



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Milton Keisy Kouketsu

Estudo da adição de hidrogênio e redução do diesel fóssil na operação de motores de combustão interna de ignição por compressão

Joinville
2024

Milton Keisy Kouketsu

Estudo da adição de hidrogênio e redução do diesel fóssil na operação de motores de combustão interna de ignição por compressão

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.

Joinville
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Kouketsu, Milton Keisy

Estudo da adição de hidrogênio e redução do diesel fóssil na operação de motores de combustão interna de ignição por compressão / Milton Keisy Kouketsu ; orientador, Leonel R. Cancino, 2024.

165 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. AVL-FIRE™ M. 3. motor diesel. 4. hidrogênio. 5. dual fuel. I. Cancino, Leonel R.. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Milton Keisy Kouketsu

Estudo da adição de hidrogênio e redução do diesel fóssil na operação de motores de combustão interna de ignição por compressão

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado em 29 de agosto de 2024, por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Andrea Piga Carboni, Dr. Eng.

Instituição: UFSC

Prof. Diogo Lôndero da Silva, Dr. Eng.

Instituição: UFSC

Prof. Yesid Ortiz Sánchez, Dr. Eng.

Instituição: UTP - Universidad Tecnológica de Pereira

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Coordenação do Programa de
Pós-Graduação

Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.
Orientador

Joinville, 2024.

Dedico este trabalho a Deus, à minha mãe, à minha
madrinha Silvia Helena Leuck, e aos meus filhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de toda esta jornada.

Agradeço à minha mãe, por todo o esforço e dedicação ao longo da minha vida. Seu apoio foi fundamental para que eu pudesse alcançar esta conquista.

À minha madrinha Silvia Helena Leuck, cujo apoio durante a minha juventude foi essencial para que eu pudesse superar desafios e alcançar meus objetivos.

Às minhas tias Isabel e Jandira, pelo suporte e presença ao longo da minha trajetória.

Aos meus colegas e professores deste curso, pela ajuda e apoio constantes, que tornaram essa jornada mais enriquecedora e colaborativa.

Aos meus filhos, que são minha maior motivação e razão de perseverança. Cada passo dado nesta jornada foi impulsionado pelo desejo de ser um exemplo para vocês.

Ao Prof. Leonel Rincon Cancino, Dr., meu orientador, por sua orientação, paciência e apoio ao longo de todo o processo. Sua dedicação e conhecimento foram cruciais para a realização deste trabalho.

Às professoras Clarissa Luzzoli Lopes, PhD, e Daniele da Silva Domingos, Dr^a, cuja recomendação foi fundamental para que eu pudesse ingressar no curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas e trilhar este caminho.

Ao programa de parceria Universidade - AVL, pela concessão da utilização do software para o desenvolvimento deste trabalho.

À equipe de T.I. da UFSC Joinville pelo suporte para uso do software AVL.

Agradeço, também, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro, sem o qual este trabalho não teria sido possível.

Por fim, agradeço a todos os meus familiares e amigos que, de maneira especial, estiveram ao meu lado durante esta jornada, oferecendo encorajamento e alegria nos momentos necessários.

*“A fé é o motor que nos move a enfrentar os desafios.
A resiliência é o combustível que nos mantém firmes no caminho,
mesmo quando os obstáculos parecem intransponíveis.
E a inovação é a ferramenta que Deus nos deu
para transformar o impossível em realidade.”
(LUCADO, s/d)*

