

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

BRUNO CÉSAR PASINI

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA COM A UTILIZAÇÃO DE GASOLINA, METANO E
HIDROGÊNIO**

CAXIAS DO SUL

2022

BRUNO CÉSAR PASINI

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA COM A UTILIZAÇÃO DE GASOLINA, METANO E
HIDROGÊNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso I apresentado ao curso de Engenharia Automotiva da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador Prof. Adelair Lino Colombo

CAXIAS DO SUL

2022

BRUNO CÉSAR PASINI

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA COM A UTILIZAÇÃO DE GASOLINA, METANO E
HIDROGÊNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso I apresentado ao curso de Engenharia Automotiva da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Aprovado em

Banca Examinadora

Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

O Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) representa um momento-chave no final da trajetória acadêmica. Corresponde a unificação dos conhecimentos adquiridos ao longo da jornada rumo a colação de grau de Bacharel em Engenharia Automotiva. Cada professor e colega que participaram desta construção merecem atenção e um muito obrigado.

Desta forma, em especial, estendo meus agradecimentos para: Professor Me. Adelair Lino Colombo que orientou, guiou e contribui enormemente para a construção deste trabalho; Professor Dr. Carlos Roberto Altafini pelo apoio e pelas sugestões propostas de melhorias; Bruna Silva Grabowski, namorada paciente e compreensiva que estendeu palavras de afeto e ajuda nos momentos de aperto e pela ajuda intelectual e acadêmica ao realizar inúmeras correções e orientações de escrita; Claimar Pasini e Gladis Furlanetto Pasini, pais que foram alicerce e responsáveis por possibilitar a realização desta trajetória acadêmica.

RESUMO

O presente trabalho é um estudo de avaliação da utilização do hidrogênio como combustível alternativo em motores de combustão interna. Analisou-se comparativamente o desempenho do motor quanto a utilização dos combustíveis gasolina e metano. Foi utilizado o método de simulação computacional, através do *software Lotus Engine Simulation*. Foram gerados gráficos de desempenho de torque, potência, consumo específico de combustível e pressão efetiva para cada combustível considerando fator lambda igual a 1. Os resultados mostram a superioridade do hidrogênio em todas as comparações. Potência: 65,28% em relação a gasolina e 77,9% ao metano; Torque: 29,8% em relação a gasolina e 44,6 ao metano; Consumo específico: valores máximos de 63% em relação a gasolina e 59% ao metano; Pressão efetiva: 29,8% em relação a gasolina e 44,7 % ao metano. Conclui-se, a partir dos resultados obtidos, que o hidrogênio possui um desempenho superior e é uma opção para motores de combustão interna, contudo, devido as suas propriedades e características físicas, são necessárias alterações e adequações na construção dos motores que atualmente utilizam outros combustíveis

Palavras-chave: Motor de combustão interna. Ciclo Otto. Hidrogênio. Simulação computacional. Curvas características.

ABSTRACT

The present work is an evaluation study of the use of hydrogen as an alternative fuel in internal combustion engines. The engine performance was comparatively analyzed regarding the use of gasoline and methane fuels. The computational simulation method was used, through the software *Lotus Engine Simulation*. Graphs of performance of torque, power, specific fuel consumption and effective pressure were generated for each fuel considering a lambda factor equal to 1. The results show the superiority of hydrogen in all comparisons. Power: 65.28% compared to gasoline and 77.9% to methane; Torque: 29.8% compared to gasoline and 44.6% to methane; Specific consumption: maximum values of 63% for gasoline and 59% for methane; Effective pressure: 29.8% compared to gasoline and 44.7% to methane. It is concluded, from the results obtained, that hydrogen has a superior performance and is an option for internal combustion engines, however, due to its properties and physical characteristics, changes and adjustments are needed in the construction of the engines that currently use other fuels

Keywords: Internal combustion engine. Otto Cycle. Hydrogen. Computer simulation. Curve characteristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo Otto	16
Figura 2 – Componentes estacionários	16
Figura 3 – Componentes móveis	17
Figura 4 – Motor em corte	17
Figura 5 – Princípios de operação de um dinamômetro	18
Figura 6 – Diagrama p-V de um motor de combustão interna	19
Figura 7 – Curva característica de motores a gasolina	21
Figura 8 – Esquemático de um reformador a vapor	26
Figura 9 – Processo de eletrólise	27
Figura 10 – Produção de hidrogênio	28
Figura 11 – Comparação de densidade de energia específica e densidade de energia volumétrica de diversos combustíveis	31
Figura 12 – Velocidade de queima laminar	35
Figura 13 – Fotografias de Schilieren em condições atmosféricas	35
Figura 14 – Fotografias de Schilieren em condições do motor	36
Figura 15 – Combustões anormais	38
Figura 16 – Relação estequiométrica e gases	42
Figura 17 – Modelo de simulação desenvolvido do Lotus Engine Simulation	43
Figura 18 – Fluxograma	45
Figura 19 – Modelo de simulação	46
Figura 20 – Resultado da simulação com gasolina $\lambda=1$	52
Figura 21 - Resultado da simulação com metano $\lambda=1$	53
Figura 22 - Resultado da simulação com hidrogênio $\lambda=1$	55
Figura 23- Resultado da simulação com hidrogênio $\lambda=4$	56
Figura 24 – Comparativo de potência entre combustíveis	57
Figura 25– Comparativo de torque entre combustíveis	58
Figura 26 – Comparativo de consumo específico	58
Figura 27 – Comparativo de pressão efetiva	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedade dos combustíveis	22
Tabela 2 – Propriedade dos combustíveis (2).....	29
Tabela 3 – Propriedade dos combustíveis (3).....	30
Tabela 4 – Poder teórico relacionado à densidade	33
Tabela 5 – Temperatura de autoignição	34
Tabela 6 – Dutos de admissão e exaustão	47
Tabela 7 – Válvulas de admissão e exaustão.....	47
Tabela 8 – Propriedades internas do motor	47
Tabela 9 – Modelo de gasolina.....	48
Tabela 10 – Modelo de metano	48
Tabela 11 – Modelo de hidrogênio $\lambda=1$	49
Tabela 12 – Modelo de hidrogênio $\lambda=4$	49
Tabela 13 – Comparação entre modelo real e simulação	50
Tabela 14 – Resumo de desempenho com gasolina $\lambda=1$	51
Tabela 15 – Resumo de desempenho com metano $\lambda=1$	53
Tabela 16 – Resumo de desempenho com hidrogênio $\lambda=1$	54
Tabela 17 – Resumo de desempenho com hidrogênio $\lambda=4$	55
Tabela 18 – Comparação entre hidrogênio e gasolina.....	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI).....	15
2.1.1 Estrutura	15
2.1.2 Propriedades	18
2.1.2.1 Torque.....	18
2.1.2.2 Potência	18
2.1.2.3 Consumo específico de combustível	19
2.1.2.4 Pressão efetiva média	20
2.1.2.5 Curvas características	20
2.2.1 Gasolina	23
2.2.2 Metano	23
2.3 HIDROGÊNIO	24
2.3.1 Produção de hidrogênio	25
2.3.1.1 Reforma a vapor	25
2.3.1.2 Oxidação parcial.....	26
2.3.1.3 Eletrólise.....	26
2.3.2 Propriedades	28
2.3.2.1 Inflamabilidade.....	31
2.3.2.2 Distância de extinção.....	32
2.3.2.3 Energia de ignição	32
2.3.2.4 Difusividade	32
2.3.2.5 Densidade	33
2.3.2.6 Autoignição	33

2.3.2.7 Queima laminar	34
2.3.2.7.1 Instabilidade da frente de chama	34
2.3.2.7.2 Velocidade de queima laminar em condições atmosféricas.....	35
2.3.2.7.3 Velocidade de queima laminar em condições do motor.....	35
2.3.3 Armazenamento.....	36
2.3.3.1 Armazenamento por gás comprimido	36
2.3.3.2 Hidrogênio líquido.....	37
2.3.3.3 Armazenamento químico.....	37
2.3.4 Anomalias da combustão	37
2.3.4.1 Ignição à superfície.....	39
2.3.4.1.1 Pré-ignição	39
2.3.4.1.2 Fogo de volta (<i>backfire</i>).....	39
2.3.4.2 Autoignição (<i>knock</i>)	39
2.3.4.3 Soluções propostas	40
2.4 EMISSÃO DE POLUENTES	41
2.5 SIMULAÇÃO	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 MODELO PARA SIMULAÇÃO.....	46
3.1.1 Propriedades dutos de admissão e exaustão	47
3.1.2 Propriedades das válvulas de admissão e exaustão	47
3.1.3 Propriedades internas do motor.....	47
3.2 MODELOS DE COMBUSTÍVEIS	48
3.2.1 Gasolina	Erro! Indicador não definido.
3.2.2 Metano	Erro! Indicador não definido.
3.2.3 Hidrogênio.....	Erro! Indicador não definido.
4 RESULTADOS E DISCUÇÕES.....	49
4.1 GASOLINA.....	50
4.2 METANO	52
4.3 HIDROGÊNIO	54
4.4 COMPARATIVO ENTRE COMBUSTÍVEIS	56

4.4.1 Potência	56
4.4.2 Torque	57
4.4.3 Consumo específico de combustível	58
4.4.4 Pressão efetiva.....	59
5 CONCLUSÃO.....	62
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

P_e	Potência efetiva (W)
m_f	Fluxo de combustível (g/s)
n_R	Revoluções da árvore de manivelas para cada ciclo de potência por cilindro
N	Rotação do motor (rev/s).
V_d	Volume do cilindro deslocado por ciclo (dm ³)
λ	Lambda (taxa de ar em relação ao combustível)
φ	Phi (taxa de combustível em relação ao ar)
F	Força (N)
P	Potência do motor (kW)
T	Torque (N/m)
b	Braço de alavanca do dinamômetro (m)
n	Rotação do motor (rpm)
C_{esp}	Consumo específico de combustível (g/kWh)
ω	Velocidade angular do motor (rad/s)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABE	Mistura Acetona-Butano-Etanol
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DI	Injeção direta de combustível
EGR	Recirculação dos Gases do Escape
MON	Número de Octanas do Motor em altas rotações
MTBE	Metil-Tercio-Butil-Etileno
PFI	Injeção indireta de combustível
MCI	Motor de Combustão Interna
ICE	Ignição por Centelha
ICO	Ignição por Compressão
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
RON	Número de Octanas do Motor em baixas rotações
CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
H_2	Hidrogênio
HC	Hidrocarbonetos
H_2O	Água
O_2	Oxigênio
NO_x	Óxidos de nitrogênio
MP	Material Particulado
C_8H_{18}	n-octano ou Gasolina
CH_3OH	Metanol
C_2H_5OH	Etanol
C_4H_9OH	Álcool terc-butílico

1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento do motor de combustão interna (MCI) de ignição por centelha (ICE), desenvolvido por Nikolaus Otto em 1876 (HEYWOOD, 1988), o mundo começou a encolher e se tornar mais acessível.

Os motores de combustão interna geram energia através da conversão de energia química contida no combustível em calor e o calor assim produzido, em trabalho mecânico. A conversão da energia química em calor é realizada através da combustão, enquanto a conversão subsequente em trabalho mecânico é realizada permitindo-se que a energia do calor aumente a pressão dentro de um meio, que então realiza o trabalho na medida em que se expande (BOSCH, 2005, p.448).

Quando o volume de produção de motores a combustão interna cresceu, os seus efeitos colaterais foram notados e o principal é a emissão de poluentes no meio ambiente. No Brasil, o órgão responsável pelo controle de quanto um motor pode emitir de poluentes é o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Por sua vez, em 1986 o CONAMA criou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) (BRASIL,s.d).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2022), na sua primeira fase, PROCONVE L1, para veículos leves, os limites eram:

- CO: 24 g/km;
- HC: 2,10 g/km;
- NOx: 2 g/km.

No momento da elaboração deste trabalho, as fases mais atualizadas são a PROCONVE L7 e a PROCONVE L8, publicadas através da Resolução nº 492, de 20 de dezembro de 2018 (BRASIL, 2018). Agora, em 2022, os limites passaram a ser:

- CO: 1000 mg/km;
- MP (antigo HC): 6 mg/km;
- NOx: 80 mg/km.

Segundo BORRETI (2020), a perspectiva da “mobilidade do hidrogênio” está melhor do que nunca, e os motores a combustão interna movidos a hidrogênio são um dos pilares deste problema de mobilidade.

Para o desenvolvimento do atual trabalho foi escolhido o *software* de simulação computacional chamado *Lotus Engine Simulation* das indústrias de *Lotus Engineering Software*. Através da simulação computacional, o número de variáveis testadas e cenários

avaliados é algo que seria inviável financeiramente e levaria muito tempo para ser feito de outra forma.

1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade de diminuir a poluição ambiental causada por veículos automotores é clara e urgente. A implementação de uma infraestrutura para suprir as necessidades de veículos totalmente elétricos é difícil e custosa. Os impactos dos resíduos provenientes do descarte das baterias utilizadas nesses veículos precisam ser calculados.

A utilização do hidrogênio em motores a combustão interna já existentes, mostra-se como uma alternativa de mais fácil aderência e barata. No início pode-se combinar o uso de hidrogênio com a gasolina em um motor de combustão interna atual, e, no futuro, motores projetados especificamente para utilizar apenas hidrogênio poderão ser uma fonte de energia limpa e sustentável. Considerando a importância de buscar alternativas de reduzir emissões e de propor alternativas de combustíveis, este trabalho tem como objetivo analisar a utilização de hidrogênio num motor a combustão interna.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a utilização de hidrogênio como combustível em um motor a combustão interna.

1.2.2 Objetivos específicos

Do objetivo geral derivam-se os específicos como sendo:

- a) caracterizar o funcionamento de um motor a combustão interna através da análise computacional;
- b) analisar a variação do fator lambda em hidrogênio;
- c) elaborar e analisar as curvas de torque, potência e pressão efetiva na utilização de diversos combustíveis;
- d) gerar e analisar os dados de consumo de combustível na utilização de diversos combustíveis.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI)

Inventado no século XIX, os motores de combustão interna (MCI), foram uma das invenções mais impactantes na sociedade e no nível de vida das populações (MARTINS, 2006). Os MCIs são máquinas térmicas, geram energia através da conversão de energia química contida no combustível em calor e esse em trabalho mecânico (BOSCH, 2005). Segundo Martinelli (2003), os MCIs são classificados quanto aos itens a seguir.

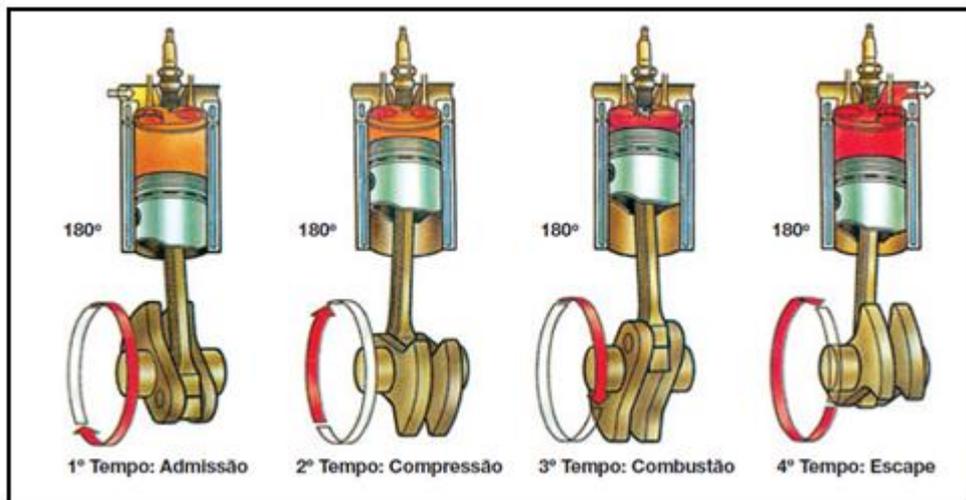
- a. Propriedade do gás na admissão: Diesel ou Otto.
- b. Ignição por centelha ou por compressão.
- c. Movimento do pistão: alternativo ou rotativo.
- d. Ciclo de trabalho: 2 ou 4 tempos.
- e. Número de cilindros: monocilíndrico ou policilíndrico.
- f. Posição dos cilindros: em linha, em V, opostos ou em estrela.
- g. Utilização: estacionária, industrial, veicular (terrestre e marítimo).

Neste trabalho, o foco está em motores de ciclo Otto, ignição por centelha, movimento alternativo 4 tempos, policilíndricos em qualquer posição e automotivos.

2.1.1 Estrutura

Motores de combustão interna de 4 tempos (ciclo Otto), estruturalmente, admite uma mistura de ar e combustível, sendo comprimida, inflamada através de uma centelha e, posteriormente, eliminando os gases resultantes, dando, assim, início a um novo ciclo. Resumidamente este é o processo realizado e repetidos a cada duas voltas completas do girabrequim. A Figura 1 ilustra os tempos de operação de um MCI Ciclo Otto.

