

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA A GÁS
HIDROGÊNIO

Fernando Machado Grieco

São Paulo

2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA A GÁS
HIDROÊNIO

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de graduação em Engenharia

Fernando Machado Grieco

Orientador: Marcos de Mattos Pimenta

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2014

Grieco, Fernando Machado

**Análise de motores de combustão interna a gás
hidrogênio/F.M.Grieco. – São Paulo, 2014.**

40p.

**Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Motor de combustão interna 2. Gás hidrogênio. Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia
Mecânica II.t.**

RESUMO

Identificar e analisar os princípios de funcionamento de um motor de combustão interna, em que se utiliza gás hidrogênio como combustível. Discutir vantagens e desvantagens de sua utilização, bem como sua aplicabilidade, principalmente em veículos automotivos, considerando o atual estágio de desenvolvimento desta tecnologia. Fornecer alguns parâmetros de operação e estudos/experimentos que comprovem sua viabilidade em configurações de motores já existentes. Além disso, será discutido sua utilização em um veículo automotivo, já existente, o *Hydrogen 7* da empresa automotiva BMW, capaz de converter a energia proveniente do hidrogênio combustível em seu motor de combustão interna.

ABSTRACT

Identify e analyze the functional principles of an internal combustion engine that runs on hydrogen fuel gas. Discuss the advantages and disadvantages of it usage, and also discuss its feasibility, especially in automotive vehicles, considering the present technology. Explain some technical parameters and studies/tests that can prove its viability in existing kinds of engine. Furthermore, it presents a discussion about a real commercial car, the *Hydrogen 7*, from BMW, that can convert the energy from hydrogen fuel inside its internal combustion engine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Esquema de funcionamento de injeção, de ignição por faísca de hidrogênio

Figura 02 – Disposição do injetor e faiscador

Figura 03 – Aparato experimental

Figura 04 – Parâmetros investigados para $\theta_j = 300^\circ$

Figura 05 – Parâmetros investigados para $\theta_j = 130^\circ$

Figura 06 – Variação do rendimento volumétrico para $\theta_j = 130^\circ$ e

$$\theta_j = 300^\circ$$

Figura 07 – Otimização para $\phi = 0,5$

Figura 08 – Otimização para diferentes ϕ e θ_j

Figura 09 – Variação de rendimentos térmicos para vários ϕ

Figura 10 – Calor liberado para variação de ϕ

Figura 11 – Variação da emissão para vários ϕ

Figura 12 - Aparato experimental [13]

Figura 13 – Modelo do injetor utilizado [13]

Figura 15 – Comparações de emissões entre Diesel e H_2 [13]

Figura 16 – Curva de potência x rotação para diferentes porcentagens de H_2 na mistura injetada

Figura 17 – Curva de torque x rotação para diferentes porcentagens de H_2 na mistura injetada

Figura 18 – Curvas de rendimento x rotação para diferentes porcentagens de H_2 na mistura injetada

Figura 19 - Emissões de NO_x variando as porcentagens de H_2 na mistura injetada

- Figura 20 – Emissões de CO₂ variando as porcentagens de H₂ na mistura injetada
- Figura 21 – Emissões de CO variando as porcentagens de H₂ na mistura injetada
- Figura 22 – Disposição do tanque que armazena hidrogênio no carro *Hydrogen 7*
- Figura 23 – Curvas de performance real do carro *Hydrogen 7*
- Figura 24 – Curvas de torque e potencia por rotação de um carro popular (Renault Clio)

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01-Comparação energética de combustíveis
- Tabela 02- Outras propriedades do hidrogênio e da água
- Tabela 03- Inflamabilidade e relações combustível-ar
- Tabela 04- Mistura estequiométrica e propriedades
- Tabela 05- Propriedades de Pré-ignição de diversos combustíveis
- Tabela 06 - Características do motor testado
- Tabela 07 – Comparação entre rendimentos e potências entre a injeção diesel e hidrogênio [13]
- Tabela 08 – Especificações do motor Diesel

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) - Reação de combustão do hidrogênio

Equação (2) - Rendimento Térmico do ciclo Otto

Equação (3) – Relação combustível-ar estequiométrico

Equação (4) - Definição do Índice de equivalência

Equação (5) – Rendimento Térmico de Frenagem

Equação (6) – Balanceamento da Reação de Combustão do Diesel

Equações (7) e (8) - Balanceamento da Reação de Combustão da
Mistura Diesel e H_2

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

θ_i : Ângulo do virabrequim no qual representa o instante da ignição

θ_j : Ângulo do virabrequim no qual representa o instante da injeção

ϕ : Índice de equivalência

ICE: *Internal Combustion Engines* ou motores de combustão interna

MCI: Motores de combustão interna

H_2 ICE: Motores de combustão interna a gás hidrogênio

SI: *Spark Ignition* ou ignição por faísca

PME: Pressão média efetiva

PCI: Poder calorífico inferior

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 O COMBUSTÍVEL HIDROGÊNIO	1
1.2 FORMAS DE OBTENÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO GÁS HIDROGÊNIO	4
1.2.1 CÉLULAS COMBUSTÍVEIS	4
1.2.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA A GÁS HIDROGÊNIO (H ₂ ICE)	5
1.3 ENTRAVES TECNOLÓGICOS.....	6
1.4 APLICABILIDADE EM VEÍCULOS	6
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 PROPRIEDADES DO COMBUSTÍVEL	7
2.2 CARACTERÍSTICAS DA COMBUSTÃO	9
2.2.1 PROBLEMAS DA COMBUSTÃO.....	9
2.2.2 PRÉ-IGNIÇÃO	10
2.2.3 <i>BACKFIRE</i> OU RECUO.....	11
2.2.4 DETONAÇÃO OU <i>KNOCK</i>	11
2.3 MATERIAIS	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS	13
4. RESULTADOS	14
4.1 MOTORES DE IGNIÇÃO POR FAÍSCA	14
4.2 MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO	24
4.2.1 COMPRESSÃO DE HIDROGÊNIO PURO	24
4.2.2 COMPRESSÃO DE MISTURA DIESEL/HIDROGÊNIO	27
4.3 MOTORES WANKEL (ROTATIVOS).....	32
5. DISCUSSÃO.....	32
5.1 EXEMPLO REAL DE EMPREGO DO H ₂ EM MOTORES.....	32

6. CONCLUSÕES.....	36
7. REFERÊNCIAS:	38
8. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.....	39

1. INTRODUÇÃO

É evidente a atual dependência de combustíveis fósseis para a conversão de energia. Os derivados de petróleo, tais como a gasolina, são apontados como causadores de poluição atmosférica e aumento global de temperaturas. Em adição, sabe-se que esses tipos de combustível são recursos energéticos escassos, cujas reservas já possuem previsões de esgotamento, ainda nesse século.

A busca por fontes alternativas energéticas têm sido uma das questões chave do século XXI. Dentre muitas alternativas de substituição para o petróleo, o gás hidrogênio tem se tornado uma grande aposta.

A substituição da gasolina e óleo diesel nos motores de combustão interna de automóveis, por combustível formado de hidrogênio pode ter grande impacto no cenário atual.

1.1 O COMBUSTÍVEL HIDROGÊNIO

Apesar de ser apontado, por muitos autores, como o combustível do futuro, o hidrogênio tem sua utilização para o propósito energético prevista desde os primeiros modelos de células combustível em 1839 [5]. Entretanto, é curioso que uma aplicação de fato só tenha sido empregada na década de 60, durante a corrida espacial, em foguetes.

Tal utilização do hidrogênio apresenta vantagens expressivas sobre combustíveis fósseis, podendo ser aplicado em motores de combustão interna, por exemplo. Dentre as vantagens, a primeira é a que as quantidades de energia geradas são maiores que a maioria dos combustíveis de uso comercial, como a gasolina.

Na tabela 01 expõem-se as quantidades de calor liberadas a cada quilograma de combustível [1]. Nota-se que o poder calorífico do gás hidrogênio é cerca de 2,6 vezes maior que o da gasolina, indicando um grande potencial energético.

Tabela 01-Comparação energética de combustíveis [1]

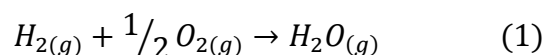
Combustível:	Poder Calorífico Superior (a 25°C e 1 atm)	Poder Calorífico Inferior (a 25°C e 1 atm)
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Outra comparação feita por [5] ilustrada na tabela 2, mostra as diferenças entre outras propriedades do hidrogênio puro e a gasolina.

Tabela 02- Outras propriedades do hidrogênio e da água [5]

Propriedades		hidrogênio	gasolina
Densidade	[Kg/m ³]	0.09	730 – 780
Ignição Limite	[Vol.%]	4 -76	1 –7.6
Energia mínima de ativação	[mJ]	0.02	0.24
Temperatura de auto-ignição	[°C]	585	>> 350
Velocidade laminar de chama	[m/s]	2.0	0.4 – 0.8
Densidade estequiométrica de mistura	[Kg/m ³]	0.94	1.42
Demanda estequiométrica de ar	[-]	34.3	14.7
Menor valor calorífico	[MJ/kg]	120	43.5
Razão específica de calor	[-]	1.4	1.1
Valor calorífico de mistura	[MJ/m ³]	3.2 ⁽¹⁾ 4.5 ⁽²⁾	3.9 ⁽¹⁾ 3.8 ⁽²⁾

A segunda razão é que, a reação de combustão do combustível hidrogênio, tem como produtos gasosos apenas a água, como se observa na equação simplificada descrita a seguir:



A ausência de carbono no combustível implica na não formação de compostos tais como CO, CO₂ e HC. Deste modo, percebe-se sua capacidade de produzir energia dita “limpa”. Destaca-se que no processo de queima real, no entanto, por não ser possível dispor de oxigênio puro no processo de combustão, outros gases podem ser gerados indesejavelmente.

Alguns autores [3,5] declaram a possibilidade dos motores gerarem compostos NO_x durante o processo, pois no ar atmosférico usado como comburente é inevitável a presença do nitrogênio na sua composição. Ainda sim, as quantidades produzidas são, teoricamente baixas, sendo o benefício, portanto, enorme, em termos de emissões e poluição atmosférica.

1.2 FORMAS DE OBTENÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO GÁS HIDROGÊNIO

O atual desenvolvimento tecnológico prevê que, os meios de utilização do gás combustível estão, basicamente, o uso de células combustíveis e de motores de combustão interna [4].

A seguir, será feita uma breve comparação entre os dois meios descritos.

1.2.1 CÉLULAS COMBUSTÍVEIS

Vantagens:

- Possuem zero de emissões. O hidrogênio reage, em um processo em que não se usa chama. O único produto da reação é a água.
- O processo é de uma eficiência maior que a da queima de gasolina. Segundo autores [5], o rendimento térmico pode ser cerca de 30% a 90 % mais eficientes que os motores atuais a gasolina.
- Estrutura e design simples, se comparada a motores, assegurando maior confiabilidade e menor probabilidade de falha de componentes mecânicos.
- Recarga rápida.

Desvantagens e problemas:

- Alto custo. Comercialmente inviáveis até o momento.
- Ausência de infraestrutura nas cidades que comportem as operações de recarga.
- Problemas técnicos referentes aos processos químicos e materiais. Mistura de gases atmosféricos às unidades produtoras alcalinas o que dificulta o processo de obtenção de energia. Devido a altas temperaturas (1000C°) materiais comerciais que as suportem não estão disponíveis.