RESUMO

Motores de combustão interna que utilizam o diesel como combustível são amplamente utilizados no setor de transportes em nosso país, seja por meio de caminhões, ônibus, trens, embarcações, entre outros. Estes diversos meios de transportes contribuem imensamente para o desenvolvimento de nosso país, pois esta logística é necessária para que pessoas sejam deslocadas, mercadorias entregues e insumos distribuídos. No entanto, estes motores movidos a diesel são grandes fontes de agentes poluentes nocivos, como a fuligem (*soot*), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂), entre outros. Mesmo com o desenvolvimento de novas tecnologias, como a utilização de ARLA (Agente Redutor Líquido Automotivo) que reduz a emissão de poluentes transformando os tóxicos óxidos de nitrogênio em materiais não-nocivos, como nitrogênio e água, ou ainda pela utilização da válvula EGR (Recirculação dos gases de escape), que atua no controle de emissão de gases poluentes provenientes da queima do combustível a fim de se obter uma redução na produção do óxido de nitrogênio (NOx), estes motores continuam poluindo o meio ambiente em níveis elevados. Além disso, a utilização de veículos providos de motores elétricos ou mesmo que utilizam combustíveis mais eficientes e menos poluidores como o hidrogênio está avançando pelo mundo, porém ainda de modo tímido em nosso país. Desta forma, estudos de sustentabilidade, eficiência energética e otimização dos motores de combustão interna existentes são extremamente necessários para se obter melhorias de eficiência através da redução do consumo de combustível e da redução das emissões de poluentes, permitindo a continuidade do uso destes motores até que possam ser substituídos. Neste sentido, este estudo visa avaliar por meio de análise numérica os efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e da redução do diesel injetado, a fim de se obter um ganho de eficiência em termos de consumo de combustível e redução das emissões de poluentes. Para isso, foram realizadas simulações numéricas utilizando o software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1. As simulações consideraram diferentes proporções de hidrogênio (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%) na mistura ar/combustível e foram realizadas em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM). Os resultados mostraram que a adição de hidrogênio e a redução do diesel injetado podem melhorar a eficiência do motor e reduzir o consumo do combustível diesel assim como as emissões de poluentes.

Palavras-chave: AVL-FIRE™ M ; motor diesel; dual fuel; hidrogênio; emissões

ABSTRACT

Internal combustion engines that use diesel as fuel are widely utilized in the transportation sector in our country, including trucks, buses, trains, and ships, among others. These various means of transportation significantly contribute to the development of our country, as this logistics is necessary for people to be transported, goods to be delivered, and supplies to be distributed. However, these diesel-powered engines are major sources of harmful pollutants, such as *soot*, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), among others. Even with the development of new technologies, such as the use of ARLA (Automotive Liquid Reducing Agent) that reduces pollutant emissions by transforming toxic nitrogen oxides into non-harmful materials like nitrogen and water, or through the use of the EGR valve (Exhaust Gas Recirculation), which controls the emission of pollutants from fuel combustion to reduce the production of nitrogen oxide (NO_x), these engines continue to pollute the environment at high levels. Additionally, the use of vehicles equipped with electric engines or those that use more efficient and less polluting fuels like hydrogen is advancing around the world, but still in a limited way in our country. Thus, studies on sustainability, energy efficiency, and optimization of existing internal combustion engines are extremely necessary to achieve efficiency improvements through the reduction of fuel consumption and pollutants emissions, allowing the continued use of these engines until they can be replaced. In this context, this study aims to evaluate, through numerical analysis, the effects of adding hydrogen to the air/fuel mixture and reducing the injected diesel to achieve a gain in efficiency in terms of fuel consumption, and reduced pollutant emissions. For this purpose, numerical simulations were conducted using the AVL-FIRE™ M software version 2023 R1. The simulations considered different proportions of hydrogen (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%) in the air/fuel mixture and were performed at different engine speeds (1500, 2500, and 3500 RPM). The results showed that adding hydrogen and reducing injected diesel can improve engine efficiency and reduce diesel fuel consumption as well as pollutant emissions.