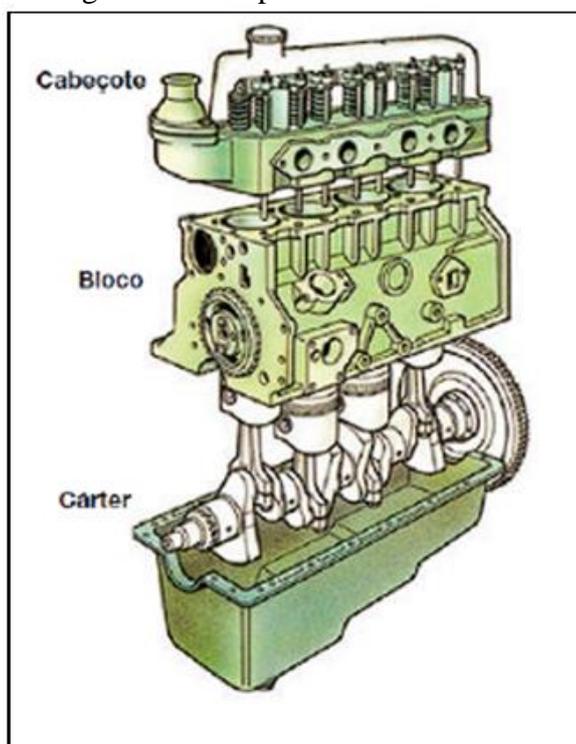
Figura 1 – Ciclo Otto



Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

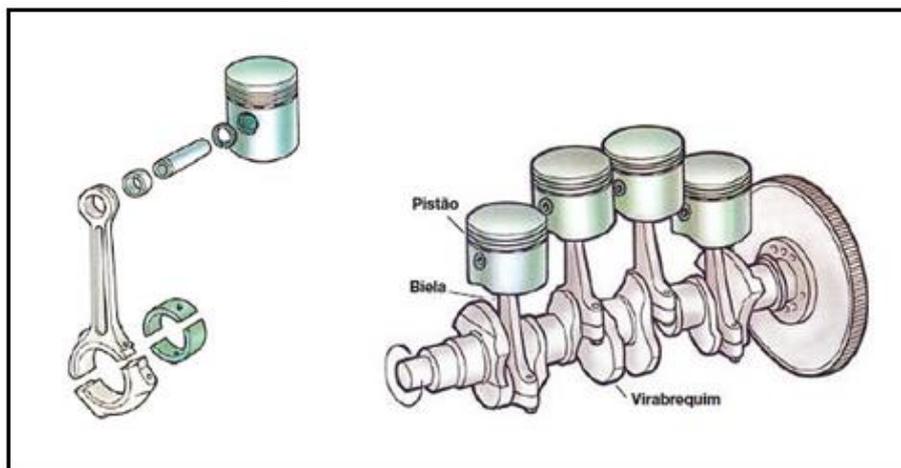
Um MCI possui diversos componentes, podendo dividi-lo em 3 grandes componentes estacionários: cabeçote, bloco e cárter. Além de um vasto número de componentes móveis. A Figura 2 mostra os 3 grupos de componentes de um MCI e a Figura 3 apresenta os principais componentes móveis.

Figura 2 – Componentes estacionários



Fonte: Adaptado de Mahle (s.d.)

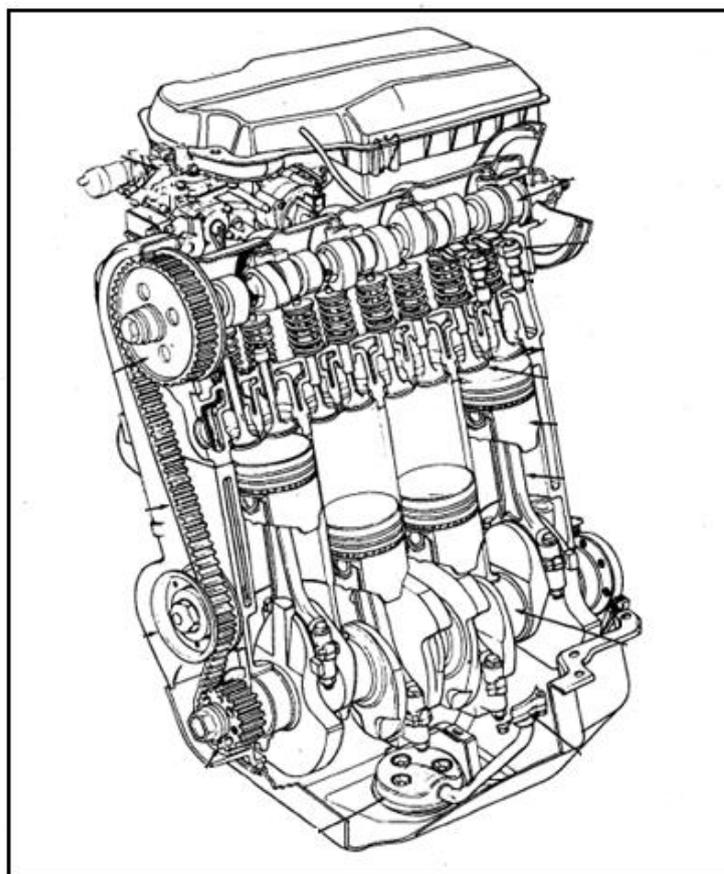
Figura 3 – Componentes móveis



Fonte: Adaptado de Mahle (s.d.)

A Figura 4 mostra um MCI de 4 cilindros em linha e em corte.

Figura 4 – Motor em corte

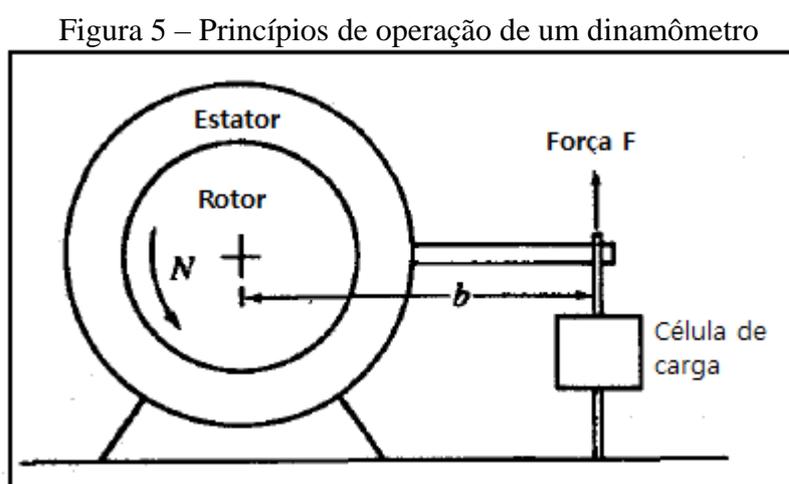


Fonte: Adaptado de Heywood (1998)

2.1.2 Propriedades

2.1.2.1 Torque

Segundo Heywood (1998), o torque de um motor é normalmente medido com o auxílio de um dinamômetro conectado ao volante do motor, como mostrado na Figura 5.



Fonte: Adaptado de Heywood (1998).

A partir deste esquema chega-se à equação (1):

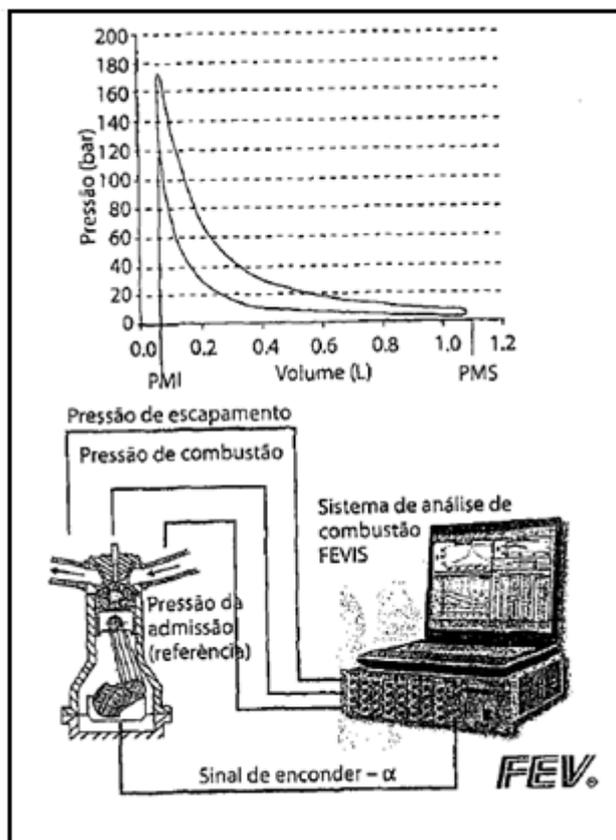
$$T = F \cdot b \quad (1)$$

Onde T é o torque (N·m); F representa a força (N) que o motor produz; b é o braço de alavanca do dinamômetro (m).

2.1.2.2 Potência

Segundo Oliveira (2017) potência é a rapidez com que ocorre a transferência ou conversão de energia em suas diversas formas. Matematicamente, é a quantidade de trabalho realizado em uma unidade de tempo. Brunetti (2012) classifica a potência em efetiva e indicada, sendo a primeira medida no eixo do motor e a segunda desenvolvida pelo ciclo termodinâmico do fluido ativo, representada pelo diagrama p-V na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama p-V de um motor de combustão interna



Fonte: Adaptado de Brunetti (2012).

Para análise em MCI, a potência mais importante é a efetiva, também chamada de potência de freio, que é a potência disponível para utilização em cargas (HEYWOOD, 1998). É definida pela seguinte equação (2):

$$P_e = \omega \cdot T = 2\pi \cdot n \cdot T \quad (2)$$

Onde P_e (W) representa a potência efetiva; ω é a velocidade angular do motor (rad/s); T é o torque no motor (Nm); n é a rotação do motor (rpm).

2.1.2.3 Consumo específico de combustível

Conforme as especificações de Heywood (1988), o consumo específico de combustível é a taxa do fluxo de combustível por unidade de potência. Mede-se, portanto, o quão eficiente um motor é, a partir do uso de combustível, para gerar trabalho. Para tal cálculo, utiliza-se a equação (3):

$$C_{esp} = \frac{\dot{m}_f}{P} \cdot 3600 \quad (3)$$

Onde: C_{esp} é o consumo específico de combustível (g/kWh); \dot{m}_f representa o fluxo de combustível (g/s); P é a potência do motor (kW).

2.1.2.4 Pressão efetiva média

Para medir as capacidades de um motor sem depender do seu tamanho, tarefa do torque, é utilizado um parâmetro chamado de pressão efetiva média (PEM). Para levantar tal valor divide-se o trabalho por ciclo pelo volume do cilindro deslocado por ciclo (HEYWOOD, 1988). Utiliza-se a equação (4) para tal:

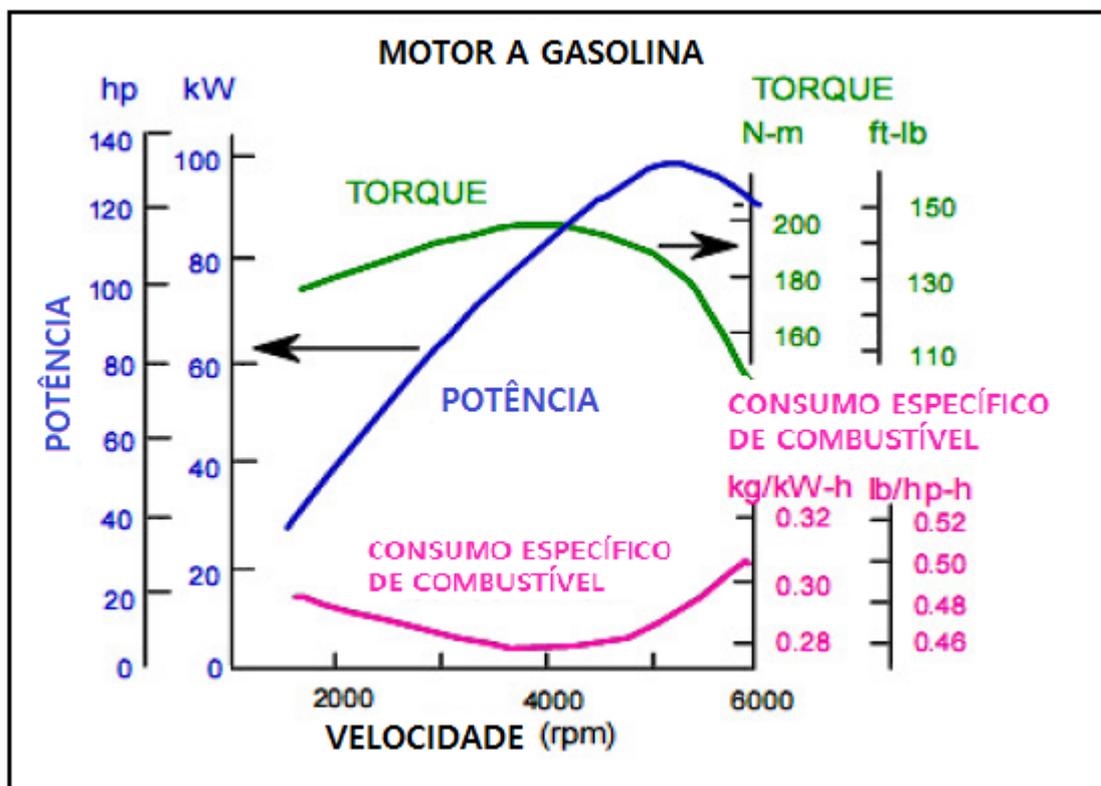
$$PEM = \frac{P n_R}{V_d N} \cdot 10^3 \quad (4)$$

Onde: PME (kPa); P é a potência (kW); n_R o número de revoluções da árvore de manivelas para cada ciclo de potência por cilindro (2 para motores ciclo Otto); V_d corresponde ao volume do cilindro deslocado por ciclo (dm^3); N rotação do motor no momento (rev/s).

2.1.2.5 Curvas características

A partir dos parâmetros acima mencionados é possível fazer a análise conjunta deles em um só gráfico. A análise entre esses fatores traz um comparativo das características de um determinado motor. Motores podem ser caracterizados por suas curvas de torque e potência em função da velocidade (GILLESPIE, 1992), como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Curva característica de motores a gasolina



Fonte: Adaptado de Gillespie (1992)

Cada motor tem suas curvas características, entretanto, os motores a gasolina tendem a ter similaridades entre si devido a sua construção. Contrapondo com certas características próprias de motor com construções diversas.

2.2 COMBUSTÍVEIS TRADICIONAIS

Os combustíveis são basicamente compostos por carbono e por hidrogênio, que reagem com o oxigênio do ar. Alguns combustíveis possuem também oxigênio, algo que não potencializa a combustão. Hidrocarbonetos com diferentes relações entre átomos de carbono e hidrogênio precisam de diferentes quantidades de oxigênio para ocorrer uma reação. O ar contém em base mássica cerca de 23% de oxigênio, sabendo a relação de carbono e hidrogênio do combustível é possível calcular a relação ar/combustível da sua relação estequiométrica (proporção que o combustível será todo queimado) (MARTINS, 2006).

Conforme Taylor (1985) expõem na Tabela 1, faz-se possível comparar uma variada gama de combustíveis com suas principais características químicas e físicas.

Tabela 1 – Propriedade dos combustíveis

Combustíveis líquidos, compostos puros									
Nome	Fórmula Química	Combustível Líquido						Vapor de Combustível	
		m_f	Gravidade Específica	H_{lq}	C_p	Q_{ch}	Q_e	C_p	k
Pentano Normal	C_5H_{12}	72	0,631	-	0,557	21,070	19,500	0,397	1,07
Hexano Normal	C_6H_{14}	86	0,664	-157	0,536	20,770	19,240	0,398	1,06
Heptano Normal	C_7H_{16}	100	0,668	-157	0,525	20,670	19,160	0,399	1,05
Octano Normal	C_8H_{18}	114	0,707	-156	0,526	20,590	19,100	0,400	1,05
Iso-Octano	C_8H_{18}	114	0,702	-141	0,515	20,570	19,080	0,400	1,05
Decano Normal	$C_{10}H_{22}$	142	0,734	-155	0,523	20,450	19,000	0,400	1,04
Dodecano Normal	$C_{12}H_{26}$	170	0,753	-154	0,521	20,420	18,980	0,400	1,03
Octano	$C_{12}H_{16}$	112	-	-145	0,525	-	19,035	0,400	1,05
Benzeno	C_6H_6	78	0,884	-186	0,411	17,990	17,270	0,277	1,08
Álcool Metílico	CH_3OH	32	0,796	-474	-	9,760	8,580	0,41	1,11
Álcool Etilico	C_2H_5OH	46	0,794	-362	-	12,780	11,550	0,46	1,13
Combustíveis líquidos, misturas típicas									
Gasolina	C_8H_{17}	113	0,702	-150	0,50	20,460	19,020	~0,4	~1,05
Gasolina	-	126	0,739	-142	0,48	20,260	18,900		
Querosene	-	154	0,825	-125	0,46	19,750	18,510		
Óleo Diesel Leve	$C_{12}H_{26}$	170	0,876	-115	0,45	19,240	18,250		
Óleo Diesel Médio	$C_{13}H_{28}$	184	0,920	-105	0,43	19,110	18,000		
Óleo Diesel Pesado	$C_{14}H_{30}$	198	0,960	-100	0,42	18,830	17,790		
Combustíveis sólidos									
C para CO_2	C	12	-	-	-	14,520	14,520	-	-
C para CO	C	12	-	-	-	4,340	4,340	-	-
m_f	Peso molecular do combustível								
H_{lq}	Entalpia do líquido acima do vapor à 60°F. Btu/lbm								
C_p	Calor específico a pressão constante Btu/lbm ³ R								
Q_{ch}	Maior calor da combustão Btu/lbm								
Q_e	Menor calor da combustão Btu/lbm								
k	Relação de calores específicos								

Fonte: Adaptado de Taylor (1985).

2.2.1 Gasolina

Segundo Martinelli (2003, p.11), “No Brasil (com exceção do Rio Grande do Sul) é utilizada uma gasolina única no mundo, pois trata-se de uma mistura de 76% de gasolina e 24% de álcool etílico (etanol).” No Rio Grande do Sul, ao invés de álcool, é utilizado MTBE (metil-térccio-butílo-etileno), aditivo que contém oxigênio para aumentar a eficiência da combustão com o hidrocarboneto Gasolina ($C_8 H_{18}$)_n. Já Brunetti (2012) nos mostra que a gasolina no Brasil é classificada como A e C, sendo a Gasolina A isenta de álcool etílico anidro e sendo restrita à sua comercialização, somente entre refinador e comercializador. A gasolina C com adição de 22% de álcool etílico anidro, podendo variar de 18% a 25% dependendo da produção da safra de cana de açúcar, sendo essa comercializada nos postos de abastecimento.

Para Brunetti (2012, p.325) “octanagem ou número de octano é a grandeza que representa a resistência da mistura do combustível com ar à autoignição, responsável pela detonação”. Martins (2006) define octanagem como poder antidetonante, propriedade que vai determinar a taxa de compressão possível no motor e indiretamente a velocidade de combustão. Fato que nos leva a concluir que quanto mais alta a octanagem mais elevada poderá ser a taxa de compressão, o que leva a uma combustão mais eficiente.

