável, seu armazenamento ainda é uma dificuldade, mas o estudo já está evoluindo e já existem tanques com pleno funcionamento e seu único ponto negativo é a questão econômica, pois é necessário um grande investimento para a criação e evolução da tecnologia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aleiferis P., Rosati M., Hydrogen SI and HCCI combustion in a direct-injection optical engine, SAE Paper No. 2009-01-1921 (2009).

Apostolescu N., and Chiriac R., A Study of Combustion of Hydrogen-Enriched Gasoline in a Spark Ignition Engine. SAE Paper (2006).

Azuaga D., Danos Ambientais Causados por Veículos Leves no Brasil (Rio de Janeiro), 2000, XV, 168p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Planejamento Energético, 2000). D'Errico G., Onorati A., Ellgas S., 1d thermo-fluid dynamic modelling of an SI singlecylinder H₂ engine with cryogenic port injection, Int. J. Hydrogen Energy 33 5829– 5841 (2008).

Das L. M., Exhaust Emission Characterization of Hydrogen Operated Engine System: Nature of Pollutants and Their Control Techniques. International Journal of Hydrogen Energy, 16:765–75 (1991).

Das L. M., Near-Term Introduction of Hydrogen Engines For Automotive and Agriculture Application. International Journal of Hydrogen Energy, 27:479–87. (2002).

Heindl R., Eichseder H., Spuller C., Gerbig F., Heller K., New and in-novative combustion systems for the H₂-ICE: Compression ignition and combined processes, SAE Paper No. 2009-01-1421 (2009).

Heller K., Ellgas S., Optimisation of a hydrogen internal combustion engine with cryogenic mixture formation, 1st (Int.) Symp. on Hydrogen Internal Combustion Engines 49–58 (2006).

Jingding L., Formation and Restraint of Toxic Emissions in Hydrogen-Gasoline Mixture Fueled Engines. International Journal of Hydrogen Energy, 23:971-5 (1998).

Welch A., Mumford D., Munshi S., Holbery J., Boyer B., Younkins M., Jung H., Challenges in developing hydrogen direct injection technology for internal combustion engines, SAE Paper No. 2008-01-2379 (2008).

White C. M., Steeper R. R., Lutz A E.. The Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: A Technical Review. International Journal of Hydrogen Energy, 31:12921305 (2006).

Wimmer A., Wallner T., Ringler J., Gerbig F., H₂-direct injection a highly promising combustion concept, SAE Paper No. 2005-01-0108 (2005).

Yilmaz, A. C., Design and applications of Hydroxy (HHO) System, MSc thesis, 2010.