Keywords: AVL-FIRE™ M; diesel engine; dual fuel; hydrogen; emissions

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagramas P-v e T-s para o ciclo diesel ideal.	24
Figura 2 – Eficiência e taxa de compressão	27
Figura 3 – Funcionamento (a) e exemplo de bico injetor diesel (b)	34
Figura 4 – Atomização do combustível	37
Figura 5 – Zonas no modelo ECFM-3Z	52
Figura 6 – Evolução da publicação de artigos científicos.	66
Figura 7 – Curva de potência do manual do motor VW EA288	71
Figura 8 – Domínio da geometria	72
Figura 9 – Intervalo das simulações	73
Figura 10 – Malha utilizada nas simulações	74
Figura 11 – Gráfico com a comparação das curvas de potência	85
Figura 12 – Gráfico potência a 1500, 2500 e 3500 RPM	94
Figura 13 – Gráfico eficiência a 1500, 2500 e 3500 RPM	96
Figura 14 – Gráfico de emissões de CO	98
Figura 15 – Gráfico de emissões de CO ₂	100
Figura 16 – Gráfico de emissões de NOx	102
Figura 17 – Gráfico de emissões de fuligem (<i>soot</i>)	104
Figura 18 – Gráfico de emissões de HC	106
Figura 19 – Gráfico de massa de diesel injetado a 1500 RPM	108
Figura 20 – Gráfico de massa de diesel injetado a 2500 RPM	109
Figura 21 – Gráfico de massa de diesel injetado a 3500 RPM	110
Figura 22 – Gráfico de massa de hidrogênio a 1500 RPM	111
Figura 23 – Gráfico de massa de hidrogênio a 2500 RPM	113
Figura 24 – Gráfico de massa de hidrogênio a 3500 RPM	114
Figura 25 – Gráfico da relação ar combustível (λ) a 1500 RPM	116
Figura 26 – Gráfico da relação ar combustível (λ) a 2500 RPM	117
Figura 27 – Gráfico da relação ar combustível (λ) a 3500 RPM	119
Figura 28 – Gráfico da caracterização da combustão a 1500 RPM	121
Figura 29 – Gráfico da caracterização da combustão a 2500 RPM	122
Figura 30 – Gráfico da caracterização da combustão a 3500 RPM	123
Figura 31 – Gráfico de temperatura média a 1500 RPM	125
Figura 32 – Gráfico de temperatura média a 2500 RPM	126
Figura 33 – Gráfico de temperatura média a 3500 RPM	127
Figura 34 – Gráfico de pressão total média a 1500 RPM	128
Figura 35 – Gráfico de pressão total média a 2500 RPM	129
Figura 36 – Gráfico de pressão total média a 3500 RPM	130
Figura 37 – Gráfico de progresso médio da reação a 1500 RPM	131