Martins (2006) explica que existem dois testes para classificar o índice de octanas de um combustível, o MON e o RON. Respectivamente, o primeiro é medido com o motor em altas rotações e o segundo em baixas rotações. Na Europa, utiliza-se o valor do teste, RON, enquanto nos Estados Unidos, o valor considerado corresponde à média entre os dois.

As características mais importantes da gasolina e seus respectivos valores, segundo Martinelli (2003), são:

- Poder calor inferior = 34,900 kJ/kg;
- Nº de octano (RON/MON) = 91/80;
- Calor latente de vaporização = 376~502 kJ/kg;
- Temperatura de ignição = 220 °C;
- Razão estequiométrica ar/combustível = 14,5.

2.2.2 Metano

Produto predominante no gás natural veicular, o metano corresponde a 88% da formulação. Conforme Martins (2006) é formado pelo hidrocarboneto CH_4 , o metano é altamente inflamável e inodoro. Sua formação dá-se pela fermentação de materiais orgânicos.

Por conta disso possui uma reduzida emissão de poluentes, outra vantagem é a possibilidade de ser usado em misturas de ar e combustível pobres, emitindo baixos índices de *HC* e *CO*.

De acordo com Verhelst e Wallner (2009) e Sherif et al. (2014) o metano possui as seguintes propriedades:

- Poder calor inferior = 50000 kJ/kg;
- Poder calor superior = 55500 kJ/kg;
- Densidade = 0,65 kg/m³;
- Peso molecular = 16,043 g/mol;
- Energia de ignição mínima = 0,28 mJ;
- Relação estequiométrica ar/combustível = 17,1 kg/kg.

2.3 HIDROGÊNIO

As reflexões que procedem, a partir de Faizal et al. (2019), mostram-nos que os combustíveis a base de hidrocarbonetos têm dominado os motores de propulsão há séculos. Com a maior força e relevância dos assuntos relacionados a poluição e meio ambiente, novas regulamentações e leis incentivaram, indiretamente, o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à combustíveis alternativos. O hidrogênio se destaca nesse novo cenário, devido à composição química livre de carbono e sua combustão sem emissão de gases nocivos, além de ser um combustível renovável.

De acordo com Atkins e Jones (2001, p.615):

O hidrogênio é o elemento mais abundante. Cerca de 89% de todos os átomos do universo são hidrogênio. Esses átomos formaram-se nos primeiros segundos, depois do Big Bang, o evento que marcou o início do universo. Entretanto existe muito pouco hidrogênio livre na Terra, porque as moléculas de H_2 são muito leves e movem-se com velocidade médias tão altas que tendem a escapar da gravidade do nosso planeta. São necessários átomos mais pesados para ancorar os átomos de hidrogênio ao planeta na forma de compostos. A maior parte do hidrogênio da Terra está na forma de água, nos oceanos ou presa no interior de minerais ou argilas. Hidrogênio é também encontrado juntamente com os hidrocarbonetos que formam os combustíveis fósseis: carvão, petróleo e gás natural. É preciso energia para liberar hidrogênio desses compostos e um dos desafios para desenvolver seu potencial como combustível é produzir o gás usando menos energia do que pode ser obtida por sua queima.

Convém também ressaltar que “por volta de 2040, os novos veículos movidos a hidrogênio reduzirão o CO_2 em 35%, veículos de transporte público movido a hidrogênio reduzirão o CO_2 em 40%, com uma média de redução na emissão de CO_2 de 44,8 g/km dependendo desses números.” (AKAI, ÖZTUNA e BÜYÜKAKIN, 2019, p.35258).

2.3.1 Produção de hidrogênio

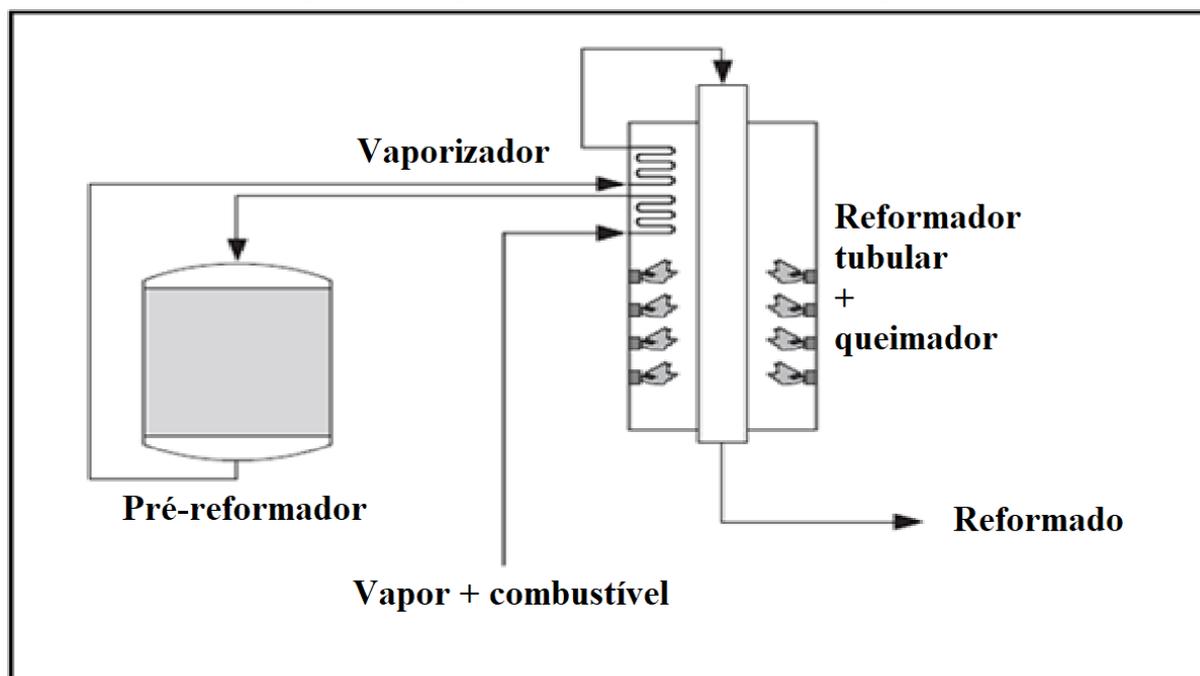
Como mencionado acima, o hidrogênio não se encontra livre. São necessários processos para chegar a sua forma desejada. A seguir serão discriminadas as principais.

2.3.1.1 Reforma a vapor

De acordo com Gavriilyuk (2013) para este processo é necessário o gás natural ou algum hidrocarboneto, comumente, metano. Em um primeiro momento, o vapor (H_2O) reage com o metano (CH_4) a temperaturas entre 700 °C e 1100 °C, a fim de produzir gás de síntese, que, por sua vez, é outra mistura gasosa contendo monóxidos de carbono e hidrogênio. Em um segundo momento, ocorre outra reação a uma temperatura mais baixa, 130 °C. Nesta etapa os produtos da reação são H_2 e CO_2 .

Para Sherif et al. (2014) este é um processo típico à produção de hidrogênio em grande escala que pode ser definido como um processo de quebra de combustível e reação entre gás ou metano com água. Estas reações podem acontecer no mesmo ou em ambientes separados. Segundo Faizal et al. (2019), este é o processo mais barato e mais comum para uma produção comercial. A Figura 8 exemplifica o processo.

Figura 8 – Esquemático de um reformador a vapor



Fonte: Adaptado de Sherif et al. (2014).

2.3.1.2 Oxidação parcial

Uma alternativa à reforma a vapor, segundo Gavrilyuk (2013), oxidação parcial ocorre parcialmente em um reformador de forma parecida ao processo anterior, com a distinção de estar sendo utilizada uma mistura de ar e combustível em condições de sub-estequiometria, proporcionando a formação de um gás de síntese rico em hidrogênio.

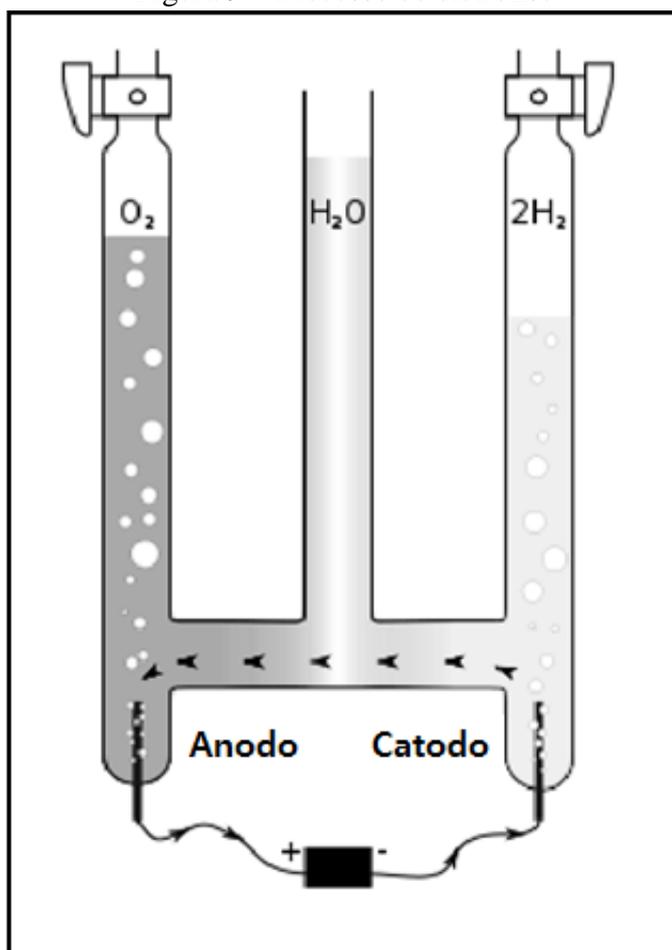
Em consonância Sherif et al. (2014) mencionam que na oxidação parcial é comumente utilizado oxigênio puro e hidrocarbonetos de maior graduação. Aquém ou um pouco além, Faizal et al. (2019) dizem que, em comparação com o processo de reforma a vapor completo, a oxidação parcial é muito mais rápida e precisa de uma instalação física menor. Porém, é mais ineficiente quanto à produção de hidrogênio.

2.3.1.3 Eletrólise

A Eletrólise é, nada mais, nada menos, o que Faizal et al. (2019), descrevem como o processo elétrico divisor de moléculas de água em hidrogênio e oxigênio. Dito de outra forma, Barbir (2005 apud SHERIFF, 2014, p.178) afirma que “a eletrólise da água é a tecnologia mais promissora e prática para a produção renovável de hidrogênio.”

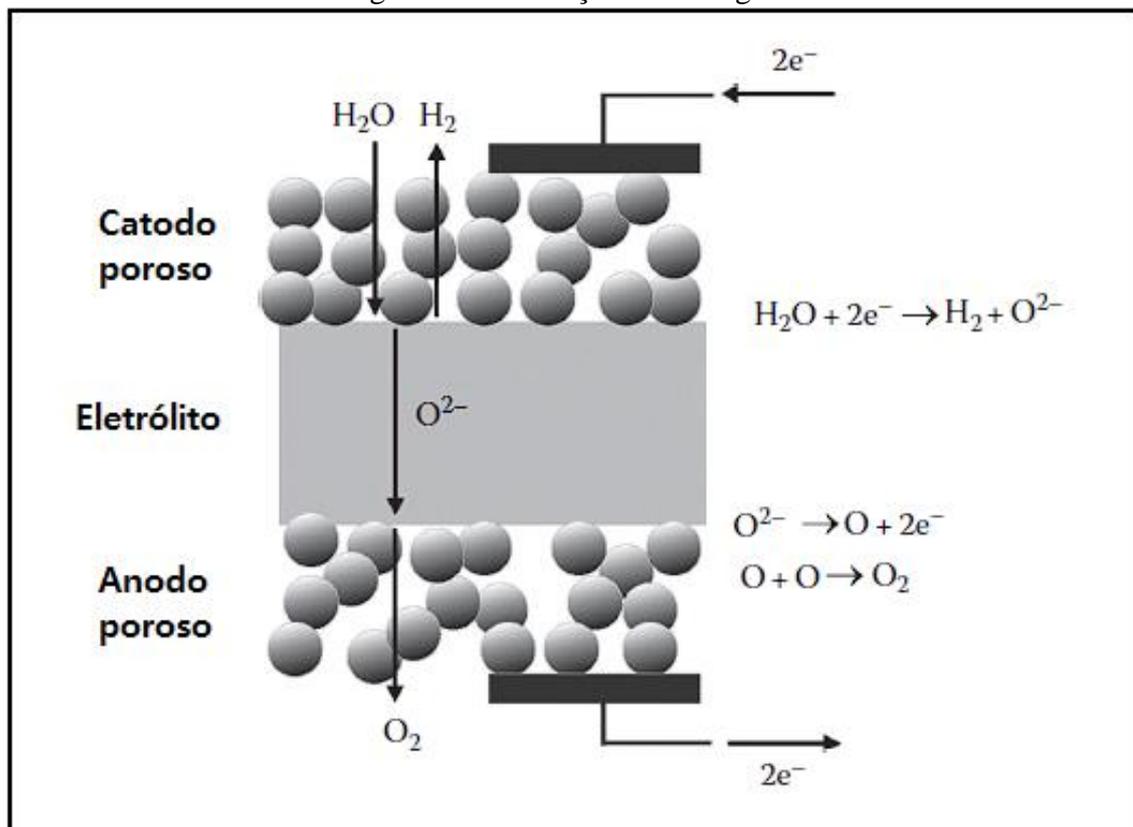
O processo de escala industrial é muito simples, com a utilização de um voltômetro de Hofmann, coloca-se água e um aparato com 3 cilindros interligados, geralmente de vidro. A água é colocada no cilindro do meio, que está aberto, juntamente com uma pequena quantidade de ácido sulfúrico é um composto iônico a fim de maximizar a condutividade elétrica da mistura. O voltômetro de Hofmann aplica uma tensão maior que 1,23 Volts a fim de dividir a água (H_2O), em $2H_2$ e O_2 . Nesse instante o oxigênio gasoso se forma no anodo e hidrogênio gasoso no catodo. Os três compostos se dividem nos três cilindros, água no meio, oxigênio e hidrogênio nos extremos, onde a saída é bloqueada até a sua remoção (GAVRILYUK, 2013). O esquema recém descrito pode ser mais bem visualizado na Figura 9, proposta por Gavrilyuk (2013). Enquanto na Figura 10, desenvolvida por Sherif et al. (2014), são exemplificadas o processo de separação da água ao ser exposta e excitada com o processo de eletrólise.

Figura 9 – Processo de eletrólise



Fonte: Adaptado de Gavrilyuk (2013).

Figura 10 – Produção de hidrogênio



Fonte: Adaptado de Sherif et al. (2014)

Há que se lembrar sempre de que Gavriilyuk (2013) expõe que a eficiência deste processo está na faixa entre 50% e 80%. A variação se deve a vasta gama de compostos que podem ser utilizados para realizar a função de ionização do sistema, dos materiais do eletrodo e da pureza da água. Desta feita, pode-se dizer que os eletrodos podem ser feitos de polímeros, alcalinos ou de óxidos sólidos (FAIZAL et al. 2019).

2.3.2 Propriedades

Focado no uso em motores de combustão interna, o hidrogênio possui algumas propriedades que o destacam seja positivamente ou negativamente em relação aos combustíveis tradicionais. O principal motivo para a sua utilização são as emissões livres de carbono.

Comparado ao ar, sua densidade é relativamente baixa, entretanto, seu poder calorífico é extremamente alto. Em motores onde a mistura ar e combustível é feita fora da câmara de combustão essa redução da eficiência volumétrica provoca uma baixa produção de torque e potência do motor. Em condições de estequiometria favorável sua combustão laminar chega a

ser dez vezes maior que a da gasolina. Outra vantagem em relação aos outros combustíveis é a sua eficiência calorífica, pois perde-se muito menos calor durante o processo (AKAI, ÖZTUNA e BÜYÜKAKIN, 2019).

Os autores Verhelst e Wallner (2009) mencionam ser mais fácil identificar e quantificar as propriedades físicas e química de combustíveis, como o hidrogênio, devido a sua composição química ser de apenas um elemento, ou seja, é o H_2 na sua própria forma. Para efeitos de comparação, foram relacionados na Tabela 2 algumas propriedades do hidrogênio, metano e iso-octano 14, 15, 16 e 17 (representando a gasolina).

Na Tabela 3, Verhelst e Wallner (2009), além de comparar os combustíveis entre si, comparam os seus valores em diferentes situações de mistura de ar e hidrogênio à temperatura de 300 (K) e pressão de 1 (atm). Com exceção para o quesito de velocidade de queima laminar, onde utilizou-se os valores de 360 (K) e 1 (atm). Primeiramente em uma condição estequiométrica de $\lambda=1$ (fator lambda: razão ar-combustível real e estequiométrica) e posteriormente com $\lambda=4$. É utilizado o valor da taxa de combustível em relação ao ar (ϕ) para reforçar o entendimento.

De modo semelhante, Akai, Öztuna e Büyükkakin (2020) também comparam propriedades do hidrogênio relacionados com sua utilização em motores de combustão interna com outros combustíveis atualmente utilizados, conforme evidencia-se na Tabela 4.