1.2.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA A GÁS HIDROGÊNIO (H₂ICE)

Vantagens:

- Existência de uma economia e tecnologia associada a motores de combustão interna. Um novo combustível ajustaria a existente indústria e o existente modelo de produção à uma nova tecnologia adaptável (representariam uma transição econômica/tecnológica menos brusca)
- Baixo custo, se comparada com as células combustíveis.
- Maior rendimento térmico, se comparada a motores atuais.

Desvantagens e problemas:

- Existem problemas relacionados à combustão tais como pré-ignição e detonação do combustível.

- Existem dificuldades de armazenamento na forma gasosa devido à baixa densidade.
- Riscos de explosão quando armazenados na forma gasosa.

1.3 ENTRAVES TECNOLÓGICOS

Dentre as barreiras tecnológicas associadas ao uso do hidrogênio como geração de energia, estão os problemas de transporte e armazenagem.

Esses problemas estão sendo estudados por pesquisadores atualmente. Entretanto, não existe uma infraestrutura apropriada que viabilize o uso comercial do H₂ combustível. Produções locais podem ser a solução para transporte do gás e diversas técnicas de armazenamento têm sido desenvolvidas, tais como gás adsorvido, gás liquefeito, dentre outras. Entretanto, ainda não são tecnologias viáveis economicamente.

1.4 APLICABILIDADE EM VEÍCULOS

A aplicação de MCI em veículos é viável. Existem métodos para se utilizar o combustível de forma líquida ou pressurizada.

Na atualidade, já existem modelos de carro que utilizam ou o hidrogênio puro como combustível como os carros *H2R* e o *Hydrogen 7* da marca BMW, e muito se estuda da sua utilização em conjunto (misturas) com outros combustíveis tais como a gasolina e o diesel (tecnologia *Bi-fuel*). Uma análise prática de como esse combustível vem sendo utilizado nos carros da BMW será feita mais adiante.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROPRIEDADES DO COMBUSTÍVEL

Para se aplicarem modelos e realizar cálculos, algumas propriedades devem ser testadas experimentalmente.

No caso do hidrogênio as propriedades de: inflamabilidade, número de octanagem e energia de ignição são as mais importantes [7].

A tabela 03 informa tais propriedades e as compara a outros combustíveis, para condições locais de 1atm e 300K

Tabela 03- Inflamabilidade e relações combustível-ar [7]

Propriedade	hidrogênio	metano	iso-octano
Massa molecular (g/mol)	2.016	16.043	114.236
Densidade (kg/m ³)	0.08	0.65	692
difusividade (cm ² /s)	0.61	0.16	~0.07
mínima energia de ativação (mJ)	0.02	0.28	0.28
mínima distância de extinção de chama (mm)	0.64	2.03	3.5
inflamabilidade (%vol)	4.75	5-15	1.1-6
limite de inflamabilidade (λ)	10-0.14	2-0.6	1.51-0.26
limite de inflamabilidade (ψ)	0.1-7.1	0.5-1.67	0.66-3.85
poder calorífico inferior (MJ/kg)	120	50	44.3
temperatura de auto-ignição (K)	858	723	550
velocidade de chama(1/ms)	1.85	0.38	0.37-0.43
razão ar-combustível estequiometrica (kg/kg)	142	55.5	47.8
razão ar-combustível estequiometrica (kmol/kmol)	34.2	17.1	15
	2.387	9.547	59.666

Desta tabela, destaca-se o limite de inflamabilidade, que no caso do hidrogênio é de 4 a 75%, isso indica que a proporção de combustíveis podem

estar presentes na mistura de modo que ocorra a inflamação. Isso indica que o hidrogênio pode trabalhar tanto em misturas ricas como pobres, preferindo-se as misturas pobres devido uma combustão mais completa, maior economia de combustível e menores emissões [6,7].

Outra tabela, tabela 04 [7], mostra o hidrogênio em duas condições de combustão: uma estequiométrica ($\varphi = 1$) e mistura pobre ($\varphi = 0,25$), sendo interessante observar a velocidade de propagação de chamas, que será analisada mais adiante, (condições de 1 atm. e 300K).

Tabela 04- Mistura estequiométrica e propriedades [7]

Propriedade	H ₂ -air $\lambda = 1$ $\varphi = 1$	H ₂ -air $\lambda = 4$ $\varphi = 0.2$
Fração Volumétrica (%)	29.5	9.5
Densidade da mistura (kg/m ³)	0.85	1.068
Viscosidade cinemática (mm ² /s)	21.6	17.4
Temperatura de auto-ignição (K)	858	> 858
Temperatura adiabática de chama (K)	2390	1061
Condutividade térmica (10 ⁻² W/mK)	4.97	3.17
Difusividade térmica (mm ² /s)	42.1	26.8
razão entre calores específicos	1.401	1.4
velocidade do som (m/s)	408.6	364.3
razão ar combustível (kg/kg)	34.2	136.6
razão molar antes/depois de combustão	0.86	0.95
velocidade laminar de chama ~360 K (cm/s)	290	12
energia gravimétrica (kJ/kg)	3758	959
energia contida no volume (kJ/m ³)	3189	1024

Observa-se também a mínima energia de ignição do combustível estudado como sendo a menor entre os três, indicando que uma mistura pobre possa ser queimada assegurando uma queima adequada, completa. Entretanto, isso pode significar que o hidrogênio sofra anomalias de combustão, que serão comentadas mais adiante.

A alta temperatura de autoignição propicia um alto rendimento térmico. Segundo o ciclo padrão a ar de Otto, o rendimento térmico é dado segundo a equação (2). Tendo uma alta taxa de compressão, o rendimento térmico será maior. A temperatura de ignição alta, cerca de 858K, proporciona uma temperatura T_2 do ciclo maior.

$$T_2 = T_1(rc)^{k-1} \quad (2)$$

Pela tabela, são notáveis os altos níveis de difusividade e a baixíssima densidade do H_2 . Tais características, na realidade, são as que implicam em uma dificuldade para armazenamento do hidrogênio.

2.2 CARACTERÍSTICAS DA COMBUSTÃO

2.2.1 PROBLEMAS DA COMBUSTÃO

Os problemas decorrentes do uso do gás hidrogênio dentro do cilindro do motor são os mesmos que os dos motores convencionais. São conhecidos como anomalias de combustão, entre elas pode-se citar a pré-ignição e a detonação. Devido a características de pequena energia de ignição, alta faixa de inflamabilidade e altas taxas de velocidade de propagação de chama, o hidrogênio entra em combustão com facilidade [7].

A pré-ignição e detonação são estudadas com relevância [6,7]. Esses fenômenos devem ser controlados para que se tenha que o projeto do motor seja suficiente para resistir esforços principalmente no cabeçote, pistões e válvulas do motor. O hidrogênio, pelas características anteriormente citadas, entra em combustão com facilidade sendo, portanto, a consideração de tais anomalias no projeto algo fundamental.

A tabela 05 [6] quantifica esses efeitos explicados anteriormente, bem como algumas características da chama formada, não só do H_2 , mas também da gasolina e do GNV.

A seguir serão discutidos alguns destes problemas em maiores detalhes.

Tabela 05-Propriedades de Pré-ignição de diversos combustíveis [6]

propriedade		hidrogênio	gás natural	gasolina
Densidade (kg/m^3)		0.0824	0.72	730
limite de inflamabilidade	(volume %)	4-75	4.3-15	1.4-7.6
	(ϕ)	0.1-7.1	0.4-1.6	$\approx 0.7-4$
temperatura de auto-ignição	(K)	858	723	550
mínima energia de ativação	(mJ)	0.02	0.28	0.24
velocidade de chama ($m s^{-1}$)		1.85	0.38	0.37-0.43
temperatura adiabática de chama	(K)	2480	2214	2580
relação combustível ar estequiométrica		0.029	0.069	0.068
fração volumétrica estequiométrica	%	29.53	9.48	≈ 2
poder calorífico inferior	(MJ/kg)	119.7	45.8	44.79
calor de combustão	(MJ/kg _{air})	3.37	2.9	2.83

2.2.2 PRÉ-IGNIÇÃO

A pré-ignição ocorre quando o gás H_2 é comprimido dentro do cilindro. Ocorre uma combustão antes da faísca.

Tal fenômeno pode provocar aumentos de temperatura e pressões dentro da câmara de combustão gerando problemas para as partes estruturais, pistões e anéis do cilindro, elevando custos de manutenção.

Para um MCI operando com hidrogênio, recomenda-se trabalhar com misturas pobres ($\phi < 1$) visando uma diminuição do efeito de pré-ignição [6].

As causas mais comuns da pré-ignição em MCI que utilizam H_2 são:

- Calor das velas;
- Gás residual proveniente de outras combustões anteriores;
- Regiões quentes próximas ao cilindro (*Hot Spots*);
- Combustões em fendas e frestas.

Alguns passos podem ser eficientes para diminuir a ocorrência do fenômeno, tais como:

- Projeto adequado das velas;
- Sistema de ignição projetado para baixas cargas térmicas residuais;
- Design específico para ventilação do cárter;
- Sistema de arrefecimento que minimize os *Hot Spots*.

2.2.3 BACKFIRE OU RECUO

Este fenômeno é muito similar ao descrito anteriormente, mas tendo a ignição do combustível ocorrendo na descida do pistão. Similarmente, os problemas são os mesmos citados anteriormente. Como o hidrogênio tem baixa energia de ativação esse problema é bastante comum em misturas próximas a estequiométrica e devem ser evitadas.

2.2.4 DETONAÇÃO OU KNOCK

Dentre as anomalias de combustão esse tende a ser o de maior intensidade. A ignição do combustível se dá logo a frente da frente de chama na câmara de combustão. A colisão entre ondas de propagação pode ser violenta e de grandes pressões, gerando problemas mecânicos aos componentes do motor como pistão, cilindro e anéis.

2.3 MATERIAIS

De acordo com [6], a presença do hidrogênio afeta propriedades mecânicas do ferro tais como a ductilidade.

Por isso, ligas de bronze, ligas de cobre e ligas de alumínio são propostas para construção de

2.4 CARACTERÍSTICAS DO MOTOR

O princípio de funcionamento do motor é o mesmo de um motor a gasolina/diesel existente atualmente. O modelamento é feito com base nos ciclos padrão a ar Otto e Diesel.

Segundo [7], o motor de combustão interna, mais precisamente de ignição por faísca pode apresentar três formas descritas a seguir.

- Injeção de hidrogênio gasoso frio no coletor;
- Injeção direta de hidrogênio líquido no cilindro;
- Injeção de mistura de hidrogênio gasoso e gasolina.