Figura 38 – Gráfico de progresso médio da reação a 2500 RPM	132
Figura 39 – Gráfico de progresso médio da reação a 3500 RPM	133
Figura 40 – Gráfico de velocidade de chama laminar a 1500 RPM	134
Figura 41 – Gráfico de velocidade de chama laminar a 2500 RPM	135
Figura 42 – Gráfico de velocidade de chama laminar a 3500 RPM	136
Figura 43 – Intervalo das simulações e RPM	159
Figura 44 – Módulos	160
Figura 45 – Materiais	160
Figura 46 – Materiais dispersos	161
Figura 47 – Equações de controle	161
Figura 48 – Modelo de combustão	162
Figura 49 – Modelo de emissões	162
Figura 50 – Modelo de spray	163
Figura 51 – Ângulos e massa de diesel injetor 01	163
Figura 52 – Ângulos e massa de diesel injetor 02	164
Figura 53 – Varáveis pressão, swirl e composição do ar de entrada	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela comparativa motor do modelo AVL e o motor VW EA288 . . .	70
Tabela 2 – Redução da massa de diesel injetado	79
Tabela 3 – Condições de operação do motor a 1500, 2500 e 3500 RPM	80
Tabela 4 – Condições de operação do ar de admissão a 1500, 2500 e 3500 RPM	82
Tabela 5 – Comparação dos resultados de potência	84
Tabela 6 – Comparação do consumo de combustível (iSFC)	84
Tabela 7 – Amostra de dados para cálculo da eficiência térmica	89
Tabela 8 – Valores de potência e variação para diferentes rotações	94
Tabela 9 – Valores de eficiência térmica e variação para diferentes rotações . .	96
Tabela 10 – Valores de emissões de CO e variação para diferentes rotações . .	98
Tabela 11 – Valores de emissões de CO ₂ e variação para diferentes rotações . .	100
Tabela 12 – Valores de emissões de NOx e variação para diferentes rotações . .	102
Tabela 13 – Valores de emissões de fuligem (<i>soot</i>) e variação para diferentes rotações	104
Tabela 14 – Valores de emissões de HC e variação para diferentes rotações . .	106
Tabela 15 – Valores de massa de diesel injetado a 1500 RPM	108
Tabela 16 – Valores de massa de diesel injetado a 2500 RPM	109
Tabela 17 – Valores de massa de diesel injetado a 3500 RPM	110
Tabela 18 – Valores de massa de hidrogênio a 1500 RPM	112
Tabela 19 – Valores de massa de hidrogênio a 2500 RPM	113
Tabela 20 – Valores de massa de hidrogênio a 3500 RPM	114
Tabela 21 – Resultados de lambda a 1500 RPM	116
Tabela 22 – Resultados de lambda a 2500 RPM	118
Tabela 23 – Resultados de lambda a 3500 RPM	119
Tabela 24 – Caracterização da combustão a 1500 RPM	121
Tabela 25 – Caracterização da combustão a 2500 RPM	123
Tabela 26 – Caracterização da combustão a 3500 RPM	124
Tabela 27 – Comparação potência e consumo com motor referência a 1500 RPM	138
Tabela 28 – Comparação potência e consumo com motor referência a 2500 RPM	138
Tabela 29 – Comparação potência e consumo com motor referência a 3500 RPM	139
Tabela 30 – Comparação emissões com motor referência a 1500 RPM	140
Tabela 31 – Comparação emissões com motor referência a 2500 RPM	141
Tabela 32 – Comparação emissões com motor referência a 3500 RPM	141

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO DIESEL	22
2.1.1	Princípios de funcionamento	22
2.1.2	Ciclo diesel ideal e real	23
2.1.2.1	<i>Ciclo diesel ideal</i>	23
2.1.2.2	<i>Ciclo diesel real</i>	24
2.1.3	Eficiência e emissões	25
2.1.4	Taxa de compressão	26
2.1.5	Estequiometria do ar de admissão em motores diesel	27
2.1.6	Pressão de alimentação do ar em motores diesel	28
2.1.7	Relação ar/combustível (lambda) em motores diesel	29
2.1.7.1	<i>Importância do lambda em motores diesel</i>	30
2.1.7.2	<i>Valores típicos de lambda em motores diesel</i>	30
2.1.7.3	<i>Controle de lambda</i>	30
2.1.7.4	<i>Impacto da adição de hidrogênio no lambda</i>	31
2.1.8	Swirl em motores diesel	31
2.1.9	Bico injetor em motores diesel	33
2.1.9.1	<i>Função e importância dos bicos injetores</i>	34
2.1.9.2	<i>Tipos de bicos injetores</i>	34
2.1.9.3	<i>Tecnologias avançadas de bicos injetores</i>	35
2.1.9.4	<i>Funcionamento do bico injetor em motores diesel</i>	35
2.1.9.4.1	Processo de injeção	36
2.1.9.4.2	Atomização do combustível	36
2.1.9.4.3	Controle eletrônico	37
2.1.10	Ângulos de início e término da injeção do combustível dos bicos injetores	37
2.1.10.1	<i>Injeção com dois bicos injetores</i>	38
2.1.11	Exemplo de motores diesel modernos: VW EA288	39
2.2	COMBUSTÍVEIS	40
2.2.1	Óleo diesel	41
2.2.1.1	<i>Características e propriedades do óleo diesel</i>	41
2.2.2	Biodiesel	42