Tabela 2 – Propriedade dos combustíveis (2)

Propriedades	Hidrogênio	Metano	Isso-octano
Peso molecular (g/mol)	2,016	16,043	114,236
Densidade (kg/m^3)	0,08	0,65	692
Difusidade mássica do ar (cm^2/s)	0,61	0,16	~ 0,07
Energia de ignição mínima (mJ)	0,02	0,28	0,25
Distância mínima da temperatura (mm)	0,64	2,03	3,5
Limite de inflamabilidade no ar (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 (ϕ)	0,1 – 7,1	0,5 – 1,67	0,66 – 3,85
Poder calorífero inferior (MJ/kg)	120	50	44,3
Poder calorífero superior (MJ/kg)	142	55,5	47,8
Relação estequiométrica ar/combustível (kg/kg)	34,2	17,1	15,0
Relação estequiométrica ar/combustível (kmol/kmol)	2,387	9,547	59,666

Fonte: Verhelst e Wallner (2009) e Sherif et al. (2014)

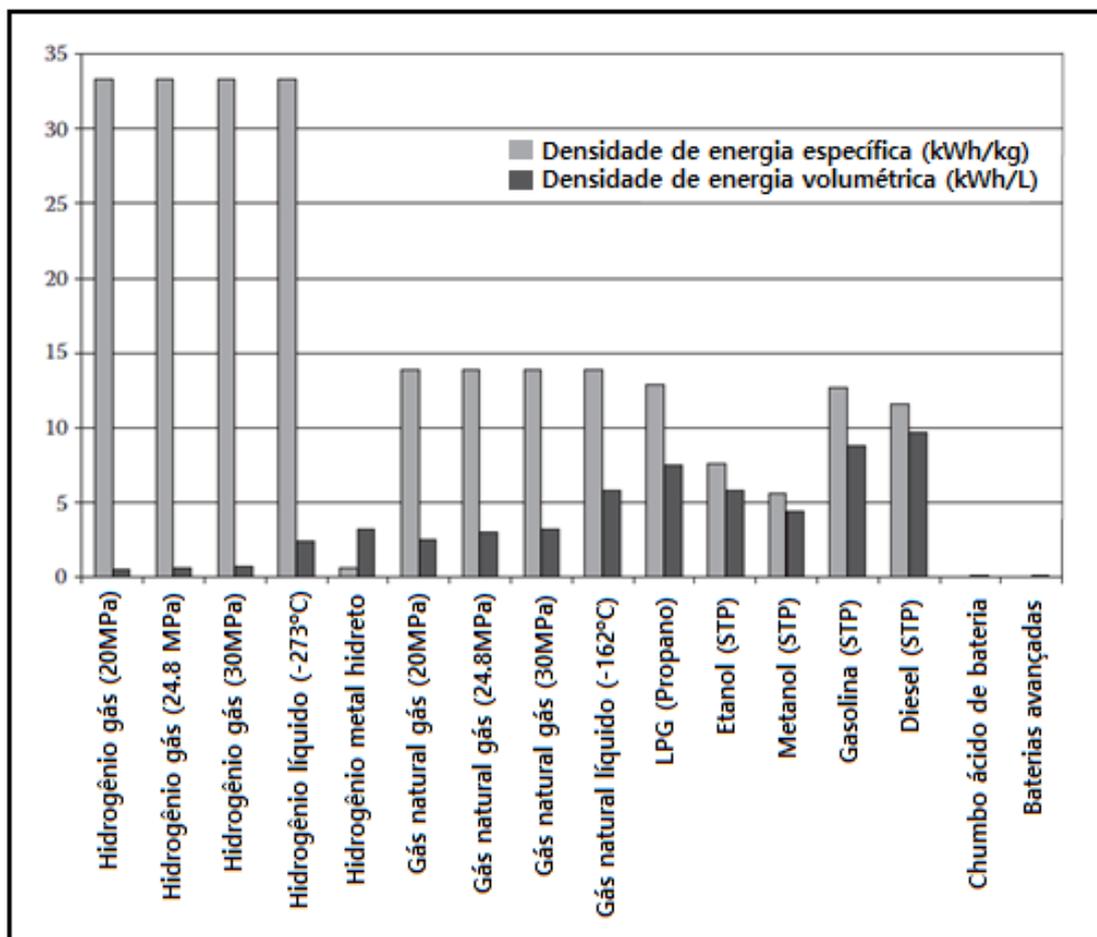
Tabela 3 – Propriedade dos combustíveis (3)

Propriedades	$H_2 \cdot$	$H_2 \cdot Ar$	$CH_4 \cdot$	C_8H_{18}
	Ar	$\lambda = 4$	Ar	$\lambda = 1$
	$\lambda = 1$	$\phi =$	$\lambda = 1$	$\phi = 1$
	$\phi = 1$	0,25	$\phi = 1$	
Volume fracionado de combustível (%)	29,5	9,5	9,5	,165
Densidade da mistura (kg/m^3)	0,850	1,068	1,123	1,229
Viscosidade cinemática (mm^2/s)	21,6	17,4	16	15,2
Temperatura de autoignição (K)	858	>858	813	690
Temperatura adiabática da chama (K)	2390	1061	2226	2276
Condutividade termal ($10^{-2} W / mK$)	4,97	3,17	2,42	2,36
Difusividade termal (mm^2/s)	42,1	26,8	20,1	18,3
Relação de calores específicos	1,401	1,400	1,354	1,389
Velocidade do som (m/s)	408,6	364,3	353,9	334,0
Relação estequiométrica ar/combustível (kg/kg)	34,2	136,6	17,1	15,1
Relação molar antes/depois da combustão	0,86	0,95	1,01	1,07
Velocidade laminar da combustão ~360K (cm/s)	290	12	48	45
Energia gravimétrica (kJ/kg)	3758	959	3028	3013
Energia volumétrica (kJ/m^3)	3189	1024	3041	3704

Fonte: Verhelst e Wallner (2009) e Sherif et al. (2014)

Antecedendo Akai, Öztuna e Büyükakin (2020), Sherif et al (2014) compararam a densidade de energia específica e a densidade de energia volumétrica de diversos combustíveis em variadas condições de utilizações. Tal trabalho de comparação está representado na Figura 11.

Figura 11 - Comparação de densidade de energia específica e densidade de energia volumétrica de diversos combustíveis



Fonte: Adaptado de Sherif et al (2014)

2.3.2.1 Inflamabilidade

No linguajar automotivo é a facilidade com que o combustível entra em combustão.

Conforme Faizal et al. (2019) afirmam que o hidrogênio é capaz de fazer o motor funcionar com mistura ar e combustível extremamente pobres, o que significa que no momento da combustão terá menos hidrogênio em relação ao ar do que quimicamente seria o ideal para uma reação estequiométrica lambda igual a 1. Tal feito é devido seu alto poder de inflamabilidade, partindo de proporções igual a 4% até 75% de volume em relação ao ar no momento da queima. Tais propriedades proporcionam uma baixa emissão de poluentes devido à baixa temperatura da combustão e grande economia de combustível.

Ao trocar a porcentagem por valor de lambda (λ), o hidrogênio varia entre $\lambda=10$ para a mistura mais pobre, e $\lambda=0,14$ para a mais rica. Com o aumento da pressão na câmara de

combustão, o limite inferior de inflamabilidade cai ainda mais, enquanto o limite superior tem um comportamento mais complexo (SHERIF et al., 2014).

2.3.2.2 Distância de extinção

De acordo com Faizal et al. (2019) “A distância de extinção é a atual distância originada da parede do cilindro interno na qual a chama da combustão é extinta”. O referido autor ainda informa que essa distância tem o valor de 0.6 mm. Tal capacidade faz os motores a hidrogênio trabalharem próximos do ciclo termodinâmico quando o fator lambda se aproxima do ideal.

Para Sherif et al. (2014), a distância de extinção é mínima em condições estequiométricas e diminui com o aumento da pressão e temperatura. Pode ser medida de duas formas, diretamente e indiretamente através da mínima energia de ignição necessária *versus* o espaçamento dos eletrodos da vela de ignição.

Na Tabela 2 observa-se que em relação ao metano a distância de extinção do hidrogênio é mais de 3 vezes menor, e em relação à gasolina é 5,4 vezes menor.

2.3.2.3 Energia de ignição

Ao utilizar velas de ignição capacitivas com aberturas de eletrodos em 0,5 mm, e relação estequiométrica com lambda entre 1.2 e 1.5, a energia de ignição necessária é de apenas 0,017 mJ. Se porventura a abertura de eletrodos fosse de 2 mm e lambda entre 0,42 e 3,77 a energia necessária sobe para 0,05 mJ (VERHELST E WALLNER, 2009).

Faizal et al. (2019) reforçam que a energia mínima de ignição para o hidrogênio é de 0,02 mJ, o que é extremamente baixa se comparada com a de combustíveis a base de petróleo que necessitam de ao menos 0,24 mJ. Tal propriedade pode ser uma desvantagem, tendo em vista que, é muito fácil a ocorrência da ignição prematura e de detonação, uma vez que a fonte de calor é relativamente baixa é capaz de iniciar a combustão do hidrogênio.

2.3.2.4 Difusividade

Essa propriedade mede a relação entre o calor conduzido e o calor armazenado, ou seja, é determinada pela razão entre o coeficiente da condutividade térmica da substância e o produto de sua massa específica pelo seu calor específico (INCROPERA, et al., 20...).

O hidrogênio, comparado com a gasolina, possui um nível de difusividade elevado. São duas as vantagens desta propriedade. Primeira, a facilidade de tornar a mistura ar combustível homogênea, o que torna a combustão mais eficiente. Segunda, em situações de vazamento, o hidrogênio se mistura facilmente com o ar atmosférico, o que diminui a sua concentração e conseqüente o risco de explosão (FAIZAL et al., 2019).

2.3.2.5 Densidade

A densidade do hidrogênio é extremamente baixa. Ao comparar os valores presentes na Tabela 2 calcula-se que em comparação ao metano sua densidade é em torno de 8 vezes menor e em relação ao iso-octano (gasolina) 8650 vezes menor. Para Faizal et al. (2019), isso significa que é necessária uma quantidade muito grande de hidrogênio para energizar um veículo. É necessário utilizar o hidrogênio sob alta pressão ou na forma líquida para aumentar sua densidade e tornar possível a utilização em motores automotores.

Conforme Sheriff et al. (2014), a Tabela 4 apresenta, ao comparar motores com injeção indireta (PFI) e injeção direta (DI), o poder teórico relacionado a densidade do hidrogênio e do metano aumenta significativamente.

Tabela 4 – Poder teórico relacionado à densidade

	Hidrogênio (%)	Metano (%)	Iso-octano (%)
PFI	86	92	100
DI	119	100	100

Fonte: Adaptado de Sheriff et al. (2014)

2.3.2.6 Autoignição

De acordo com Faizal et al. (2019), a propriedade de autoignição é importante pois é um dos parâmetros mais relevantes para saber o quanto um combustível suporta ser comprimido sem entrar em combustão espontânea. Parâmetro fundamental para definir a taxa de compressão de um motor de combustão interna. A temperatura de autoignição do hidrogênio é de 585 °C, temperatura difícil de ser atingida sem o auxílio de uma fonte externa de ignição. A Tabela 5 relaciona diversos combustíveis com suas temperaturas de autoignição.

Tabela 5 – Temperatura de autoignição

Combustível	Temperatura de autoignição (°C)
Metano	540-630
Propano	450
Octano	415
Metanol	460
Hidrogênio	585
Gasolina	260-460
Diesel	180-320

Fonte: Adaptado de Faizal et al. (2019)

2.3.2.7 Queima laminar

Tanto Verhelst e Wallner (2009) quanto Sheriff et al. (2014) relatam que a velocidade de queima laminar da mistura ar e combustível é importante para impor limites aos valores de taxa de compressão e temperatura dentro da câmara de combustão. A velocidade precisa ser alta o bastante para atingir todo o volume de mistura ar e combustível, uma vez que ela tem início em um único ponto através de uma agente de ignição externo. Caso a velocidade seja lenta, o motor completará o ciclo de combustão e começará o de escape antes de todo o combustível ter sido queimado. Por efeito, diminui-se a eficiência do motor ao desperdiçar combustível.

2.3.2.7.1 Instabilidade da frente de chama

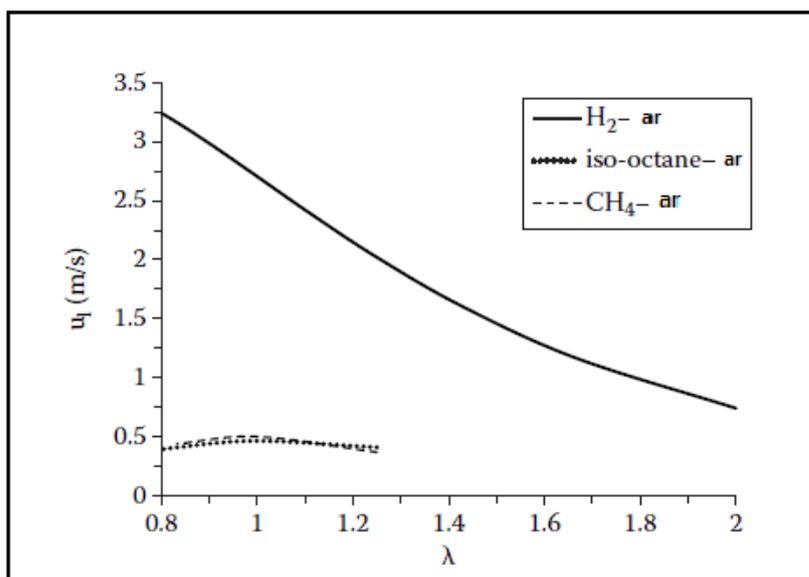
No processo de queima laminar, a chama separa os gases queimados dos não queimados. Qualquer variação na chama aumentará o volume de queima ao aumentar a área da chama. Este fenômeno acarreta a diminuição de velocidade do gás, graças a descontinuidade da densidade entre gases queimados e não queimados, tal instabilidade hidrodinâmica é chamada de Instabilidade de Darrieus-Landau. (SHERIF et al., 2014 e VERHELST e WALLNER, 2009).

Ambos os autores supracitados, apresentam uma segunda instabilidade, conhecida como instabilidade de Rayleigh-Taylor. Devido aos efeitos gravitacionais, esta instabilidade ocorre pela presença de um fluido menos denso embaixo de um mais denso. Por fim, Sheriff et al. (2014) e Verhelst e Wallner (2009), retratam outra instabilidade da frente de chama, causada pela taxa desigual com que a temperatura é distribuída pelos gases queimados *versus* gases não queimados.

2.3.2.7.2 Velocidade de queima laminar em condições atmosféricas

Verhelst e Wallner (2009) e Sheriff et al. (2014) mostram que a velocidade de alongamento da chama varia diretamente com o valor de lambda. Devido ao grande alcance da difusividade do hidrogênio por conta das mais diversas proporções estequiométricas aplicáveis. Na figura (12) o gráfico reflete as velocidades em relação a estequiometria à temperatura de 360K e 1 bar de pressão atmosférica.

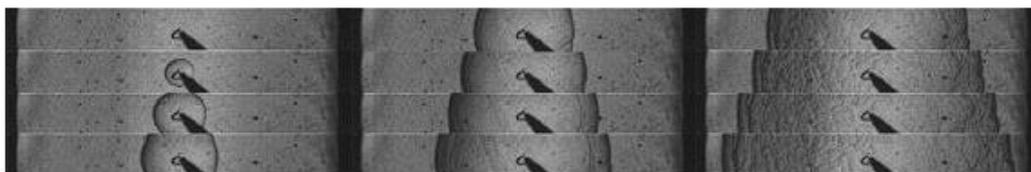
Figura 12 – Velocidade de queima laminar



Fonte: Adaptado de Verhelst e Wallner (2009) e Sheriff et al. (2014).

Nessas condições de pressão atmosférica, a queima ocorre de maneira pouco turbulenta. Através das fotografias de Schlieren, tiradas com um fator lambda = 1,43, temperatura de 365K e pressão atmosférica de 1 bar, Verhelst e Wallner (2009) e Sheriff et al. (2014) demonstram o referido fenômeno.

Figura 13 – Fotografias de Schlieren em condições atmosféricas



Fonte: Verhelst e Wallner (2009) e Sheriff et al. (2014).

2.3.2.7.3 Velocidade de queima laminar em condições do motor

Verhelst e Wallner (2009) e Sheriff et al. (2014) afirmam que nas condições do motor é inviável e impreciso estimar as velocidades de queima. A grande instabilidade provocada pelas elevadas pressões torna as medições impossíveis. Entretanto, através das fotografias de Schilieren é possível ter uma ideia do comportamento da queima, muito mais turbulenta. Com parâmetros: $\Lambda = 1,25$, temperatura de 300 K e pressão em 5 bar chegou-se na figura (14).

Figura 14 – Fotografias de Schilieren em condições do motor



Fonte: Verhelst e Wallner (2009) e Sheriff et al. (2014)

2.3.3 Armazenamento

Ao tratar da aplicabilidade do hidrogênio, o seu armazenamento é um dos principais tópicos para viabilizar qualquer projeto. A energia em relação à sua massa é uma das maiores dentre todos os combustíveis, porém, em condições de temperatura e pressão ambiente, tem uma das energias em relação a densidade mais baixa. O empecilho causado pela sua alta densidade em condições normais é resolvido ou minimizado ao utilizar estratégias de armazenamento alternativas (FAIZAL et al., 2019).

2.3.3.1 Armazenamento por gás comprimido

O armazenamento por gás comprimido, de acordo com Baptista et al. (2019), é a forma de armazenamento mais comum para pequenas quantidades de hidrogênio. Utiliza-se cilindro de várias formas e tamanhos. No entanto, é preciso cuidado na escolha do material utilizado para fabricar estes cilindros, uma vez que o hidrogênio possui uma molécula muito pequena e propensa a vazamentos.

Faizal et al. (2019) informam que as ligas mais utilizadas são: cobre, alumínio e aço, podendo ou não ser envoltos em fibra de vidro. Estes tanques são especificados especialmente para aplicações onde o seu peso não seja um problema. As pressões utilizadas variam de 34,47 a 68,94 Mpa. Estes valores elevados de pressão, relacionados com os problemas de vazamentos levantados por Baptista et al. (2019), juntamente com alta inflamabilidade do hidrogênio, faz

com que o armazenamento por gás comprimido requeira elevados níveis de atenção quanto a sua periculosidade.

2.3.3.2 Hidrogênio líquido

O hidrogênio líquido é considerado o método mais promissor para algumas indústrias automotivas, chamado de LH_2 . O hidrogênio líquido quando armazenado em grandes cilindros à vácuo, pode chegar a 3200 metros cúbicos. Já em veículos, foi estudado o uso de vários cilindros com capacidade de 0,120 metros cúbicos, o equivalente a 9,2 kg de LH_2 (BAPTISTA et al., 2019).