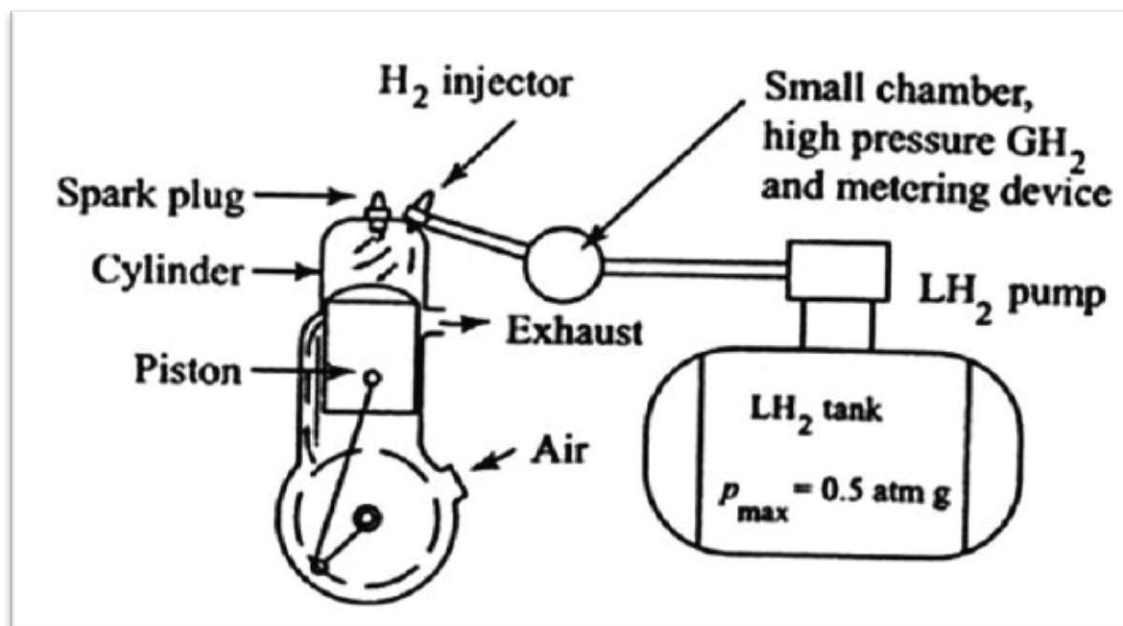


Figura 01- Esquema de funcionamento de injeção, de ignição por faísca de hidrogênio [7]

Sobre a taxa de compressão, escolha pode depender da aplicação, mas em geral são preferíveis taxas moderadas a altas tais como 7,5:1 a 14,5:1 [8].

Pela figura 1, nota-se que o hidrogênio (no estado líquido) é injetado diretamente no cilindro provém de um tanque de armazenamento, e vaporizado ao passar pelo bico injetor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de análise será baseada em estudos experimentais já realizados por pesquisadores.

Serão estudados motores com ignição por faísca (ciclo Otto) e de ignição por compressão (ciclo Diesel).

O intuito é observar não só curvas de desempenho, mas também de as curvas de emissões (NO_x e CO_2 e HC), necessárias para justificar sua viabilidade em aplicações veiculares.

4. RESULTADOS

4.1 MOTORES DE IGNIÇÃO POR FAÍSCA

Experimentos foram realizados [9, 10] para determinar qual a melhor especificação de parâmetros tais como o índice de equivalência combustível-ar (ϕ) e ângulos do virabrequim (θ_j) e ângulos de injeção (θ_i), em relação ao biela-manivela.

A relação combustível ar estequiométrica (F_{est}) pode ser encontrada realizando o quociente entre a massa molar do combustível pela massa molar do reagente, levando em conta os coeficientes da reação química de combustão, é dado pela equação 3:

$$F_{est} = \frac{m_{H_2}}{m_{O_2}} = 0,125 \quad (3)$$

O parâmetro de análise ϕ (equação 4) representa a relação entre:

$$\phi = \frac{F}{F_{est}} \quad (4)$$

Tal parâmetro servirá de comparação entre frações de mistura e desempenho. Quanto mais próximo de um, o índice indica que a mistura está próxima à estequiometria. Quanto menor, indica mistura mais pobre, e quando maior que um indica mistura rica.

O experimento realizado por [10] consiste em testar um motor SI de um cilindro, de quatro tempos ajustado de um motor diesel, com um faiscador acoplado. A figura 02 mostra a configuração do injetor e faiscador, enquanto a tabela 06 mostra suas especificações. A taxa de compressão foi mantida em

11,5:1 e o hidrogênio puro foi injetado pelos bocais, a pressão regulada de 80 bar (8MPa). As condições de operação foram ajustadas para a plena carga do motor (borboleta totalmente aberta) e rotação fixa de 1200 rpm.

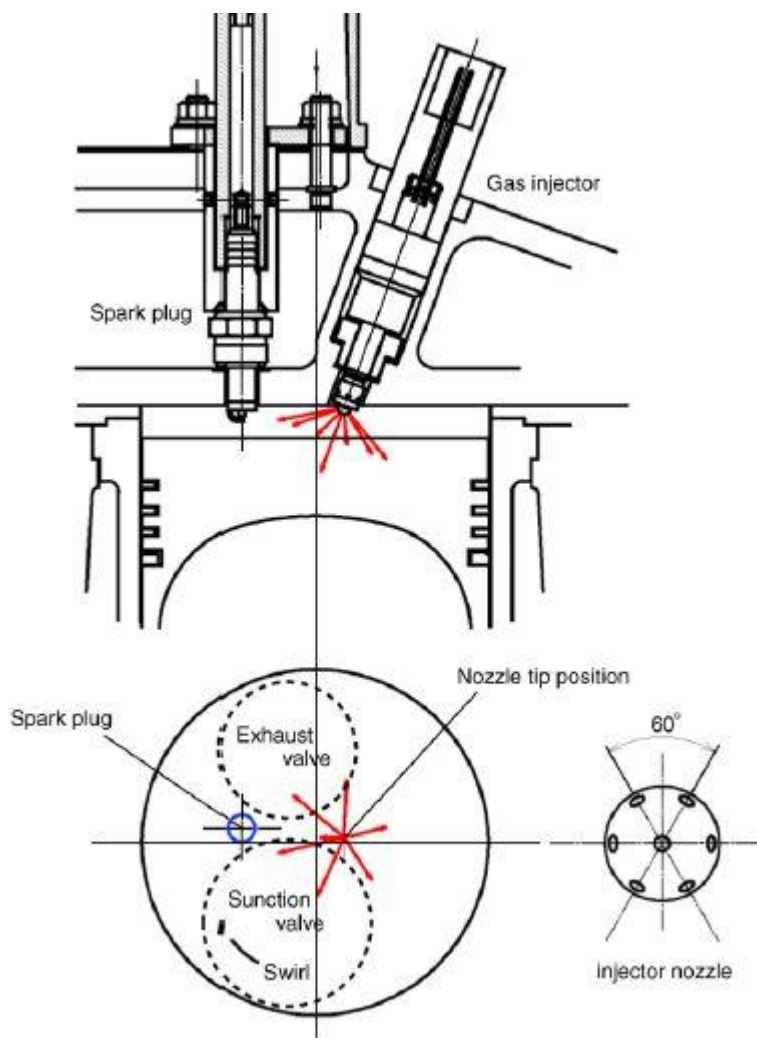


Figura 02 - Disposição do injetor e físcador [10]

Tabela 06 – Características do motor testado [10]

especificação do motor	
Tipo	ignição por faísca, 4
área x curso	102 mm × 105 mm
volume morto	857 cc
taxa de compressão	11.5:1
câmara de combustão	cilíndrico
índice de swirl	2.6
abertura de válvula	360° ATDC
fechamento de válvula	580° ATDC
abertura de válvula de exaustão	130° ATDC
fechamento de válvula de exaustão	380° ATDC
dimensão do bico injetor	0.52 mm × 7

As pressões foram medidas usando transistores de pressão piezoelétricos. As emissões de NO_x foram medidas por um analisador quimioluminescente. Os ângulos do virabrequim foram necessários para se determinar o controle tanto da injeção quanto da ignição. Rotações da saída do motor foram mensuradas com o auxílio de um dinamômetro. Um esquema do arranjo experimental pode ser visualizado na figura 03.

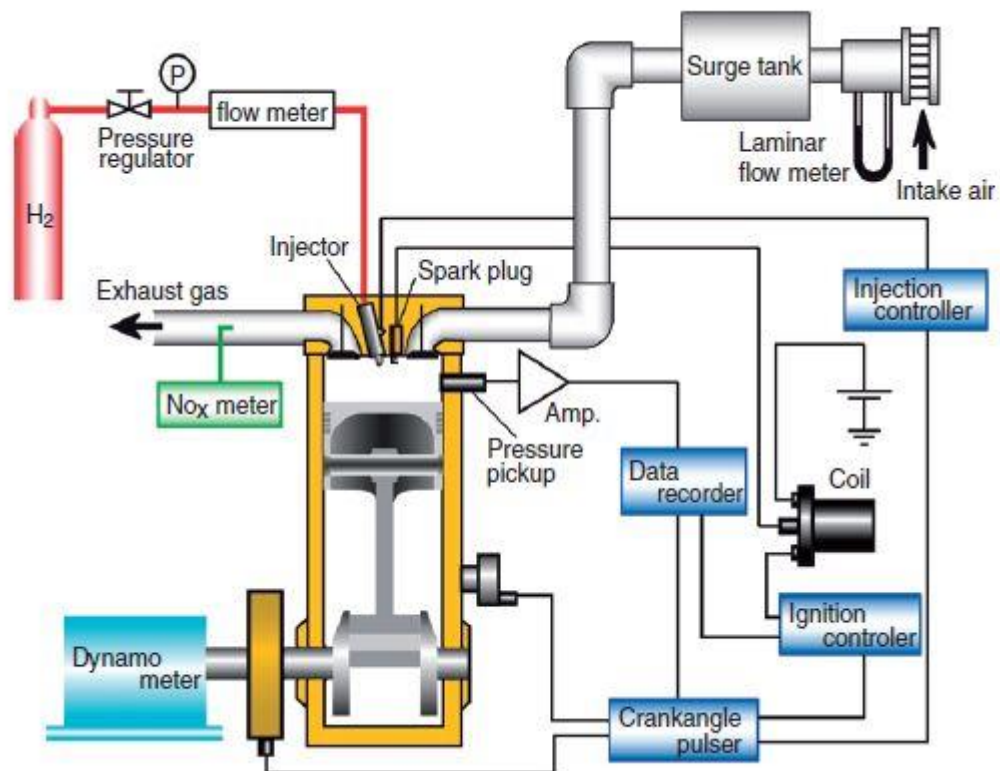


Figura 03 – Aparato experimental [10]

Hipóteses de gás perfeito foram adotadas para calcular, pela primeira lei da termodinâmica, os calores envolvidos no processo.

Foi utilizado o conceito de Eficiência Térmica de Frenagem (η_e) (*Brake Thermal Efficiency*), definida pela equação 5:

$$\eta_e = \frac{\text{Potência Resistente}}{\text{Potência Gerada pelo Combustível}} = \frac{T \cdot \omega}{PCI \cdot \dot{m}_{comb}} \quad (5)$$

Uma primeira análise feita foi variar ϕ enquanto se mudava o instante da injeção e o instante da faísca.

Cogitou-se primeiramente em injetar o hidrogênio juntamente com a entrada de ar dentro do motor, ou seja, na descida do pistão ou $\theta_j = 300^\circ$.

Os resultados obtidos estão expressos na figura 04.