De acordo com Faizal et al. (2019), este processo pode ser feito à $-251,95\text{ °C}$ e baixos níveis de pressão, apenas o suficiente para reduzir a densidade. O hidrogênio líquido é a escolha de combustível para foguetes, desde o início da corrida espacial.

Ao se utilizar pressões superiores à 35 MPa (350 bar), é feita a crio-compressão do hidrogênio, onde a energia em relação a densidade é extremamente alta (FAIZAL et al., 2019).

2.3.3.3 Armazenamento químico

O hidrogênio pode ser quimicamente ligado a outros compostos metálicos, como por exemplo: ferro, níquel, cromo e titânio. Este processo forma os hidretos. Além de ligas metálicas, o hidrogênio pode ser ligado a nanofibras de carbono. Seu armazenamento é feito em contêineres, tendo o volume atrelado às características do composto escolhido (BAPTISTA et al., 2019).

Faizal et al. (2019) referem-se que o processo de separação do hidrogênio e seu composto provoca reações exotérmicas, ou seja, liberação de calor para o ambiente. O processo de junção dos componentes, por outro lado, depende muito do material a ser utilizado com o hidrogênio, suas reações geralmente são imprevisíveis.

2.3.4 Anomalias da combustão

Devido às suas propriedades únicas, o hidrogênio apresenta desafios, até então, não solucionados de forma satisfatória a nível industrial quanto a sua utilização em massa em veículos automotores.

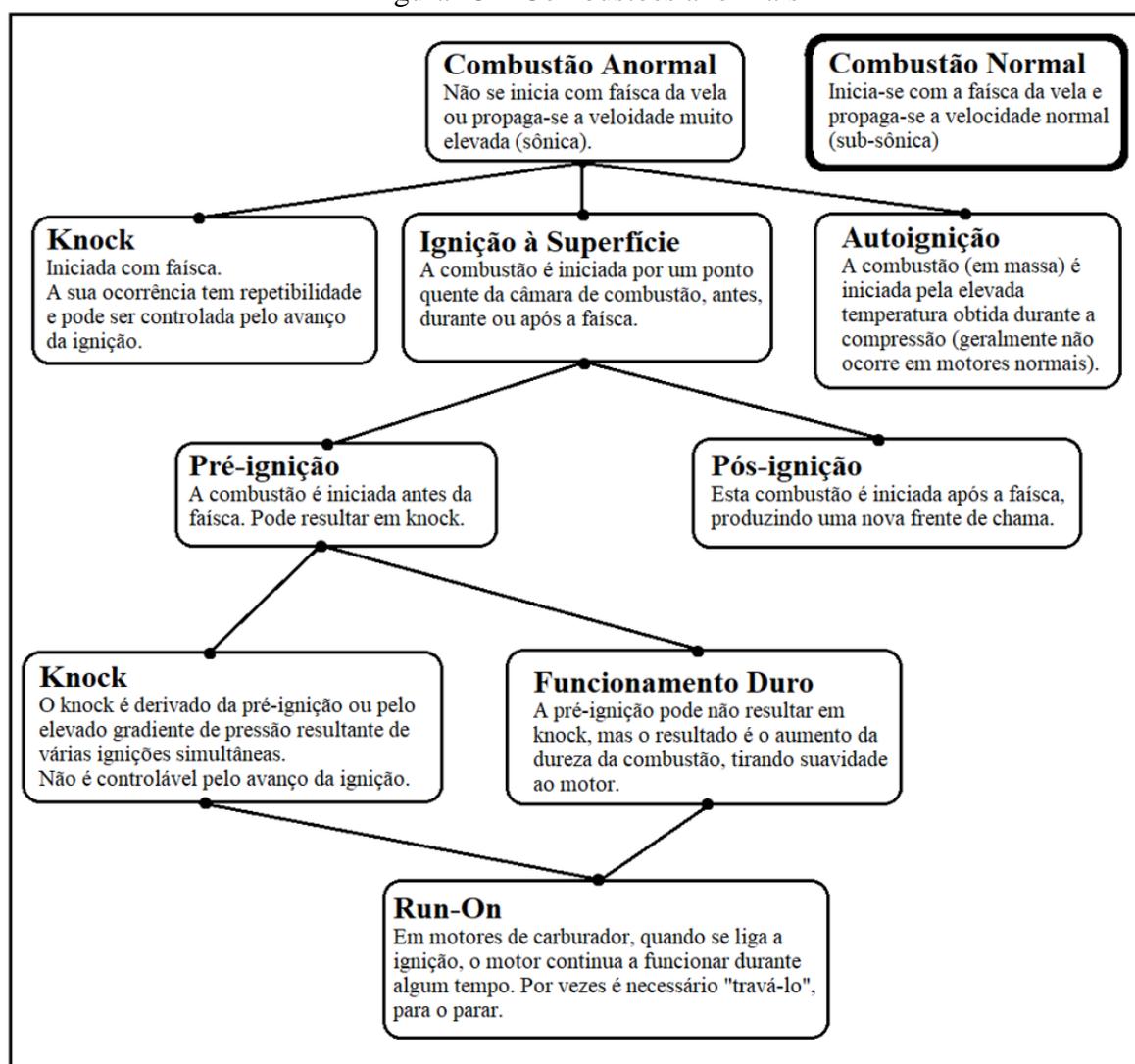
“O uso de hidrogênio como combustível em motores de combustão interna causa alguns problemas quanto a enorme variação dos valores de inflamabilidade, baixo

requerimento de energia para ignição e altas velocidades de chama. Estes problemas são a razão por que o hidrogênio não é considerado um combustível eficiente no qual pode causar fenômenos de combustão indesejáveis usualmente resumidos como anomalias da combustão.” (FAIZAL et al., 2019).

Akai, Öztuna e Büyükakin (2020), destacam também um problema relacionado ao alto peso dos reservatórios de hidrogênio, uma vez que este combustível precisa de reservatórios grande, graça a sua baixa densidade.

Martins (2006) exemplifica a dinâmica das combustões anormais, através da Figura 15. Ele relaciona o que é causa e o que é consequência durante o processo em um motor de combustão interna ciclo Otto.

Figura 15 – Combustões anormais



Fonte: Adaptado de Martins (2006)

2.3.4.1 Ignição à superfície

2.3.4.1.1 Pré-ignição

De acordo com Akai, Öztuna e Büyükakin (2020), este fenômeno ocorre devido ao baixo valor de energia necessário para que ocorra a ignição e rápida velocidade de combustão do hidrogênio. Para Martins (2006), Akai, Öztuna e Büyükakin (2020) e Faizal et al. (2019), a pré-ignição é iniciada a partir de pontos quentes dentro da câmara de combustão. Os principais são as velas de ignição, válvulas de escape e pontos onde encontram-se resquícios da combustão ocorrida no ciclo anterior.

Akai, Öztuna e Büyükakin (2020) sugerem controlar a temperatura da combustão através do seu resfriamento via sprays de água, controle via EGR dos gases de escape e redução dos tempos de abertura das válvulas de admissão e escape. Faizal et al. (2019), em adição, recomenda modificações no design das velas de ignição, válvulas de escape alimentadas com sódio e otimização dos sistemas de injeção direta de hidrogênio.

2.3.4.1.2 Fogo de volta (*backfire*)

De acordo com Akai, Öztuna e Büyükakin (2020) e Faizal et al. (2019), o fenômeno de *backfire* ocorre pelos mesmos motivos da pré-ignição, pontos quentes que provocam a ignição do combustível. A grande diferença é que a anomalia anterior ocorre na fase de compressão do ciclo, onde as válvulas estão fechadas. No fenômeno de fogo de volta, o motor está na fase de admissão, o que significa que as válvulas de admissão estão abertas.

Essa diferença faz com que a combustão ocorrida de forma indesejada e incontrolada, afete o fluxo de entrada da mistura ar combustível. Com isso, o hidrogênio que ainda se encontra nos dutos de admissão, entra em combustão e danifica fisicamente o sistema e altera o fluxo de entrada o que descompassa o ciclo do motor.

2.3.4.2 Autoignição (*knock*)

O fenômeno também conhecido por “grilar” é um tipo de combustão onde uma parte da mistura entra em combustão de forma espontânea porque os valores de temperatura e pressão dentro da câmara de combustão excederam os limites admitidos pelo combustível (MARTINS, 2006). Conforme explicita Faizal et al. (2019), na pressão atmosférica, a temperatura de

autoignição do hidrogênio é de 585 °C, valor que aumenta conforme o aumento de pressão do meio. O autor também nos recorda que cada combustível tem seus valores limites estabelecidos pelas tabelas obtidas com os testes RON e MON, “O knock pode ser definido como ignição espontânea da mistura ar-hidrogênio frente a frente de chama depois do tempo da compressão.” (AKAI, ÖZTUNA E BÜYÜKAKIN, 2020, p.35261).

Akai, Öztuna e Büyükakin (2020) em conformidade a Faizal et al. (2019), expõem que a autoignição promove o aumento da temperatura e da pressão no interior da câmara de combustão. Este aumento descontrolado reduz a potência do motor e aumenta a produção de gases nocivos. Para Faizal et al. (2019) é muito difícil estabelecer parâmetros para o hidrogênio como combustíveis em motor de combustão interna devido ao grande número de variáveis envolvidas, como a taxa de compressão, estequiometria da mistura e temperatura da entrada de ar.

2.3.4.3 Soluções propostas

Ambos os autores, Akai, Öztuna e Büyükakin (2020) e Faizal et al. (2019), identificam a redução de temperatura na câmara de combustão como o fator chave para a melhor utilização do hidrogênio nesta aplicação. As alternativas propostas são as seguintes:

- Velas de ignição com eletrodos de baixa temperatura;
- Aumento no número de válvulas de admissão e escape;
- Sistema de resfriamento por água nas válvulas;
- Injeção de água na câmara de combustão;
- Recirculação dos gases de escape (EGR);
- Desenvolvimento de novos óleos lubrificantes;
- Mudança na estrutura dos materiais do motor, priorizando a ductibilidade e fragilidade;
- Desenvolvimento de estruturas que provoquem a formação de turbulências na câmara de combustão;
- Aumento da capacidade volumétrica dos motores.

2.4 EMISSÃO DE POLUENTES

A emissão de poluentes é o tópico que mais motiva e provoca desconforto na indústria automotiva. Não especificamente emissões, mas sim, a redução da quantidade e impacto das emissões de gases poluentes provenientes dos motores de combustão interna no meio ambiente.

As emissões são o resultado da combustão do combustível dentro do motor. Isso significa que teremos diferentes emissões para diferentes motores e diferentes combustíveis. Pode-se alterar o combustível e a partir dele alterar o motor para funcionar corretamente com ele, ou, pode-se aperfeiçoar o motor independente do combustível para minimizar a emissão de poluentes.

Os gases de escape dos motores de combustão interna, conforme Heywood (1998) são:

- Óxidos de nitrogênio - NO_x ;
- Monóxido de carbono - CO;
- Dióxido de carbono - CO_2 ;
- Hidrocarbonetos - HC.

Conforme Martins (2006, p. 305): “A constituição dos gases de escape se um motor a gasolina inclui componentes de carácter redutor (H_2 , CO, hidrocarbonetos não queimados – HC), de carácter oxidante (O_2 , NO, NO_2), inertes (CO_2 , H_2O , N_2) e partículas sólidas (PM).” Baseado ainda em Martins (2006), segue uma breve explanação sobre os efeitos de cada gás para o ser humano e meio ambiente:

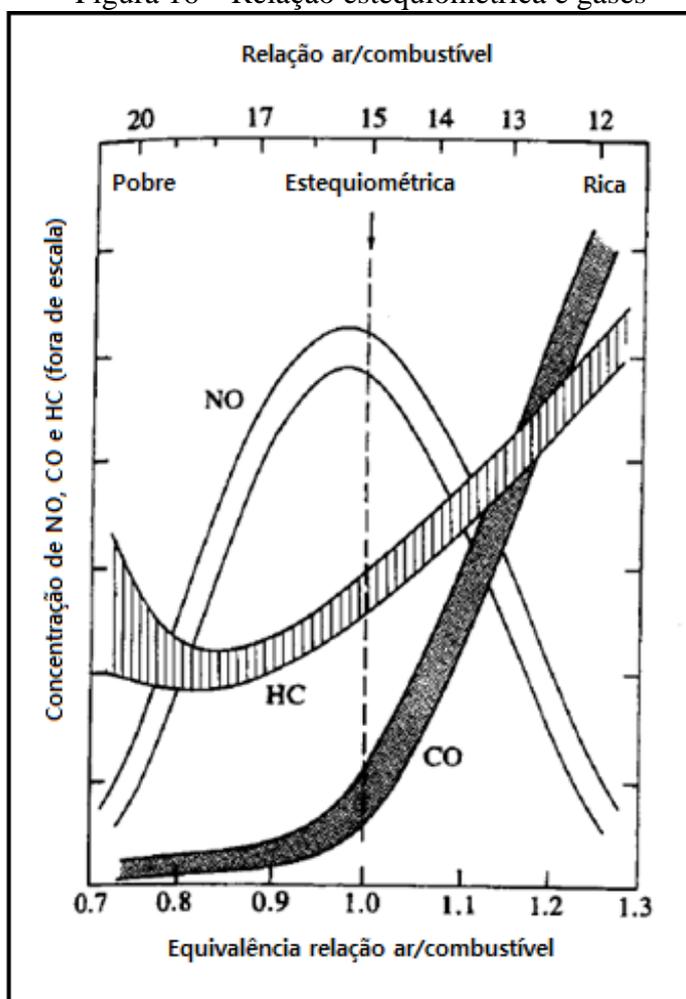
- Monóxido de carbono – CO: Gás venenoso, incolor e inodoro. Inalado de forma prolongada pode causar insuficiência cardíaca, deficiência na circulação do sangue, anemia e problemas no crescimento de fetos. Em contato com o Oxigênio o CO oxida formando o CO_2 ,
- Óxidos de nitrogênio - NO_x : Também chamado de Óxidos de Azoto, combinados com hidrocarbonetos (HC) e a radiação solar formam nuvens de fumaça prejudiciais as vias respiratórias, podendo provocar infecções e asma. Essa combinação pode ser transformada em ácido nítrico e nitratos, responsáveis por chuvas ácidas que afetam lagos e florestas.
- Hidrocarbonetos - HC: Quando não queimados e combinados com NO_x podem provocar dor de cabeça, irritação nos olhos e náuseas, entre outros problemas respiratórios. O HC também é considerado cancerígeno.

Não se pode deixar de lado o Gases de Efeito Estufa (GEE), tema principal no combate à poluição do meio ambiente.

A emissão de GEE no setor de transportes responde por cerca de 25% do total de emissões globais, sendo o transporte privado responsável pela maior parte dessas emissões, com a estimativa de que, até 2050, a energia utilizada nos sistemas de transporte dobre, tendo como base o ano de 2008, o que aumentaria ainda mais a emissão desses gases caso ações de mitigação dessas emissões não sejam implantadas (IEA, 2009). (ANDRADE, 2019, p.920)

Conforme Heywood nos mostra na Figura 16, existe uma relação direta entre a estequiometria da mistura ar/combustível e dos gases gerados pela combustão.

Figura 16 – Relação estequiométrica e gases



Fonte: Adaptado de Heywood (1998)

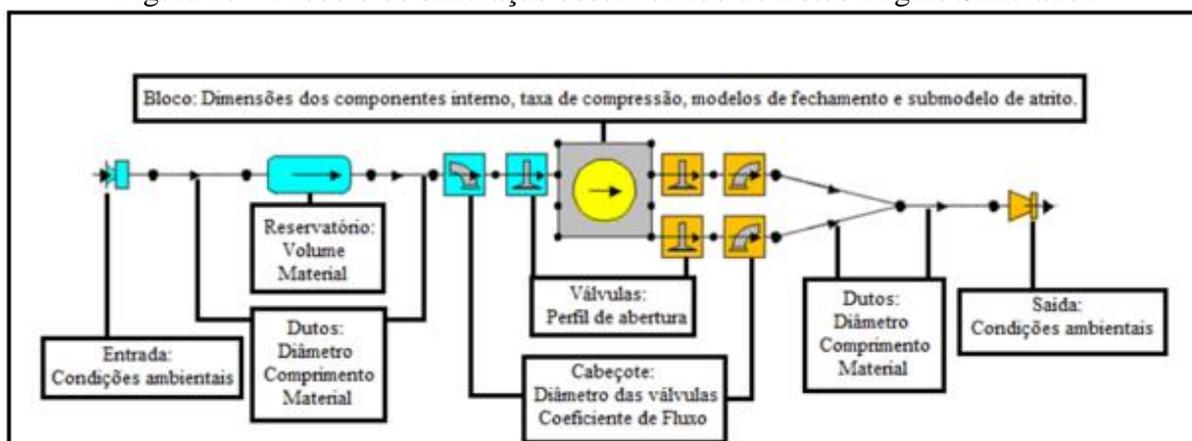
2.5 SIMULAÇÃO

A opção utilizada para a simulação de desempenho foi o *software Lotus Engine Simulation*. Esse software, utiliza um sistema de blocos e conjuntos de dados classificados em básicos e avançados. A Figura 17 ilustra uma aplicação do *software Lotus Engine*.

Este software é fornecido gratuitamente pela empresa *Lotus Engineering Software*. Conforme Batista (2016), esse software é de grande valia, uma ferramenta capaz de proporcionar uma simulação realista e levantar dados relevantes e confiáveis, entretanto é preciso atenção quanto aos dados de entrada.

Valores de torque, potência, consumo de combustível e pressão efetiva são obtidos tanto analiticamente quanto graficamente.

Figura 17 – Modelo de simulação desenvolvido do Lotus Engine Simulation



Fonte: Batista (2016)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho analisa a utilização de hidrogênio como combustível em um motor a combustão interna. Para isso foi seguido o fluxograma presente na Figura 18. Uma forma de analisar preliminarmente o desempenho de um motor de forma virtual é através de softwares de simulação.