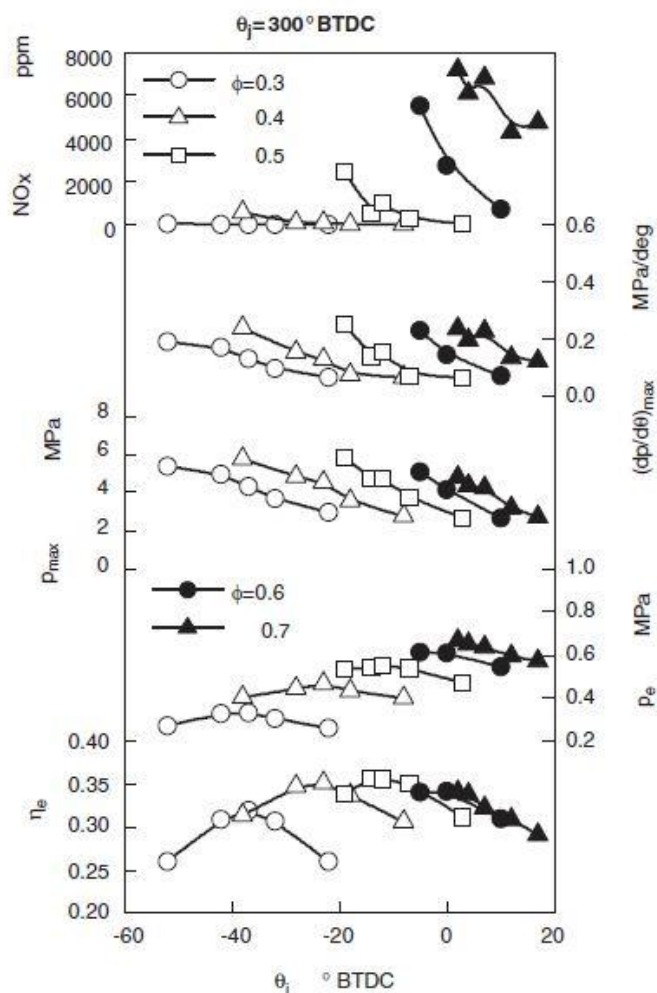


Figura 04 – Parâmetros investigados para $\theta_j = 300^\circ$

Do gráfico, nota-se que o máximo rendimento térmico obtido $\eta_e = 35\%$ foi verificado com $\phi = 0,5$. A PME máxima encontrada foi o valor de 6,5 bar. O autor [10] considera que essa PME é inferior a conseguida com o motor original a diesel. Para ϕ acima de 0,7 há um aumento significativo nas emissões de NOx (8000 ppm).

Posteriormente, verificou-se a injeção durante a compressão do ar, ou seja, na subida do pistão ($\theta_j = 130^\circ$), com variações de ϕ , mostrado na figura 05.

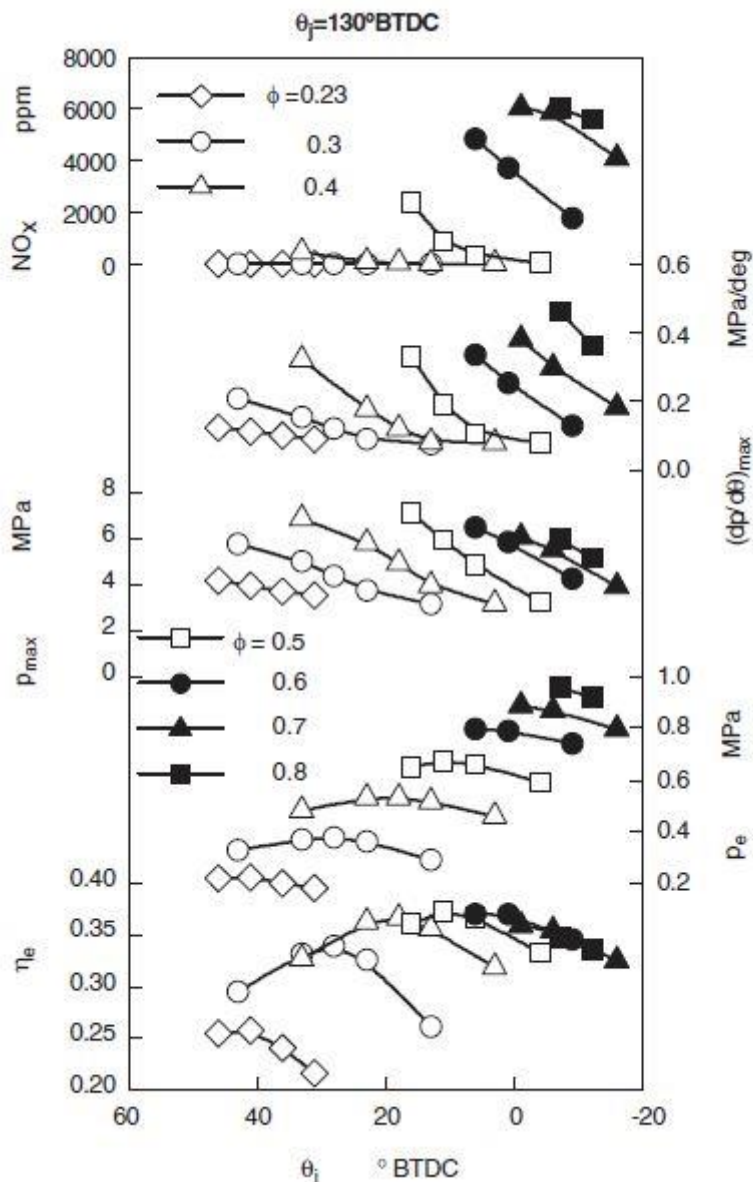


Figura 05 – Parâmetros investigados para $\theta_j = 130^\circ$.

O observado foi que a PME máxima encontrada foi de 9,7 bar, considerada maior que a conseguida com o motor original. O rendimento térmico máximo foi ligeiramente superior em todos os casos de ϕ , mas novamente foi maior para o caso em que $\phi = 0,5$ levando em conta o retardo da injeção do combustível.

O autor explica que tal fato se deve ao aumento do rendimento volumétrico definido pela equação 6.

$$\eta_v = \frac{\text{massa de ar real que entra no pistão}}{\text{massa de ar que teoricamente entraria no pistão}} \quad (6)$$

O gráfico da variação desse rendimento foi construído para vários ϕ para os dois instantes de injeção experimentados anteriormente. O efeito visto na figura 06 mostra como o rendimento volumétrico se mantém, ao retardar a injeção de combustível dentro do cilindro.

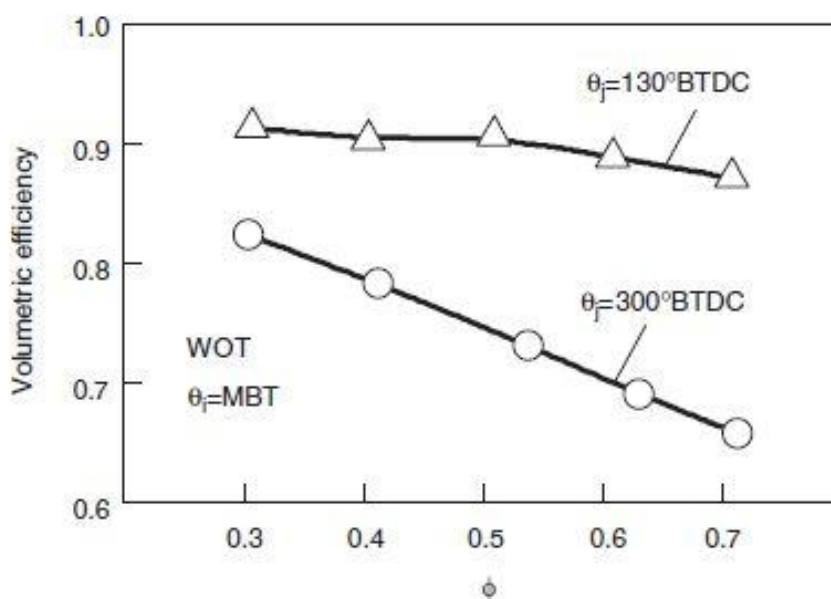


Figura 06 – Variação do rendimento volumétrico para $\theta_i = 130^\circ$ e $\theta_i = 300^\circ$

O estudo prossegue com a continuação do retardo no tempo da injeção, mantendo $\phi = 0,5$, pois notou-se que esse parâmetro poderia otimizar os rendimentos térmicos e diminuir as emissões de NOx. A figura 07 expõe essa etapa do estudo.

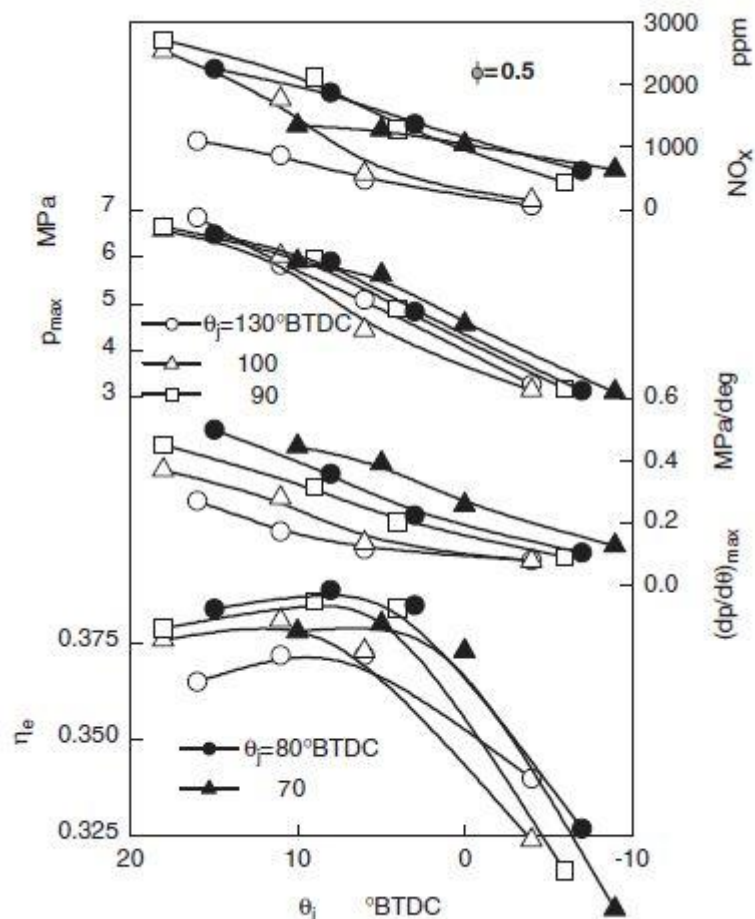


Figura 07 – Otimização para $\phi = 0,5$

Pela figura 07, percebe-se que quanto mais se retarda a injeção do H_2 , há um aumento no rendimento térmico até o valor do ângulo descer a $\theta_j = 70^\circ$. Em $\theta_j = 80^\circ$, percebe-se um rendimento térmico próximo de 39%, o maior alcançado em todo o estudo. Depois que esse valor é atingido, a curva de rendimento começa a decair. Tal resultado é expressivo, pois o mesmo motor operando com combustível gasolina, obtém rendimento térmico próximo de 30%.