As simulações ocorreram tendo como base três combustíveis: gasolina, metano e hidrogênio. O objetivo é comparar um combustível fóssil líquido, um orgânico gasoso com o alvo do estudo, o hidrogênio.

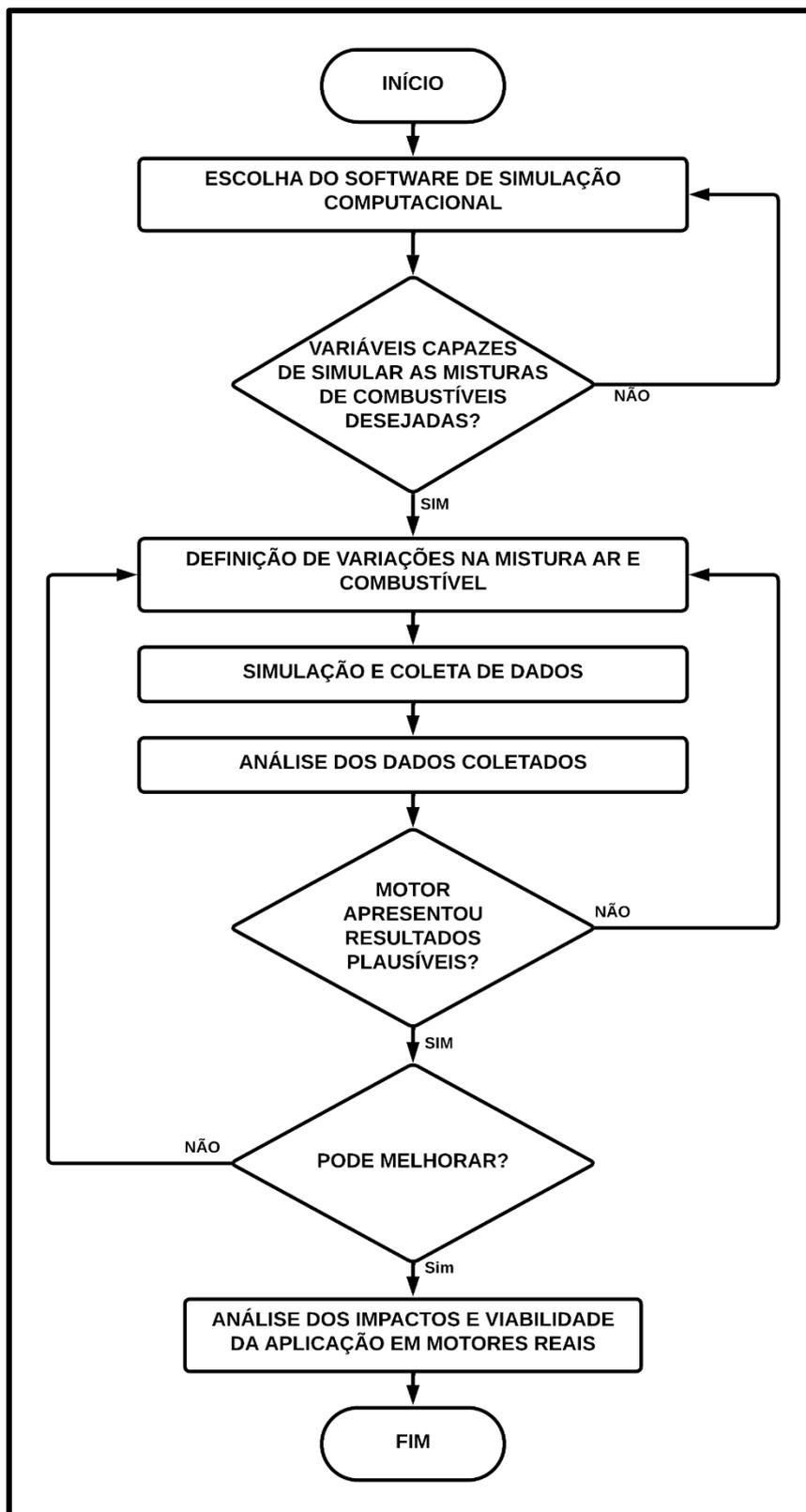
O motor escolhido para ser usado como modelo para a simulação é do Renault Clio de terceira geração 1.6 16V movido à gasolina, vendido entre 2005 e 2014 na Europa. Os parâmetros presentes da Tabela 6 são valores originais fornecidos pelo fabricante. Tais dados foram utilizados no software para obtenção dos parâmetros desejados. Na fase final do presente trabalho, comenta-se sobre as possibilidades de melhoria.

Tabela 6 – Especificações técnicas do motor do Renault Clio 3ª geração 1.6 16V

Especificações técnicas do motor do Renault Clio 3ª geração 1.6 16V	
Características	Especificações
Cilindros	4 em linha
Ciclo	4 tempos
Deslocamento volumétrico	1598 cm ³
Combustível	Gasolina
Taxa de compressão	11:1
Potência	82 kW à 6000 rpm
Torque	151 Nm à 4250 rpm
Diâmetro cilindro / curso pistão	79,5/50,5 mm
Consumo médio	6,7 L/100 km
CO ₂	160 g/km

Fonte: Adaptado de <https://www.ultimatespecs.com/br/carros-ficha-tecnica/Renault/983/Renault-Clio-3-Phase-1-5Doors--16-16v-Dynamique.html> (2022)

Figura 18 - Fluxograma



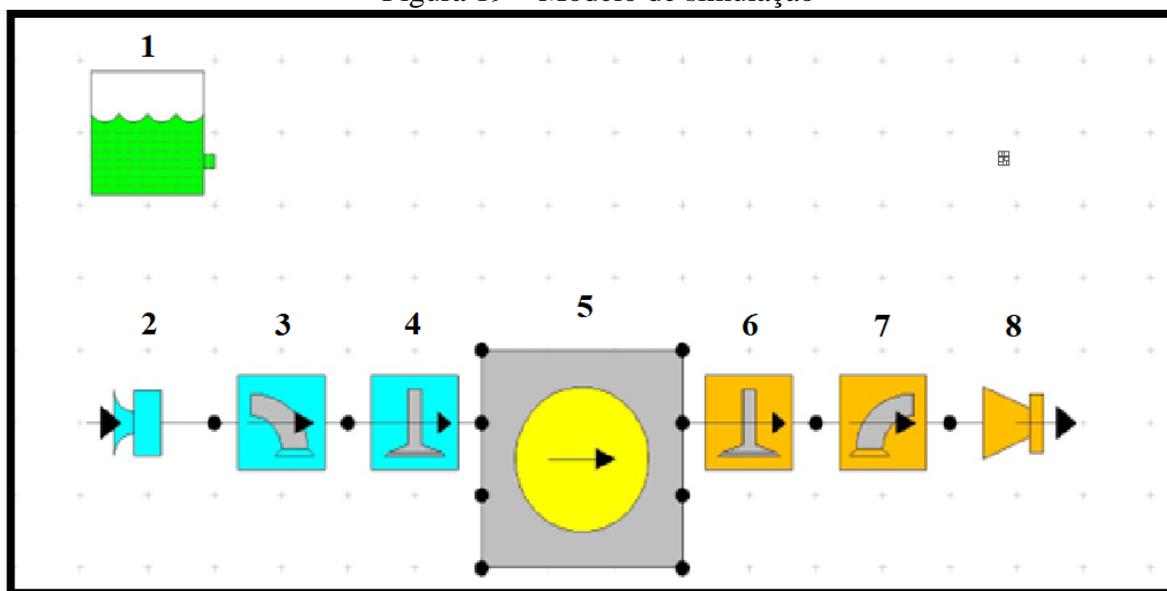
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.1 MODELO PARA SIMULAÇÃO

Como mencionado anteriormente, é o modelo Renault Clio de terceira geração 1.6 16V. Para a simulação foi utilizado um modelo monocilíndrico seguindo as especificações do motor real. As propriedades referentes ao ângulo de abertura e fechamento das válvulas foram baseadas no manual de utilização do *Software Lotus Engine*, onde exemplifica como criar um modelo monocilíndrico padrão.

Como o objetivo do trabalho é analisar a variação dos resultados com a alteração do combustível unicamente, o mais importante é manter a configuração para as três simulações, não sendo de primordial relevância os valores do motor em si.

Figura 19 – Modelo de simulação



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Legenda:

- 1- Bloco referente as propriedades do combustível utilizado;
- 2- Bloco referente as condições de contorno para a admissão;
- 3- Bloco referente as propriedades do duto de admissão;
- 4- Bloco referente as propriedades das válvulas de admissão;
- 5- Bloco referente as propriedades internas da câmara de combustão, biela e manivela;
- 6- Bloco referente as propriedades das válvulas de escape;
- 7- Bloco referente as propriedades do duto de escape;
- 8- Bloco referente as condições de contorno para a escape.

3.1.1 Propriedades dutos de admissão e exaustão

A tabela 6 discrimina as características mais importantes dos blocos 3 e 7.

Tabela 6 – Dutos de admissão e exaustão

Dutos de admissão e exaustão		
Propriedades	Admissão	Exaustão
Número de válvulas	2	2
Diâmetro da garganta da válvula (mm)	26,5	22,5

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.1.2 Propriedades das válvulas de admissão e exaustão

A tabela 7 discrimina as características mais importantes dos blocos 4 e 6.

Tabela 7 – Válvulas de admissão e exaustão

Válvulas de admissão e exaustão		
Propriedades	Admissão	Exaustão
Abertura (graus)	15	40
Fechamento (graus)	26,5	20
Elevação máxima (mm)	8,5	8

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.1.3 Propriedades internas do motor

A tabela 8 discrimina as características mais importantes do bloco 5.

Tabela 8 – Propriedades internas do motor

Propriedades internas do motor	
Propriedades	
Diâmetro do pistão (mm)	87
Curso do pistão (mm)	84
Comprimento da biela (mm)	130
Taxa de compressão	11:1

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.2 MODELOS DE COMBUSTÍVEIS

Foi utilizado $\lambda=1$ para a simulação dos três combustíveis. Apenas para o hidrogênio, houveram duas simulações, uma com $\lambda=1$ como os demais, e outra com $\lambda=4$. As propriedades presentes nas tabelas 9, 10, 11 e 12 foram extraídas das tabelas 2 e 3, conforme: Verhelst e Wallner (2009) e Sherif et al. (2014).

Tabela 9 – Modelo de gasolina

Gasolina $\lambda=1$	
Propriedades	
Poder calorífico (kJ/kg)	47800
Densidade (kg/litro)	0,0012
Taxa do combustível H/C (molar)	2,25
Taxa do combustível O/C (molar)	0
Massa molecular (kg/kmol)	114,236

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Tabela 10 – Modelo de metano

Metano $\lambda=1$	
Propriedades	
Poder calorífico (kJ/kg)	55500
Densidade (kg/litro)	0,0011
Taxa do combustível H/C (molar)	4
Taxa do combustível O/C (molar)	0
Massa molecular (kg/kmol)	16

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

O hidrogênio não possui carbono em sua formulação, portanto a taxa de combustível H/C é zero, entretanto o software não permite realizar a simulação quando coloca-se zero. Deste modo foi definido deixar essa variável como 1, conforme mostra a tabela 11.

Tabela 11 – Modelo de hidrogênio $\lambda=1$

Hidrogênio $\lambda=1$	
Propriedades	
Poder calorífico (kJ/kg)	142000
Densidade (kg/litro)	0,0008
Taxa do combustível H/C (molar)	1
Taxa do combustível O/C (molar)	0
Massa molecular (kg/kmol)	2.016

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Para realizar a simulação do hidrogênio com relação estequiométrica $\lambda=4$, foi alterado o valor de densidade conforme é indicado na tabela 3. A tabela 12 informa que várias outras propriedades do hidrogênio mudam quando o valor de lambda é alterado, por exemplo: viscosidade cinemática, temperatura de autoignição, temperatura adiabática da chama e difusividade termal. Entretanto a diferença mais importante é na quantidade de combustível necessária, proporcionalmente menor com o aumento do fator lambda.

Tabela 12 – Modelo de hidrogênio $\lambda=4$

Hidrogênio $\lambda=4$	
Propriedades	
Poder calorífico (kJ/kg)	142000
Densidade (kg/litro)	0,0010
Taxa do combustível H/C (molar)	1
Taxa do combustível O/C (molar)	0
Massa molecular (kg/kmol)	2.016

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações foram analisados graficamente, conforme fornecido pelo software, onde em único gráfico há o comparativo entre torque, potência, consumo específico de combustível e pressão efetiva do motor com o combustível em análise.

Legenda do gráfico feito pelo *Software Lotus Engine*:

- Torque = torque;

- Power = potência;
- BSFC = consumo específico de combustível;
- BMEP = pressão efetiva do motor;
- Engine Speed = velocidade de rotação do motor;
- Performance Summary = resumo do desempenho.

A fim de obter um resultado comparativo entre os diferentes combustíveis, os dados expostos de forma analítica foram compilados e reorganizados a fim de formar um gráfico de torque e um de potência.

4.1 GASOLINA

Gasolina é o combustível utilizado no motor escolhido como modelo inicial. Conforme presente na tabela 6, o motor do Renault Clio 3ª geração 1.6 16V apresenta potência de 82kW à 6000 rpm e torque de 151Nm à 4250 rpm.

Na simulação, conforme apresentado na tabela 14 e figura 20, chegou ao valor de 26,75 kW à 6000 rpm e torque de 48,36 Nm à 4000 rpm. Considerando que no modelo trata-se de um motor monocilíndrico e o real é de 4 cilindros, multiplicou-se o resultado por 4, a fim de ter uma aproximação do valor real deste motor monocilíndrico caso tivesse 4 cilindros. Deste modo chegamos a seguinte comparação mostrada na tabela 13:

Tabela 13 – Comparação entre modelo real e simulação

Comparação entre modelo real e simulação		
Propriedades	Real	Simulação
Potência (kW)	82	107
Torque (Nm)	151	193,44
Elevação máxima (mm)	8,5	8

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A diferença encontrada, a favor da simulação, foi de 30,45% para a potência e de 28,10% para o torque. Tais discrepâncias são atribuídas as formas de medição, no modelo real essas medições são feitas na roda do veículo, onde todos os atritos e demais perdas de energia do conjunto mecânico já são calculadas, além do erro proveniente multiplicação por 4, onde os erros relativos a energia gerada e consumida por cada pistão individualmente e coletivamente.

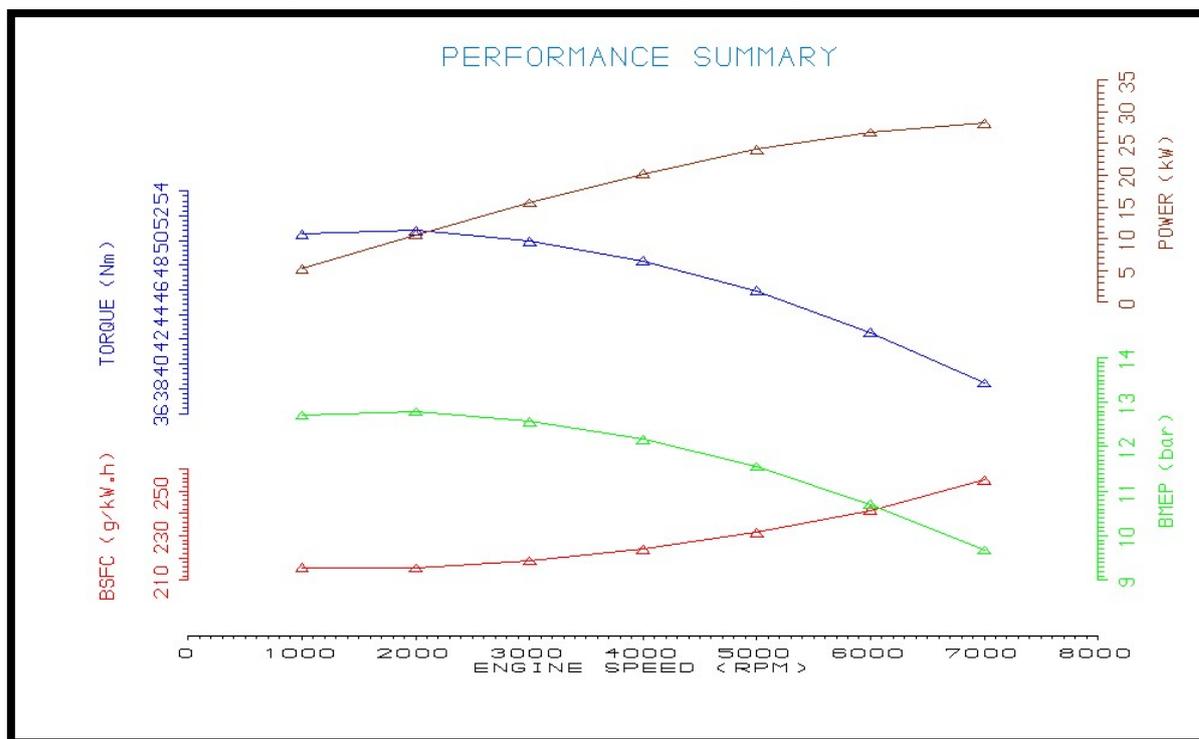
No modelo simulado, tanto a potência quanto o torque são medidos diretamente no motor, ignorando assim toda e qualquer perda posterior.

Através da simulação o valor de potência máxima foi de 28,20 kW à 7000 rpm e o torque máximo 50,82 Nm à 2000 rpm. Os valores de consumo específico de combustível variaram de forma exponencial entre 215,75 g/kWh à 1000 rpm até 255 g/kWh à 7000 rpm. Outro dado importante, a pressão efetiva do motor teve seu pico à 2000 rpm ao atingir o valor de 12,79 bar, com mínima de 9,68 bar à 7000 rpm.