É possível notar a quantidade de NO_x máxima liberada, que no ponto de máximo rendimento tem o valor de 2000 ppm. A figura 08 coloca em evidência as comparações entre ϕ e θ_j . Tal resultado é ruim quando comparado a emissões de

veículos operando com combustíveis fosseis. Emissões são da mesma ordem de grandeza tangenciando a marca de 2000 ppm [14]. Apesar desse fato, é notória a ausência de poluentes que contém carbono, o que se permite verificar uma verdadeira vantagem em termos de poluição atmosférica.

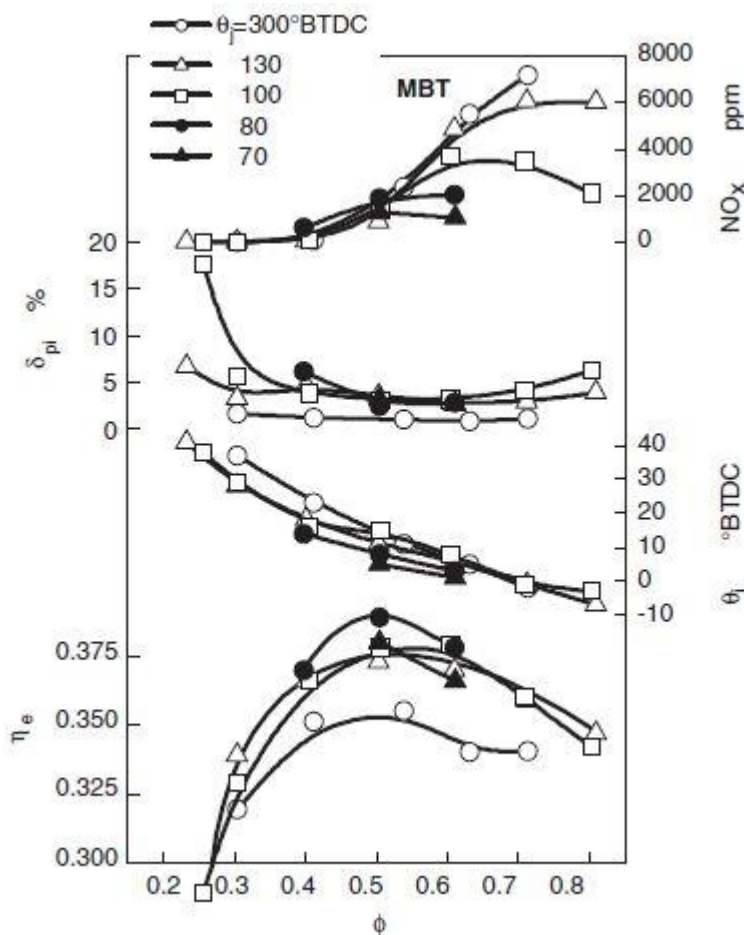


Figura 08 – Otimização para diferentes ϕ e θ_i

Outro estudo, muito semelhante, foi realizado em 2010 [9]. Embora, as condições de regime sejam muito próximas de uma condição de cargas parciais, próximas as zero, fator de compressão de 10:1, notam-se algumas semelhanças. O estudo aponta que o rendimento térmico decai com o enriquecimento da mistura, ou seja, aumentos de ϕ . A figura 09 mostra isso e é explicada, segundo o autor, com o argumento que uma mistura mais pobre, auxilia a queima mais lenta do combustível.

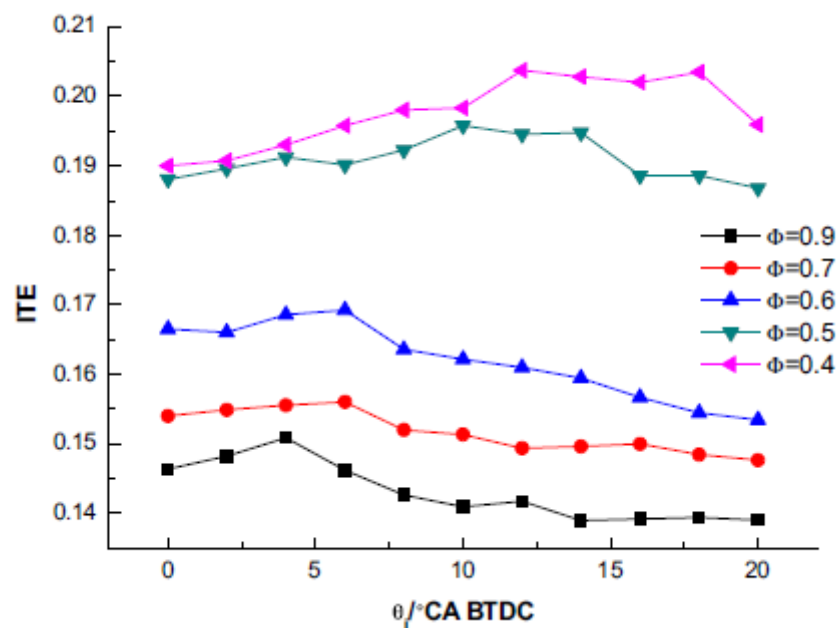


Figura 09 - Variação de rendimentos térmicos para vários ϕ

Além disso, foi feito também um gráfico no qual relaciona as perdas de calor do cilindro para o ambiente ao longo do movimento do pistão durante o ciclo. Para rotações fixas e tempos de ignição constantes. Na figura 10 θ_j é fixo e vale 0° .

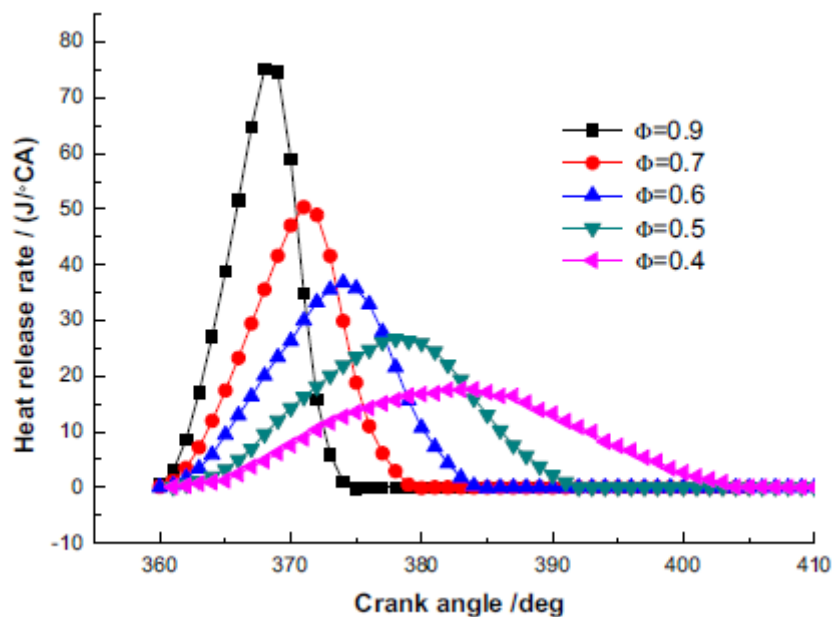


Figura 10 – Calor liberado para variação de ϕ

O estudo das emissões também está de acordo com o estudo mostrado anteriormente [10], indicando que quanto mais rica a mistura, maiores são as emissões de NO_x, como mostra a figura 11. Vale lembrar que as emissões são menores devido ao fato do motor trabalhar em cargas bastante baixas nesse estudo.

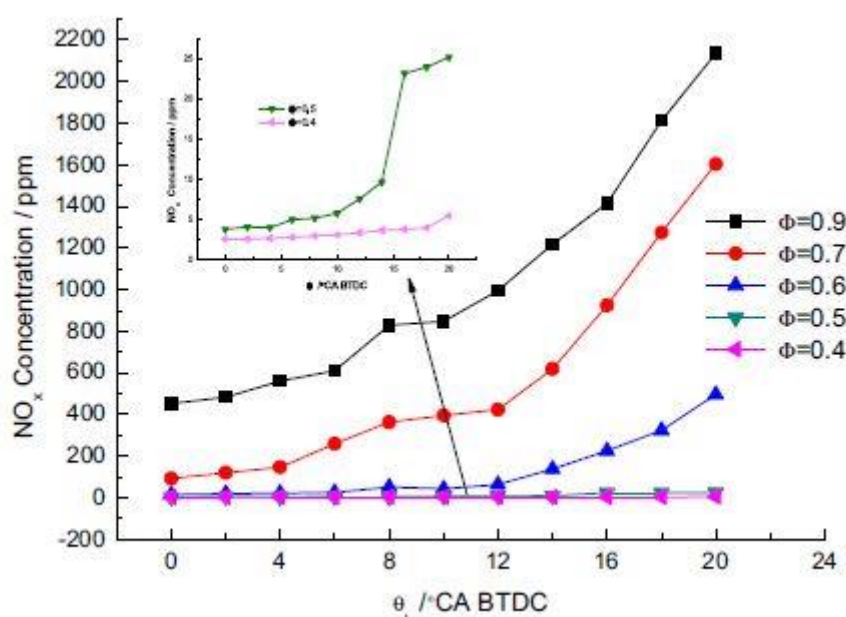


Figura 11 - Variação da emissão para vários ϕ

4.2 MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO

4.2.1 COMPRESSÃO DE HIDROGÊNIO PURO

Um estudo conduzido por [13], tentou comparar os efeitos do hidrogênio puro injetado diretamente em um motor projetado para diesel (com modificações) com o próprio óleo diesel. Os níveis de NO_x e índices de rendimento térmico foram medidos.

O aparato experimental está mostrado na figura 12. O injetor utilizado está mostrado na figura 13. As características do motor estão mostradas na figura 14.