Tabela 14 - Resumo de desempenho com gasolina $\lambda=1$

Resumo de desempenho com gasolina $\lambda=1$				
Rotação (rpm)	Potência (kW)	Torque (Nm)	Pressão efetiva do motor (bar)	Consumo específico de combustível (g/kWh)
1000	5,29	50,51	12,71	215,75
2000	10,64	50,82	12,79	215,46
3000	15,69	49,95	12,57	218,67
4000	20,26	48,36	12,17	223,95
5000	24,05	45,94	11,56	231,38
6000	26,75	42,57	10,71	241,50
7000	28,20	38,48	9,68	255,01

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 20 – Resultado da simulação com gasolina $\lambda=1$ 

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.2 METANO

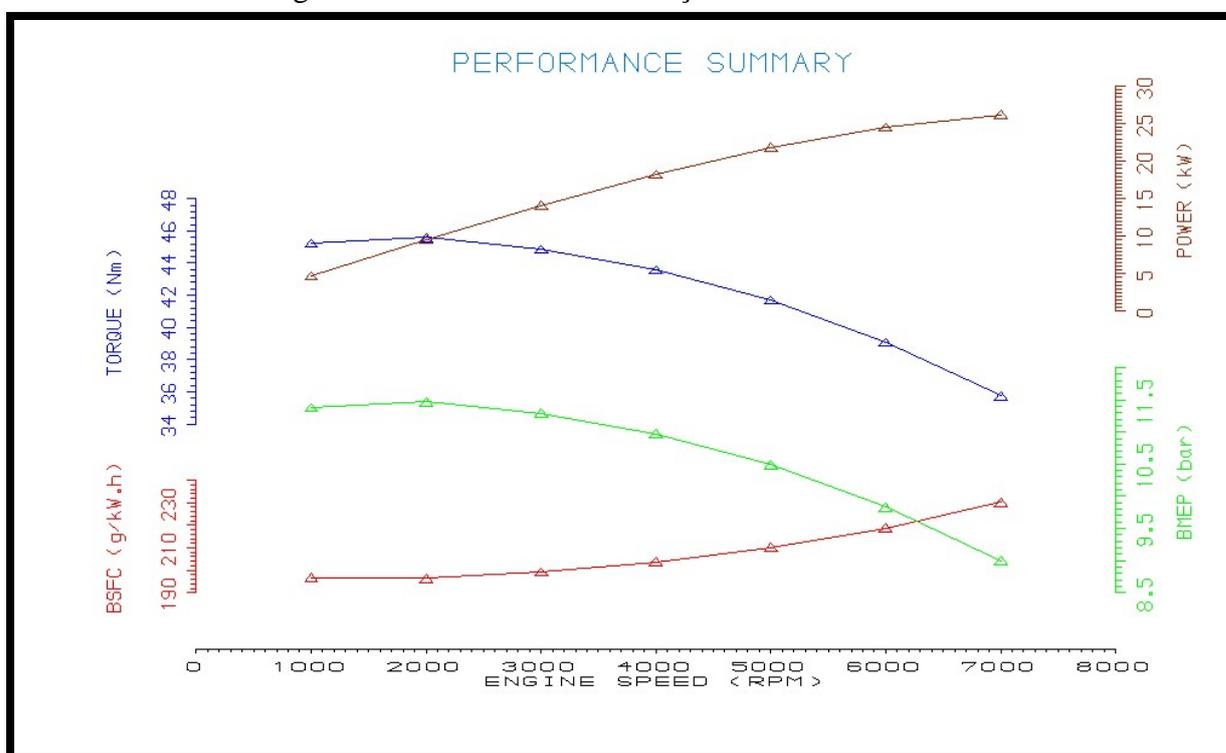
O metano apresentou curvas com comportamento muito próximas as curvas da gasolina, diferenciando-se pela magnitude dos valores, levemente inferiores. Destaca-se a curva de consumo específico de combustível que se mostrou maior, com um valor máximo de 30,21 g/kWh à 7000 rpm.

Tais valores eram esperados, conforme exemplificado por Martins (2006) e Verhelst e Wallner (2009) e Sherif et al. (2014), o metano possui propriedades inferiores em relação à gasolina. A simulação com metano foi realizada com $\lambda=1$, por característica, veículos que utilizam gás natural, combustível 88% composto por metano, costumam variar o fator lambda de acordo com a necessidade, geralmente de forma mais pobre em condições de cruzeiro e rica quando necessita-se de potência extra.

Tabela 15 - Resumo de desempenho com metano $\lambda=1$

Resumo de desempenho com metano $\lambda=1$				
Rotação (rpm)	Potência (kW)	Torque (Nm)	Pressão efetiva do motor (bar)	Consumo específico de combustível (g/kWh)
1000	4,74	45,24	11,38	196,83
2000	9,55	45,60	11,47	196,47
3000	14,10	44,87	11,26	199,22
4000	18,25	43,58	10,97	203,79
5000	21,83	41,70	10,49	210,14
6000	24,55	39,07	9,83	218,74
7000	26,20	35,74	9,00	230,21

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 21 - Resultado da simulação com metano $\lambda=1$ 

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.3 HIDROGÊNIO

O gráfico da simulação com hidrogênio $\lambda=1$ mostra uma curva de potência linear crescente até o valor de rotação máximo de 7000 rpm, parte-se de 6,21 kW à 1000 rpm até 46,61 kW. Tal comportamento nos leva a crer que em rotações ainda mais altas seria possível extrair mais potência deste combustível.

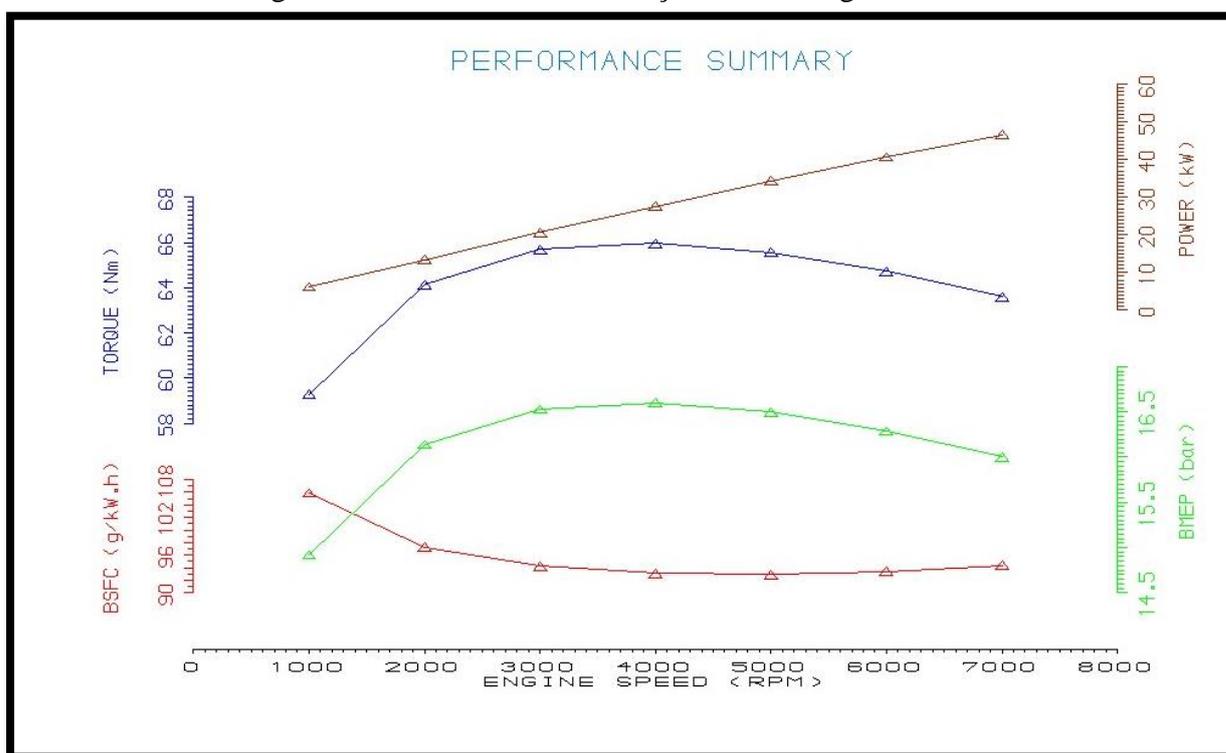
A curva de torque por sua vez atingiu o pico com 65,96 Nm à 4000rpm. O comportamento foi similar a uma parábola com concavidade para baixo, começou com 59,29 Nm e terminou com 63,59 Nm. Outra propriedade importante é o consumo específico de combustível, que diferentemente dos combustíveis analisados anteriormente, diminui com o aumento da rotação. Isso nos mostra que a eficiência energética é maior com rotações entre 3000 rpm e 6000 rpm.

É relevante avaliar o comportamento da curva de pressão efetiva do motor, em conjunto a curva de consumo específico de combustível revela que esta formatação de motor não desempenha bem à baixas rotações. O valor inicial de pressão foi de 14,92 bar, logo aumentou para 16,14 bar à 2000 rpm, atingindo seu pico de 16,60 bar à 4000 rpm.

Tabela 16 - Resumo de desempenho com hidrogênio $\lambda=1$

Resumo de desempenho com hidrogênio $\lambda=1$				
Rotação (rpm)	Potência (kW)	Torque (Nm)	Pressão efetiva do motor (bar)	Consumo específico de combustível (g/kWh)
1000	6,21	59,29	14,92	105,91
2000	13,43	64,13	16,14	97,24
3000	20,63	65,68	16,53	94,21
4000	27,63	65,96	16,60	93,08
5000	34,33	65,56	16,50	92,92
6000	40,67	64,73	16,29	93,39
7000	46,61	63,59	16,00	94,35

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 22 - Resultado da simulação com hidrogênio $\lambda=1$ 

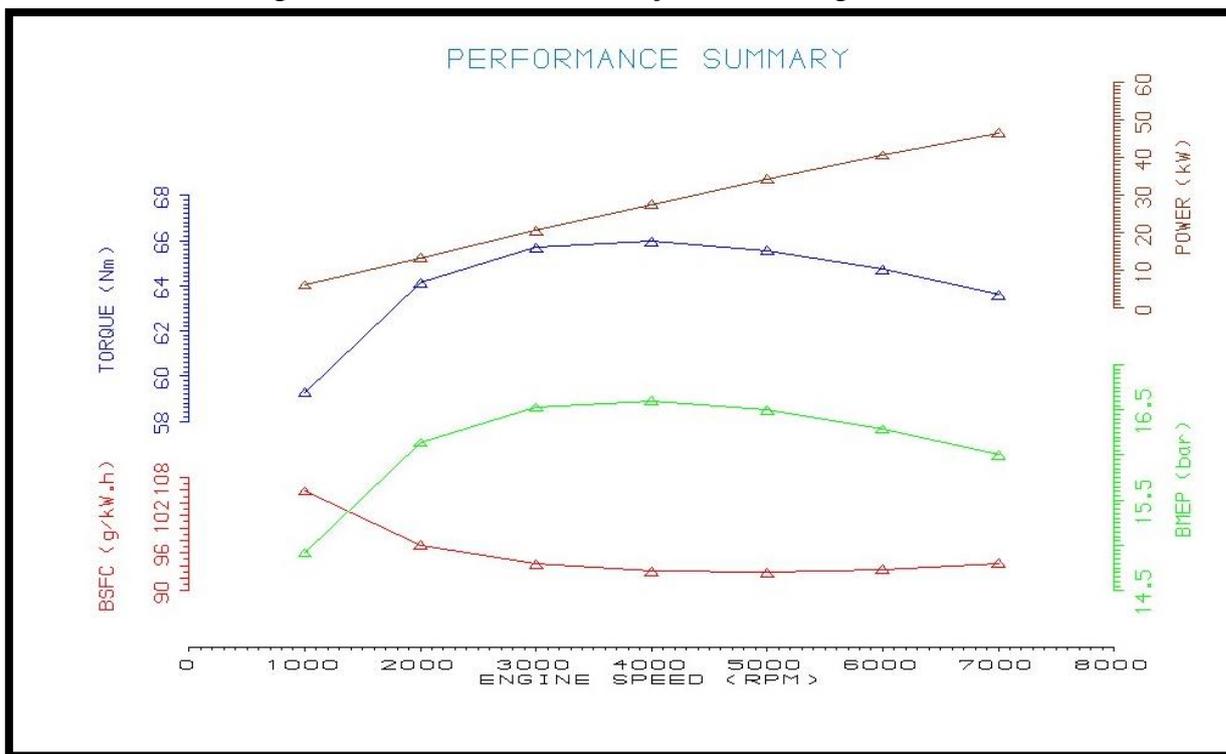
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A quarta simulação alterou o valor de lambda de 1 para 4, tal variação empobreceu a mistura, na prática, diminui a quantidade de combustível em 75%. O resultado foi exatamente o mesmo da simulação anterior, os valores das quatro propriedades mantiveram-se idênticos.

Tabela 17 – Resumo de desempenho com hidrogênio $\lambda=4$

Resumo de desempenho com hidrogênio $\lambda=4$				
Rotação (rpm)	Potência (kW)	Torque (Nm)	Pressão efetiva do motor (bar)	Consumo específico de combustível (g/kWh)
1000	6,21	59,29	14,92	105,91
2000	13,43	64,13	16,14	97,24
3000	20,63	65,68	16,53	94,21
4000	27,63	65,96	16,60	93,08
5000	34,33	65,56	16,50	92,92
6000	40,67	64,73	16,29	93,39
7000	46,61	63,59	16,00	94,35

Fonte: elaborado pelo autor (20)

Figura 23- Resultado da simulação com hidrogênio $\lambda=4$ 

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

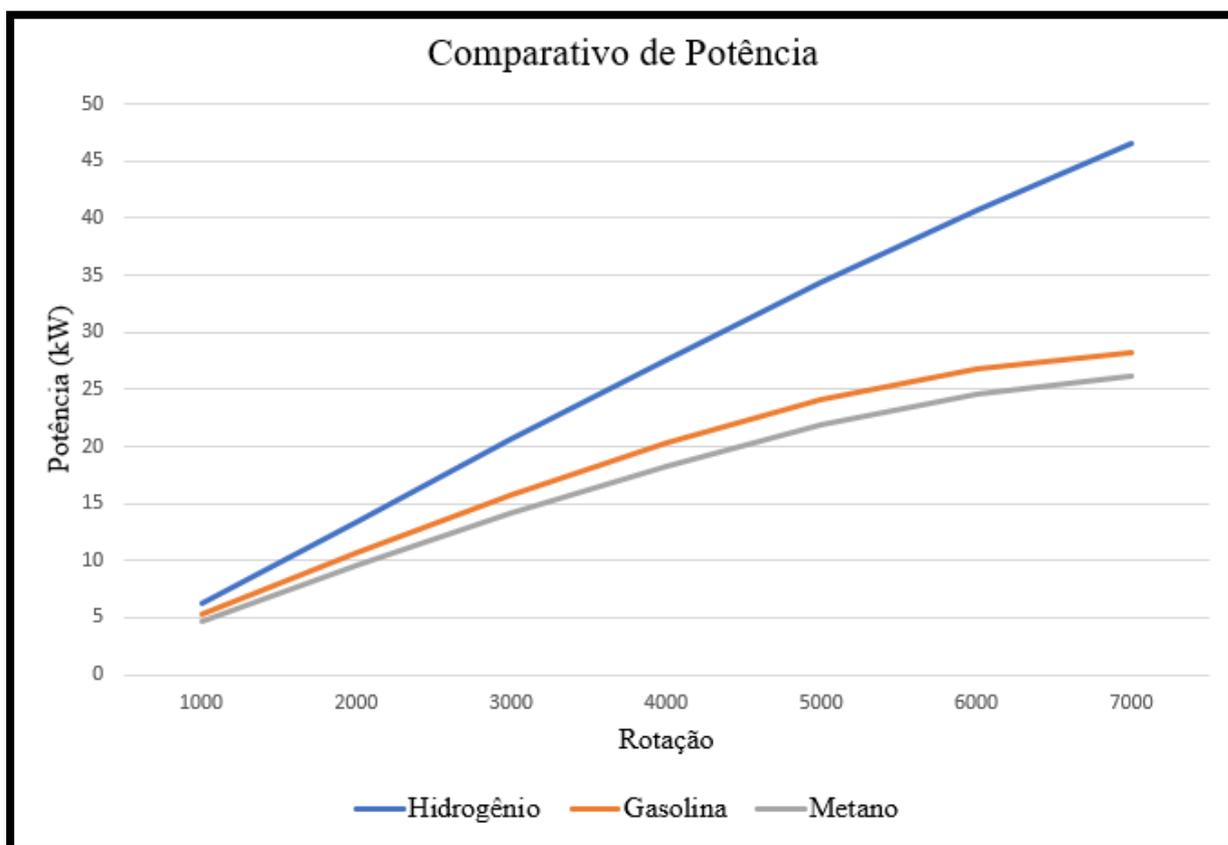
4.4 COMPARATIVO ENTRE COMBUSTÍVEIS

4.4.1 Potência

Destacadamente a simulação utilizando hidrogênio como combustível apresentou um desempenho superior as demais que utilizaram gasolina e metano. As curvas de potência, mostradas na figura 24 destacam como diferentemente da gasolina e do metano, o hidrogênio mantém um comportamento mais linear, contra a parábola dos outros combustíveis.

Aos 7000 rpm o hidrogênio apresentou potência igual a 46,61 kW, valor 65,28% maior que o apresentado pela simulação com gasolina e 77,9% em relação a com metano.

Figura 24 – Comparativo de potência entre combustíveis

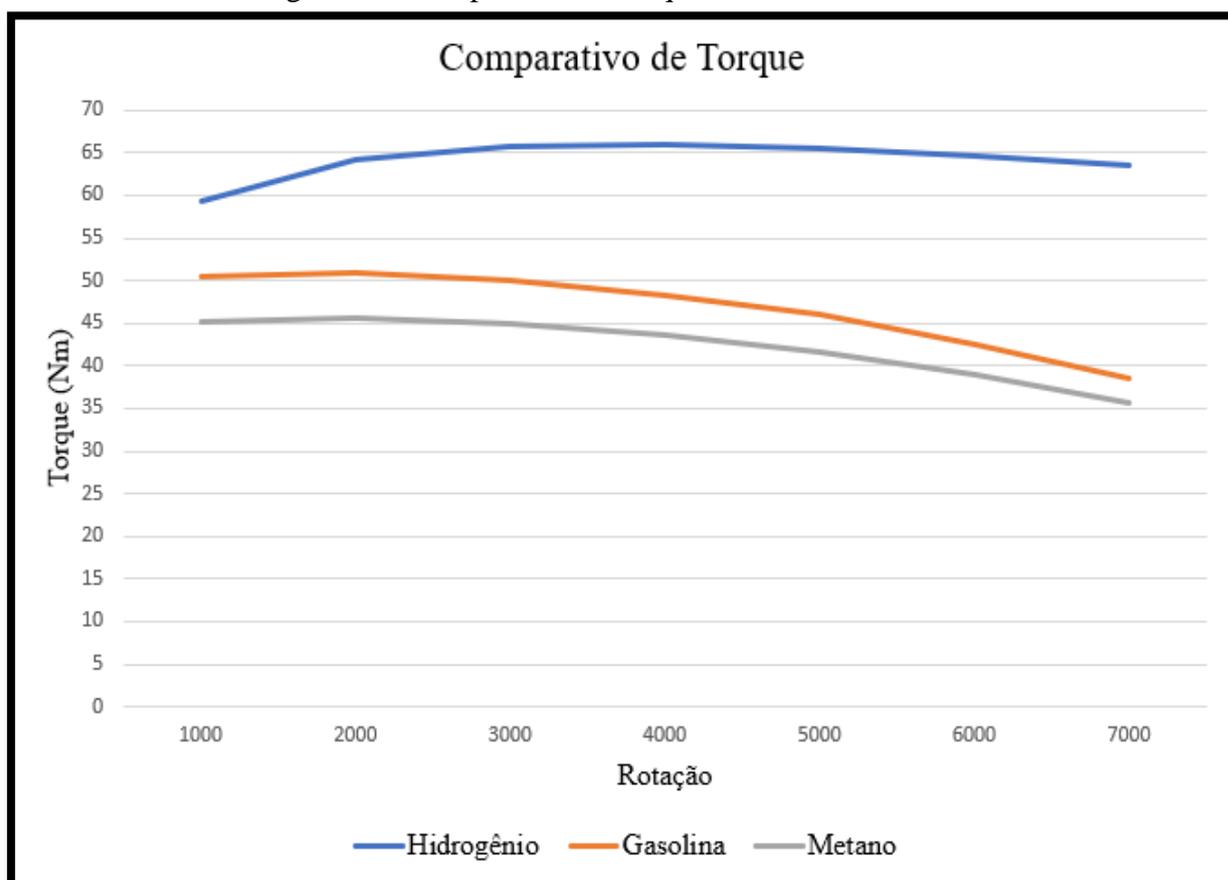


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.4.2 Torque

A figura 25 mostra o gráfico comparativo do torque. A simulação utilizando hidrogênio novamente mostrou-se superior, com valor máximo de 65,96 Nm à 4000rpm, 36,4% maior que a simulação com gasolina e 51,3% com metano, considerando a mesma rotação nos três casos. Ao analisarmos os torques máximos apenas, o hidrogênio ficou 29,8% acima da gasolina e 44,6% acima do metano.

Figura 25– Comparativo de torque entre combustíveis

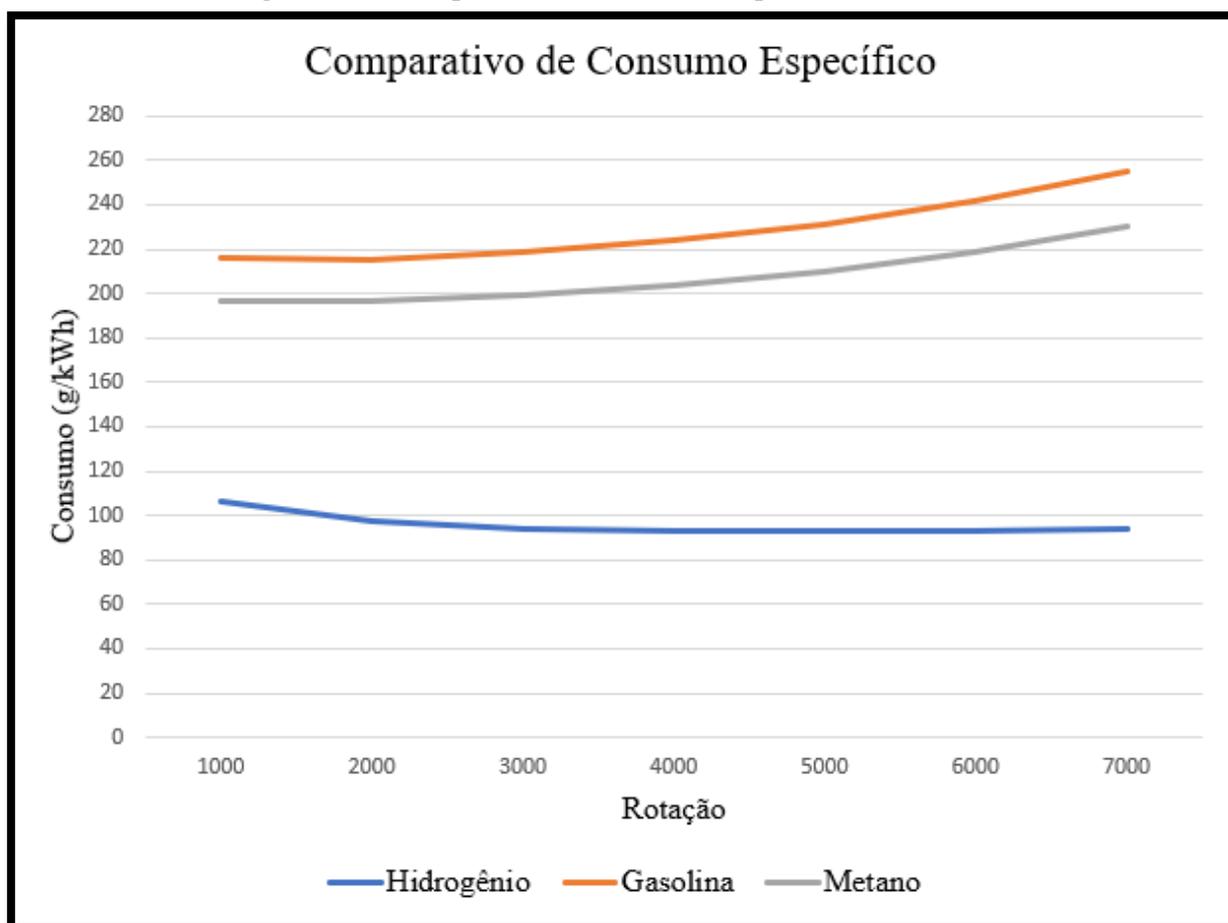


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.4.3 Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível ao utilizar o hidrogênio como combustível na simulação manteve uma diferença de pelo menos 50,9% em relação à gasolina e 46,2% ao metano, ao considerar uma rotação de 1000 rpm. Ao olhar para uma rotação intermediária de 4000 rpm essas diferenças sobem para 58,4% e 53,9% respectivamente. Com a rotação máxima do teste de 7000 rpm esses valores atingem o máximo, sendo de 63% e 59%.

Figura 26 – Comparativo de consumo específico

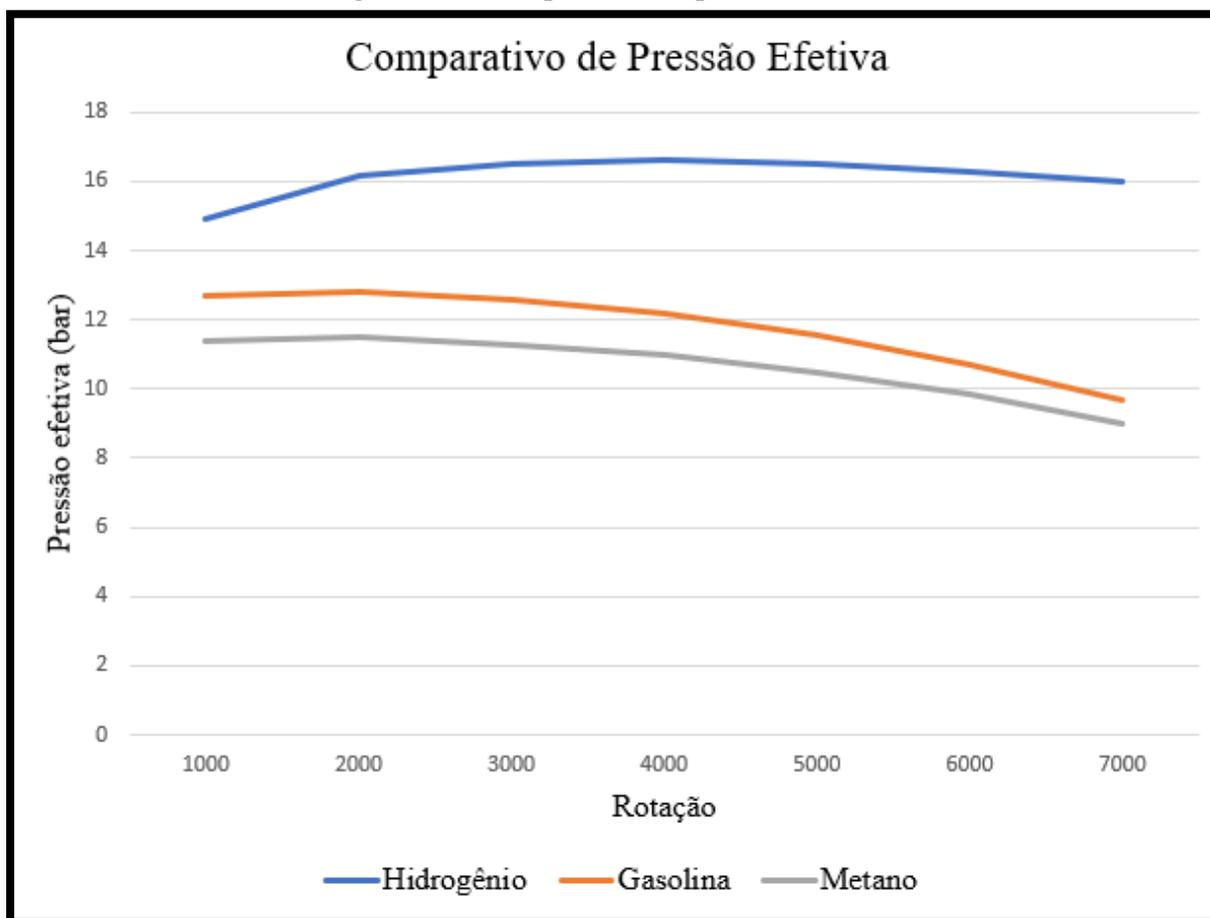


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.4.4 Pressão efetiva

Sobre a pressão efetiva, novamente encontramos uma diferença tanto de valor quanto da faixa de rotação que ocorrem os picos. Com hidrogênio o pico ocorre à 4000 rpm, 16,6 bar, com gasolina e metano à 2000 rpm, 12,79 bar e 11,47 bar respectivamente. Ao analisar apenas os valores máximos de cada simulação, destacou-se novamente a superioridade do hidrogênio, 29,8% sobre a gasolina e 44,7% sobre o metano.

Figura 27 – Comparativo de pressão efetiva



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Os resultados encontrados estão em consonância com Faizal e Saidur (2017) que através de modelos termodinâmicos fizeram uma análise comparativa da pressão média efetiva, potência e torque de um motor de combustão interna alimentado por gasolina versus hidrogênio, de acordo com a primeira e a segunda lei da termodinâmica. Deve-se destacar que em Faizal e Saidur (2017), diferentemente deste trabalho, variaram a taxa de compressão interna no motor para cada um dos combustíveis analisados.

A tabela 18 apresenta os resultados obtidos pelo autor e os compara com os encontrados por Faizal e Saidur (2017). Nota-se que as comparações ocorreram entre os valores máximos, sem relação com a faixa de cada rotação.

Tabela 18 – Comparação entre hidrogênio e gasolina

Comparação entre hidrogênio e gasolina		
Propriedades	Autor	Faizal e Saidur (2017)
Potência (%)	65,8	34,3
Torque (%)	29,8	34,1
Pressão efetiva (%)	29,8	34,3

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados de um estudo comparativo através da análise computacional de desempenho de um motor monocilíndrico de combustão interna com a utilização de gasolina, metano e hidrogênio. Foi tomado como base o motor do Renault Clio de terceira geração 1.6 16V. A simulação foi desenvolvida através do *software Lotus Engine Simulation*. Ao todo, foram feitas quatro simulações, são elas: gasolina com fator lambda igual 1; metano com fator lambda igual a 1; hidrogênio com fator lambda igual a 1; e hidrogênio com fator lambda igual a 4.

Destes quatro testes, foram utilizados para a comparação apenas três, uma vez que as duas simulações onde foram utilizados o hidrogênio com variação do fator lambda, apresentaram resultados idênticos. Este fato levou a desconsideração do modelo com $\lambda=4$, pois o software não foi capaz de relacionar variação de densidade da mistura ar/combustível com os dados de saída da simulação.

Os resultados mostram um acréscimo de potência no valor de 65,8%, torque de 34,3% e pressão efetiva de 29,8%. Essas comparações foram feitas em relação aos valores máximos, sem relação com a faixa de cada rotação.

As simulações através do *software Lotus Engine Simulation* são congruentes com os valores presentes no referencial teórico. O hidrogênio foi superior em todos os critérios analisados. Entretanto, vale ressaltar que este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) baseia-se em um cenário de condições teóricas. O hidrogênio devido suas propriedades físicas e químicas, torna-se muito difícil e perigoso de ser trabalhado e controlado. Problemas devidos à geração e armazenagem do hidrogênio, fatores críticos, foram desconsiderados, assim como perdas provenientes do sistema de alimentação do motor que podem afetar os resultados.

É relevante salientar que as limitações do *software Lotus Engine Simulation*, utilizado na versão gratuita, foram responsáveis por algumas considerações feitas na análise dos resultados. O programa permite simular apenas um motor monocilíndrico, diferente do de 4 cilindros utilizado no comparativo. Quanto aos combustíveis, o software disponibiliza a alteração de algumas propriedades a partir de uma formulação base.

Por fim, a pesquisa realizada aponta para a evidência de que o hidrogênio é um combustível com elevados níveis de desempenhos, tanto quanto a sua utilização em motores de combustão interna. Contudo, devido as suas propriedades de inflamabilidade, energia de ignição e densidade, o motor de combustão interna precisa ter algumas de suas características

físicas reprojctadas. A taxa de compressão pode ser elevada, assim como o sistema de alimentação precisa ser mais preciso.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de continuar a desenvolver os estudos realizados neste trabalho, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a. Variação da taxa de compressão no motor utilizando hidrogênio em diversas configurações de estequiometria;
- b. Comparativo de eficiência entre a utilização de hidrogênio em um motor de combustão interna versus sua utilização na forma de célula de combustível em veículos elétricos;
- c. Desenvolver via simulação uma análise de um motor de forma a ser possível variar tanto as propriedades do motor quando as do combustível, de forma completa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Carlos Eduardo Sanches de; D'AGOSTO, Márcio de Almeida. Avaliação dos sistemas metroviários nas emissões de CO₂: análise comparativa das emissões por automóveis, ônibus e metrô. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 919-927, 2019.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química. Questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre, 2001.

BAPTISTA, Andresa et al. Assessment of an Innovative Way to Store Hydrogen in Vehicles. **Energies**, v. 12, n. 9, p. 1762, 2019.

BATISTA, Leonardo dos Santos. Modelagem de um motor de combustão interna monocilíndrico. 2016.

BORETTI, Alberto. Hydrogen internal combustion engines to 2030. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 43, p. 23692-23703, 2020.

BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. São Paulo: Blucher, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 492, de 20 de dezembro de 2018*. Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário, altera a Resolução CONAMA nº 15/1995 e dá outras providências. Diário Oficial da União, 24 dez. 2018. Seção 1, p.141. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56643907/do1-2018-12-24-resolucao-n-492-de-20-de-dezembro-de-2018-56643731 . Acesso em: 06 abr. 2022.

BRASIL. Programa de controle de poluição do ar por veículos automotores. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/163/arquivos/proconve_163.pdf. Acesso em: 12 abr. 2022.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna-Vol. 1**. Editora Blucher, 2018.

FAIZAL, M.; SAIDUR, R. Comparative thermodynamics analysis of gasoline and hydrogen fuelled Internal Combustion Engines. **International Journal of Advanced Scientific Research and Management**, v. 2, n. 3, p. 12-18, 2017.

FAIZAL, M. et al. Review of hydrogen fuel for internal combustion engines. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments (JMERA), v. 42, n. 3, p. 35-46, 2019.

GAVRILYUK, Alexander (Ed.). **Hydrogen energy for beginners**. CRC Press, 2013.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. SAE Technical Paper, 1992.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: Mcgraw-hill, 1988.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna** AUTOR: Jorge Martins ISBN: 972-8953-02-X DATA EDIÇÃO: 2006 IDIOMA: Português EDITO. 2006.

MARTINELLI, Luiz Carlos. Máquinas Térmicas I–Motores de Combustão Interna. **Apostila da UNIJUÍ–Campus Panambi**, 2003.

MATHIEU, Claire Maha. **Hydrogen-fueled internal combustion engine**. SIEMENS, 2020. Disponível em: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/hydrogen-fueled-internal-combustion-engine/> Acesso em: 15 mar. 2022.

OLIVEIRA, Carlos A. G. **Física (coleção EJA: cidadania competente; v.8)**. Curitiba: InterSaber, 2017.

SANKIR, Mehmet; SANKIR, Nurdan Demirci (Ed.). **Hydrogen Storage Technologies**. John Wiley & Sons, 2018.

SHERIF, Sherif A. et al. (Ed.). **Handbook of hydrogen energy**. CRC Press, 2014.

SIEMENS. **Simcenter Engineer Innovation**. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/products/simcenter/> Acesso em: 15 mar. 2022.

VERHELST, Sebastian; WALLNER, Thomas. Hydrogen-fueled internal combustion engines. **Progress in energy and combustion science**, v. 35, n. 6, p. 490-527, 2009.