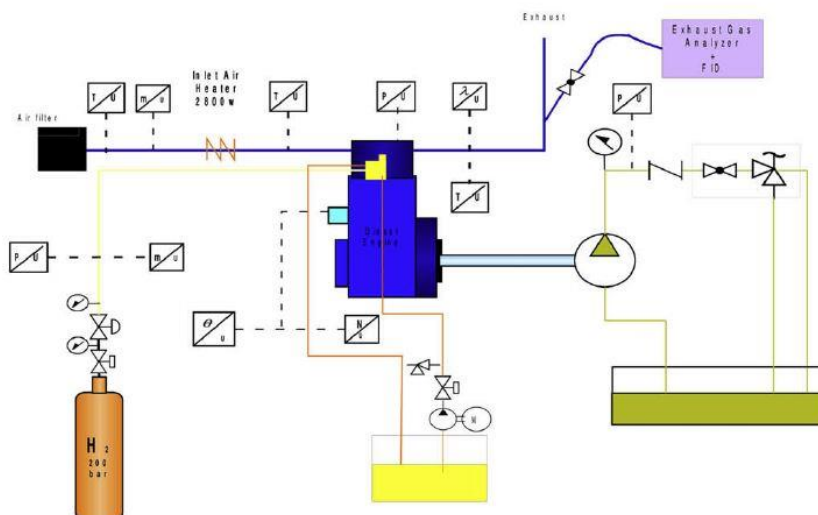


Figura 12 - Aparato experimental [13]

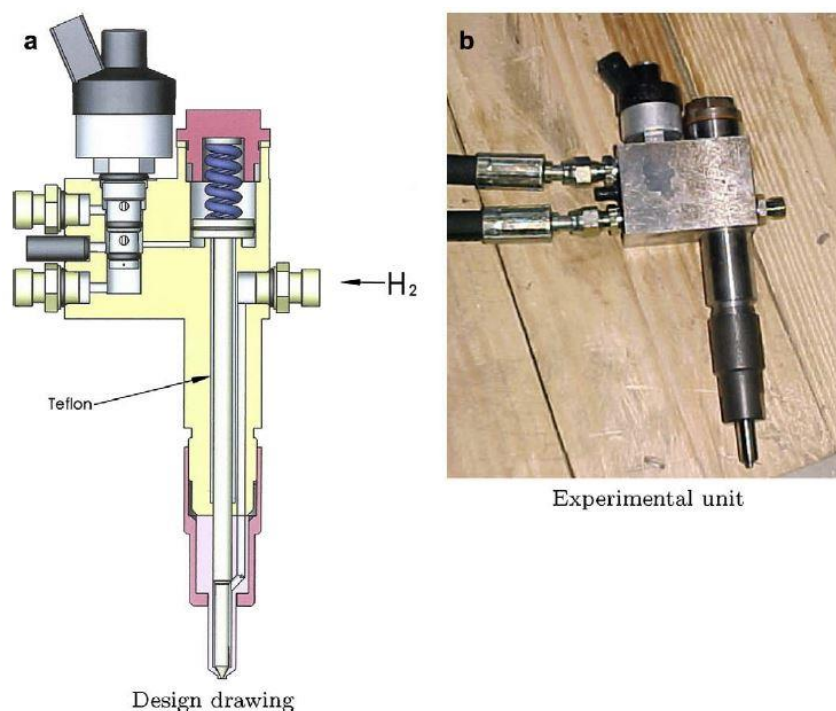


Figura 13- Modelo do injetor utilizado [13]

A injeção do H_2 foi feita a 80 bar, a 40° do topo do volume morto superior, durante a fase de compressão.

Os resultados obtidos por [13], foram a comparação da potência total obtida, entre o diesel e o hidrogênio, bem como rendimentos térmicos. Os resultados estão representados na tabela 07.

Foi medido, também, a concentração do NOx. A figura 14 mostra que os índices de concentração, em ppm, do hidrogênio foram inferiores aos do diesel, para vários PME.

Tabela 07 – Comparação entre rendimentos e potências entre a injeção diesel e a injeção [13].

	Diesel DI	H ₂ DI
rendimento mecânico (%)	27.9	42.8
arrefecimento	42.2	17.3
gases de exaustao (%)	35.3	39.9
potência (W)	9000	10,280

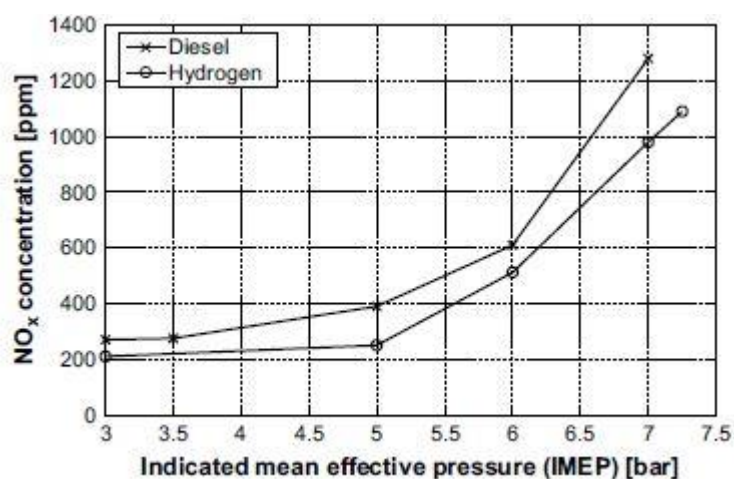


Figura 14- Comparações de emissões entre Diesel e H₂ [13] .

Os autores não informaram dados sobre anomalias de combustão.

4.2.2 COMPRESSÃO DE MISTURA DIESEL/HIDROGÊNIO

Autores pesquisaram [12] e informaram que a injeção do hidrogênio em motores operando no ciclo Diesel, possui grande incidência de fenômenos de anomalias de combustão. Uma possível razão para isso, é que o hidrogênio possui uma alta temperatura de autoignição. A temperatura de autoignição do hidrogênio é de aproximadamente 858K, enquanto o óleo Diesel possui uma temperatura de autoignição de 533K.

Alguns pesquisadores afirmam ser difícil operar o motor com taxas de compressão muito elevadas (acima de 17:1), devido ao aumento de ocorrências de *knock*, pre-ignição e *backfire*. Tal fato torna mais difícil a ocorrência do fenômeno de explosão dentro do cilindro, apenas com o aumento da temperatura de compressão.

Por isso, cogita-se o uso de mistura hidrogênio/diesel para os motores a compressão [12].

Para o experimento, usou-se um motor de teste com as especificações técnicas descritas na tabela 08. Salienta-se a alta taxa de compressão 17:1 e a pressão dentro do cilindro de armazenamento de 250 bar. A pressão de injeção, no entanto, é de quatro vezes menor. Para esse estudo, variou-se a porcentagem de hidrogênio injetado juntamente com o óleo Diesel. Os testes variaram a porcentagem de H₂ em 0%, 2,5%, 5% e 7,5%.

Foram calculadas a potência de eixo e eficiência térmica de frenagem. A montagem experimental esta brevemente ilustrada na figura 16. A seguir, foram analisadas também, as emissões de NO_x, CO e HC.

Tabela 08 – Especificações do motor Diesel

Tumosan engine 185 B	Technical specification
Numero de cilindros	4
diâmetro do cilindro	104 mm
Volume	115 mm
Taxa de compressão	3908 ml
torque máximo	17:1
potência máxima	318 Nm (at 1250 min ⁻¹)
Arrefecimento	58 kW (at 2250 min ⁻¹)
ângulo de injeção	2700 min ⁻¹
pressão de injeção	água
	18 graus
	230 bar

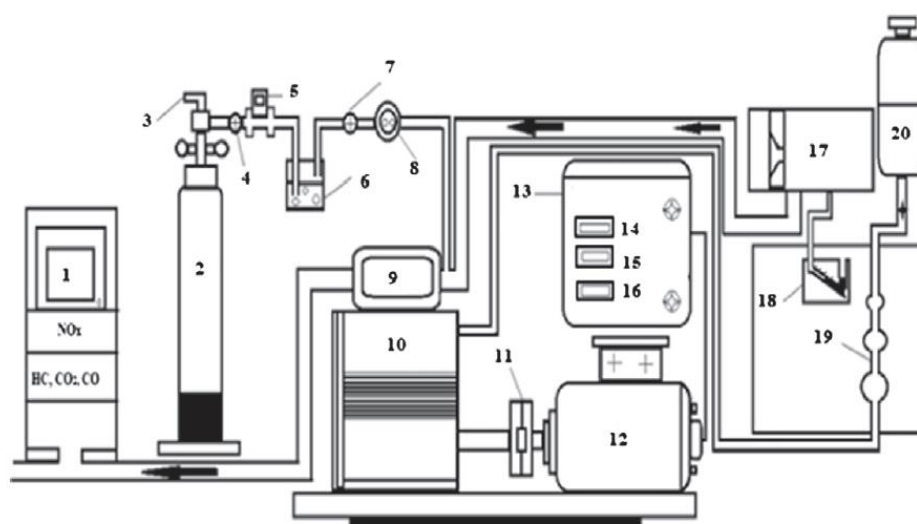
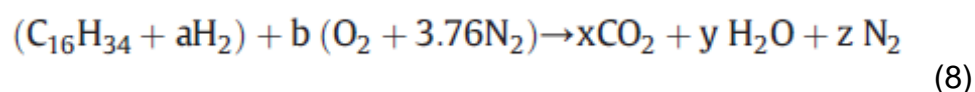
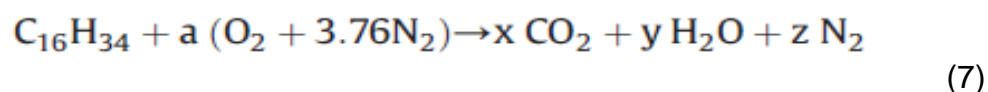


Figura 15 – Aparato experimental da experiência [12]

As equações de balanceamento são descritas nas equações 7 (somete óleo Diesel) e 8 (mistura).



Os resultados de potência podem ser vistos na figura 17. Percebe-se nitidamente o aumento de potencia fornecida ao eixo com o aumento de porcentagem do H_2 na mistura. O valor máximo obtido foi 65 kW, para 7,5% de hidrogênio. O valor foi 17% maior do que obtido com Diesel combustível.

A figura 18 revela o aumento no torque obtido com a mistura.

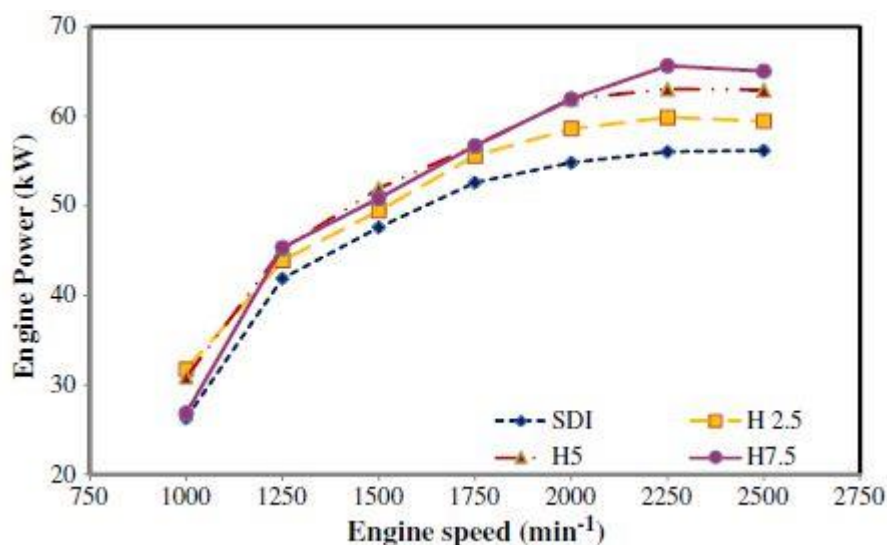


Figura 16 – Curva de potência x rotação para diferentes porcentagens de H_2 na mistura injetada

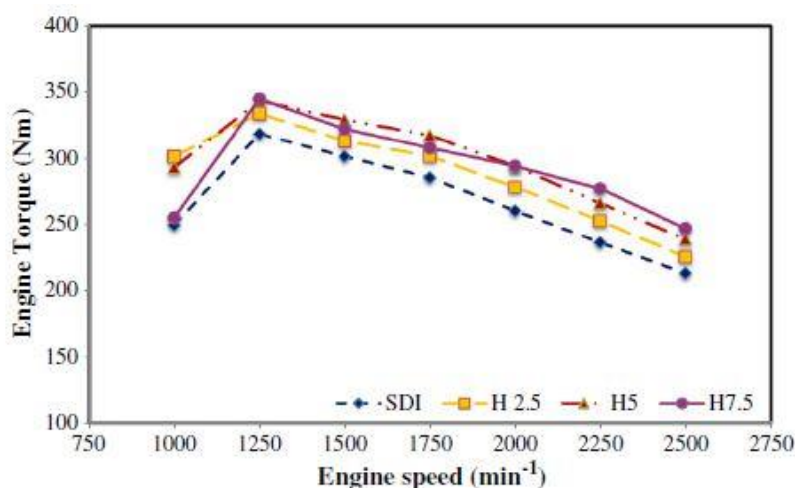


Figura 17 – Curva de torque x rotação para diferentes porcentagens de H_2 na mistura injetada

A figura 19 mostra o aumento de eficiência térmica do uso da mistura em relação ao sistema operando somente com óleo Diesel. Observa-se que a mistura que permitiu o ponto de maior rendimento, é a de menor porcentagem de hidrogênio na mistura (2,5 %) sendo atingido um rendimento térmico de 39% (23% a mais que o Diesel). Os autores afirmam que, apesar do alto rendimento, a operação se mostrou instável devido à ocorrência de anomalias de combustão tais como a detonação.

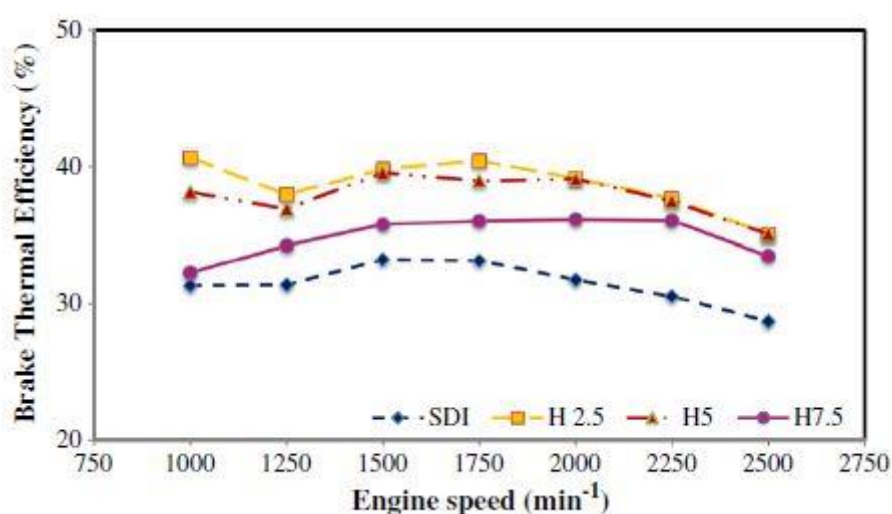


Figura 18 – Curvas de rendimento x rotação para diferentes porcentagens de H₂ na mistura injetada

Com relação a emissões, o experimento mostrou-se insatisfatório em relação ao motor operando com óleo Diesel, pois as emissões foram iguais ou até superiores. As figuras 19, 20 e 21, mostram os aspectos de emissões para o experimento realizado.

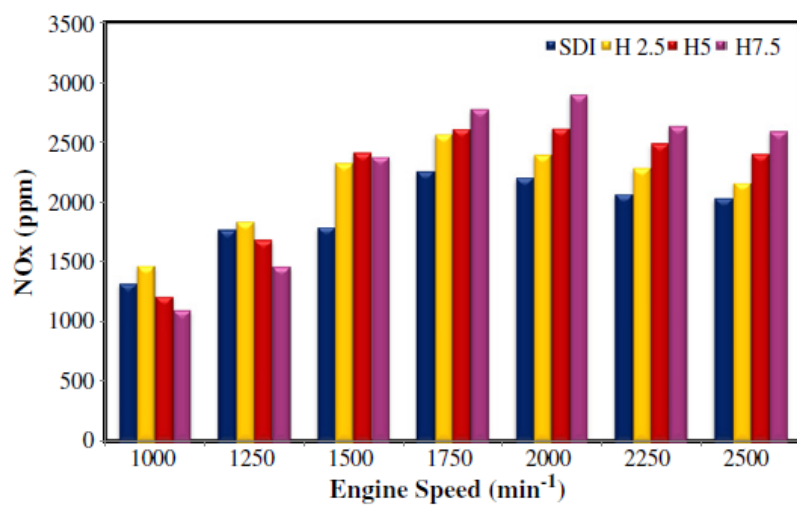


Figura 19 – Emissões de NOx variando as porcentagens de H₂ na mistura injetada

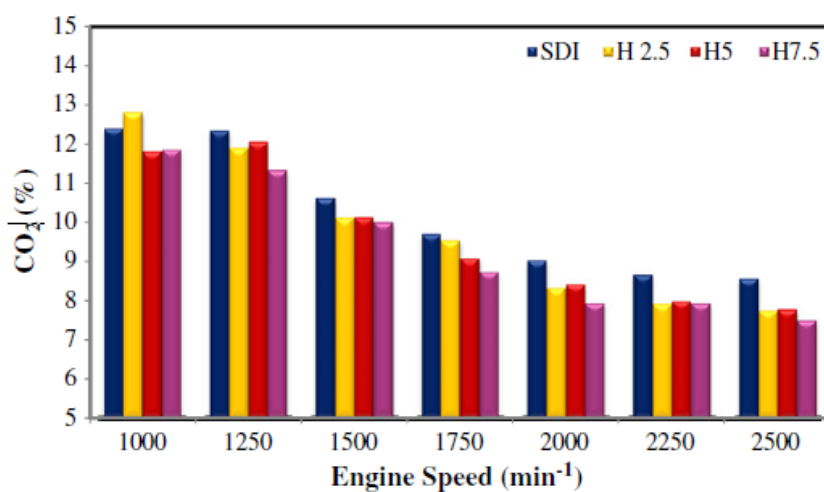


Figura 20 – Emissões de CO₂ variando as porcentagens de H₂ na mistura injetada

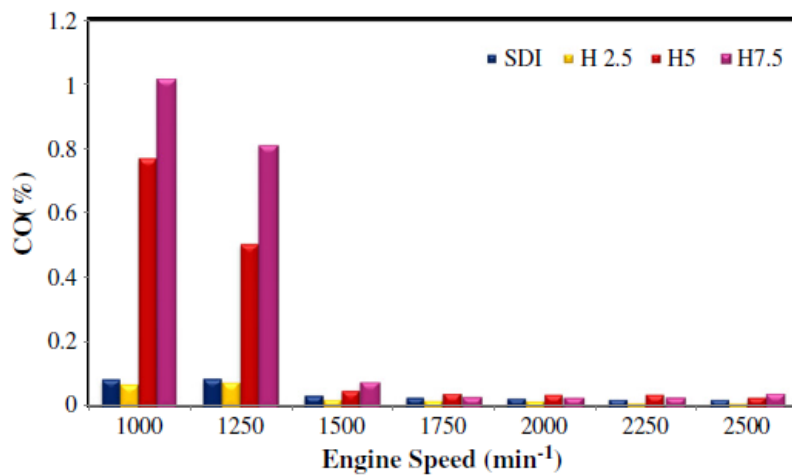


Figura 21 – Emissões de CO variando as porcentagens de H₂ na mistura injetada

4.3 MOTORES WANKEL (ROTATIVOS)

Nas referências bibliográficas se encontram alguns textos sobre motores *wankel*, operando com hidrogênio, embora sua gama de estudos ser reduzida em relação aos outros motores discutidos.

5. DISCUSSÃO

Do exposto até o momento, percebe-se que segundo os estudos, a operação dos motores de combustão interna a gás hidrogênio podem se tornar aplicáveis a veículos.

As condições vistas que minimizam as emissões e mantem um bom desempenho são misturas relativamente pobres, injetadas durante a compressão do ar, para motores de ignição a faísca.

5.1 EXEMPLO REAL DE EMPREGO DO H₂ EM MOTORES

O BMW *Hydrogen 7* é um carro fabricado na Alemanha. Motor de 12 cilindros, de capacidade total de 6 litros (6.0 l V12), de ignição por faísca. O tanque,

localizado após o banco dos passageiros, contém hidrogênio pressurizado gasoso (51 bar) ou líquido altamente pressurizado (500 bar) e sob baixíssimas temperaturas (20K). Com uma capacidade de 170L, a massa de hidrogênio armazenada é de 8 kg, equivalendo energeticamente a uma quantidade de energia de 8 galões de gasolina (278,4 MJ). A disposição do tanque pode ser vista na figura 12. [11].



Figura 22 – Disposição do tanque que armazena hidrogênio no carro *Hydrogen 7*[11]

Em termos de emissões, os únicos gases poluentes produzidos são: NOx, provenientes do N₂ atmosférico (presente na combustão), e o CO₂, gerados, inconvenientemente, devido à presença de partículas de óleos lubrificantes na combustão. As curvas de desempenho são mostradas a seguir na figura 13.

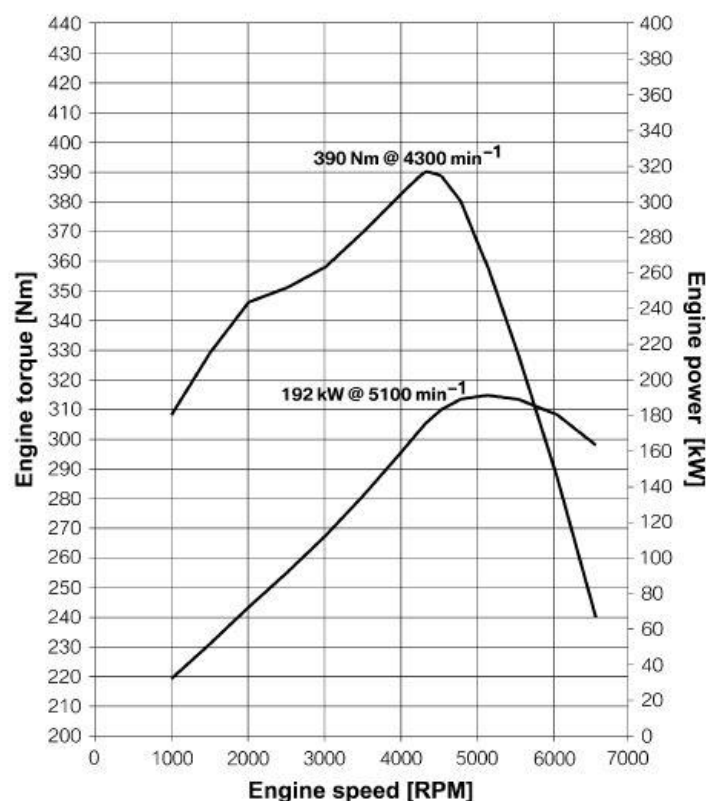


Figura 23 – Curvas de performance real do carro *Hydrogen 7*[11]

O resultado do experimento em que se quantificou o número quilômetros rodados e capacidade mássica total do tanque. Os testes indicaram que, em condição de cidade, o veículo consegue um desempenho médio equivalente (à gasolina) de 17 milhas por galão (3,7 kg de hidrogênio por 100km), enquanto em condições de estrada, esse número sobe para 30 milhas por galão (2,1 kg de hidrogênio por 100km). Tais números indicam um desempenho regular de eficiência.

Em termos de emissões, o resultado do estudo foi excelente. Com emissões de CO₂, 0,003 ppm, 0.08 ppm NO_x esse veículo entra na categoria de SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle), classificado pelo laboratório APRF.

A análise que pode ser feita com base nesse experimento indica que para um carro de alta performance (esportivo), os valores de emissões são muito baixos.

A quantidade de quilômetros rodados por tanque (200 km), entretanto, é uma marca ruim, em que levaria o proprietário do carro a abastecer com muita regularidade, e dificultando viagens mais longas.

A título de comparação, performance de um carro popular (Renault Clio), pode ser vista na figura 14.

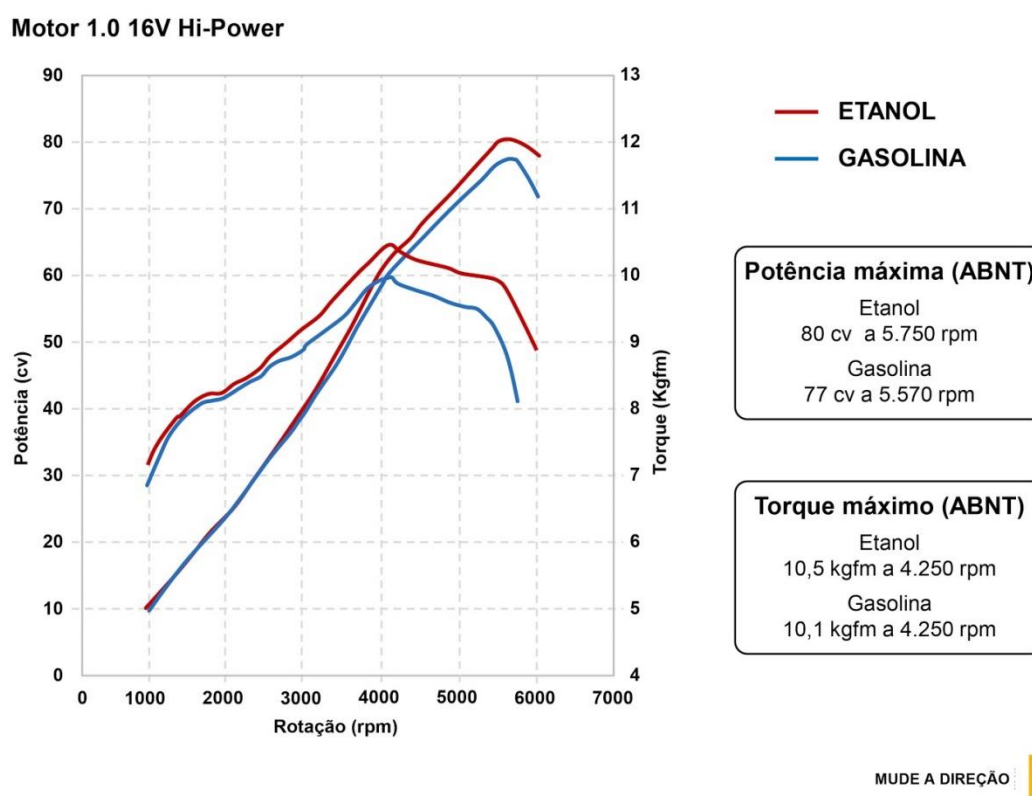


Figura 24 – Curvas de torque e potencia por rotação de um carro popular (Renault Clio)

Tendo em vista esse desempenho, 80 cv ou 58 kW de potência máxima e 12 kNm de torque, observa-se que o carro da BMW emprega a tecnologia para um carro de alta performance (cerca de três vezes mais potente). Tal fato indica que os consumos de combustíveis são maiores em troca de fornecer maior desempenho.

A quantidade de quilômetros rodados por tanque (200 km), entretanto, é uma marca de desempenho abaixo da média para um carro popular à gasolina (aprox..

400 km/tanque), em que levaria o proprietário do carro a abastecer com muita regularidade, e dificultando viagens mais longas.

6. CONCLUSÕES

Do exposto pode-se entender que o hidrogênio combustível pode ser utilizado em motores de combustão interna.

Dos experimentos citados, o motor que apresentou melhor aplicabilidade foi o motor de ignição a faísca (SI). Isto devido a bons desempenhos se comparados aos mesmos motores operando com combustíveis fósseis.

Quanto à operação de motores de compressão contendo hidrogênio puro, pode se dizer que apesar de se obterem rendimentos térmicos até maiores que os motores SI, nos experimentos, ficou-se evidente problemas relacionados à detonação do combustível durante a compressão. As taxas de compressão mais elevadas podem ser responsáveis por esse efeito, que acaba limitando o uso e vida útil do motor.

Em relação a emissões, o resultado dos experimentos é satisfatório, pois ainda que sejam produzidas quantidades de poluentes NO_x equivalentes aos combustíveis fósseis (aproximadamente 2000 ppm), a produção de CO₂ foi nula nos experimentos, o que implica em uma grande vantagem ambiental quanto a emissões.

Conclui-se que, se a tecnologia fosse aplicada a carros de menor potência (populares, com motores 1.0) e de menor custo, existiria a possibilidade de ter no mercado um veículo capaz de fornecer grande mobilidade com baixíssimos índices de poluição. Deste modo, acredita-se que parte do problema das emissões relacionado aos automóveis atuais e a dependência de combustíveis fósseis, seria em grande parte solucionado.

Neste estudo se observou também, que os motores de ignição por faísca apresentaram melhor desempenho, tanto em níveis energéticos como emissões.

Entretanto, vale salientar que o uso do hidrogênio ainda conta com muitos empecilhos. Um deles é a geração/produção do gás que necessita gastos energéticos, que devem ser provenientes de fontes renováveis (solar, eólica) para serem sustentáveis. Outro ponto, que ainda inviabiliza esse uso, é a questão do armazenamento do gás que ainda não é efetiva. Ainda com esses problemas fossem solucionados, mudanças de infraestrutura global de armazenamento e distribuição do combustível seriam exigidas.

7. REFERÊNCIAS:

- [1] O HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL, Tânia Esmeralda Rodrigues Estêvão.
- [2] SELECTED TOPICS ON HYDROGEN FUELS, W.R. Parish, R.O.Voth,J.G.Hust, T.M. Fynn, C.F.Sindt, N.A.Olien- Capítulo 3: H₂ Fueled Automobiles,1975.
- [3] O COMBUSTÍVEL HIDROGÊNIO, Fernando Miguel Soares Mamede Dos Santos
- [4] CFD STUDY ON HYDROGEN ENGINE MIXTURE AND COMBUSTION, Fushui Liu, 2004.
- [5] CFD INVESTIGATIONS OF MIXTURE FORMATION, FLOW AND COMBUSTION FORM MULTI-FUEL ROTARY ENGINE, Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik and Wirtschafts, 2009.
- [6] THE HYDROGEN-FUELED INTERNAL COMBUSTION ENGINE: A TECHNICAL REVIEW, C.M. White*, R.R. Steeper, A.E. Lutz, 2005.
- [7] AN OVERVIEW OF HYDROGEN AS A VEHICLE FUEL, H. Fayaz, R.Saidur, N.Razali , F.S.Anuar , A.R.Saleman , M.R.Islam , 2010.
- [8] HYDROGEN FUELED INTERNAL COMBUSTION ENGINES. PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE, Verhelst S, Thomas W, 2009.
- [9] IDLE CHARACTERISTICS OF A HYDROGEN FUELED SI ENGINE. Fanhua Ma et al, 2010.
- [10] PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF A DIRECT INJECTION SI HYDROGEN ENGINE, Ali Mohammadi et al. 2006
- [11] FUEL ECONOMY AND EMISSIONS EVALUATION OF BMW HYDROGEN 7 MONO-FUEL DEMONSTRATION VEHICLES, Thomas Wallner et al. 2008.
- [12] AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECT ON DIESEL ENGINE PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS OF ADDITION AT DUAL FUEL MODE OF HYDROGEN, H Köse, M. Cinivz, 2012.
- [13] AN EXPERIMENTAL STUDY OF A DIRECT OF A DIRECT INJECTION COMPRESSION IGNITION HYDROGEN ENGINE, J.M. Gomes Antunes et. al, .2008

[14] Nelson A. Kelly and Peter J. Groblicki , 2012, Real-World Emissions from a Modern Production Vehicle Driven in Los Angeles.

8. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

PERFORMANCE OF A HYDROXYGEN-BLENDED GASOLINE ENGINE AT DIFFERENT HYDROGEN VOLUME FRACTIONS IN THE HYDROXYGEN, Wang S, et al. International Journal of Hydrogen Energy 2012(0).

HYDROGEN AND FUEL CELLS: TOWARDS A SUSTAINABLE ENERGY FUTURE, P.P.Edwards , V.L.Kuznetsov , W.I.F.David , N.P.Brandon.

GERAÇÃO E COMBUSTÃO DO HIDROGÊNIO OBTIDO ATRAVÉS DO PROCESSO DE ELETRÓLISE DA ÁGUA, Roberto Liberato Neto, São Paulo

THE FUTURE OF HYDROGEN – OPPORTUNITIES AND CHALLENGES Michael Balla, Martin Wietschelb

HYDROGEN ENERGY D ABUNDANT, EFFICIENT, CLEAN: A DEBATE OVER THE ENERGY-SYSTEM-OF-CHANGE, Carl- Jochen Winter

HYDROGEN INFRASTRUCTURE FOR THE TRANSPORT SECTOR, Paolo Agnolucci

HYDROGEN'S ROLE IN AN UNCERTAIN ENERGY FUTURE, Patrick Moriartya, Damon Honneryb

THE HYDROGEN-FUELED INTERNAL COMBUSTION ENGINE: A TECHNICAL REVIEW, C.M. White, R.R. Steeper, A.E. Lutz

HYDROGEN THE FUEL FOR 21ST CENTURY, I.P. Jain

EFFICIENCY COMPARISON BETWEEN HYDROGEN AND GASOLINE, ON A BI-FUEL HYDROGEN/GASOLINE ENGINE, S. Verhelst, P. Maesschalck, N. Rombaut, R. Sierens

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INJECTION TIMING UNDER VARIOUS EQUIVALENCE RATIOS ON ENERGY AND EXERGY TERMS IN A DIRECT INJECTION SI HYDROGEN FUELED ENGINE, Arash Nematì , Vahid Fathi , Ramin Barzegar , Shahram Khalilarya

ON-BOARD FUEL PROCESSOR MODELLING FOR HYDROGEN-ENRICHED GASOLINE FUELLED ENGINE, Maria Giovanna Minutillo

IMPACT OF VARIABLE VALVE TIMING ON POWER, EMISSIONS AND BACKFIRE OF A BI-FUEL HYDROGEN/GASOLINE ENGINE, S. Verhelst , J. Demuynck , R. Sierens , P. Huyskens , 2009

CONVERSION OF A COMMERCIAL SPARK IGNITION ENGINE TO RUN ON HYDROGEN: PERFORMANCE COMPARISON USING HYDROGEN AND GASOLINE. C. Sopena et al. 2009