2.2.2.1	<i>Características e propriedades do biodiesel</i>	42
2.2.3	Hidrogênio	43
2.2.3.1	<i>Características e propriedades do hidrogênio</i>	43
2.3	UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL	44
2.3.1	Benefícios e desafios da adição de hidrogênio	44
2.3.2	Estudos anteriores sobre hidrogênio em motores diesel	45
2.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	48
2.4.1	Métodos e ferramentas	48
2.4.1.1	<i>Tipos de simulação</i>	49
2.4.1.2	<i>Modelos usados em CRFD</i>	49
2.4.1.2.1	Modelos de combustão	49
2.4.1.2.2	Escoamento turbulento: modelagem	53
2.4.1.2.3	Modelos de spray	56
2.4.1.3	<i>Geração de malha</i>	60
2.4.1.3.1	Tipos de malha	61
2.4.1.3.2	Qualidade da malha	61
2.4.1.3.3	Refinamento de malha	62
2.4.1.3.4	Equações e métodos de interpolação	62
2.4.2	Software AVL FIRE™ M	62
2.5	RELEVÂNCIA DESTE ESTUDO	64
3	METODOLOGIA	67
3.1	DESCRIÇÃO DO SOFTWARE AVL-FIRE™ M	67
3.1.1	Simulação modelo: AVL FIRE™ M - <i>In-Cylinder Flow (Dual Fuel)</i> (9607)	68
3.1.1.1	<i>Informações e características do modelo</i>	68
3.1.1.2	<i>Utilização do modelo cinético combustion dualfuel</i>	68
3.1.1.3	<i>Especificações técnicas</i>	69
3.1.1.4	<i>Benefícios do uso do modelo 9607</i>	69
3.2	CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	70
3.2.1	Parâmetros do motor	70
3.2.2	Domínio da geometria	71
3.2.3	Intervalo da simulação	72
3.2.4	Geração de malha	73
3.2.5	Variáveis ajustadas nas simulações	74
3.2.5.1	<i>Proporção de hidrogênio na mistura</i>	74
3.2.5.2	<i>Rotação do motor</i>	75
3.2.5.3	<i>Pressão de alimentação do ar/hidrogênio</i>	75
3.2.5.4	<i>Swirl</i>	76
3.2.5.5	<i>Ângulo de injeção dos bicos de diesel</i>	76

3.2.5.6	<i>Redução do diesel injetado</i>	76
3.2.5.7	<i>Considerações finais sobre as variáveis</i>	76
3.3	MODELAGEM DA MISTURA AR/COMBUSTÍVEL COM HIDROGÊNIO	76
3.3.1	Implementação no software AVL-FIRE™ M	77
3.3.2	Avaliação da combustão e emissões	77
3.4	REDUÇÃO DO DIESEL INJETADO	78
3.4.1	Estratégias de redução do diesel injetado	78
3.4.2	Implementação no software AVL-FIRE™ M	79
3.4.3	Dados de injeção de diesel	80
3.4.4	Avaliação da eficiência e emissões	81
3.5	PARÂMETROS DO AR DE ADMISSÃO	81
3.5.1	Pressão de entrada do ar na câmara de combustão	81
3.5.2	Swirl	82
3.5.3	Frações molares da composição do ar	82
3.6	COMPARAÇÃO COM OS DADOS DE POTÊNCIA DO MANUAL DO MOTOR VW EA288	83
3.6.1	Comparação com dados experimentais	83
3.6.2	Metodologia de validação	83
3.6.3	Resultados da validação	84
3.6.4	Comparação das curvas de potência	85
3.7	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	85
3.7.1	Pós-processamento dos dados	86
3.7.1.1	<i>Pós-processamento dos dados das simulações</i>	86
3.7.2	Potência do motor	87
3.7.2.1	<i>Medição da potência do motor</i>	87
3.7.2.2	<i>Dados utilizados</i>	87
3.7.2.3	<i>Avaliação da potência do motor</i>	88
3.7.2.4	<i>Procedimento para avaliação</i>	88
3.7.3	Eficiência térmica	88
3.7.3.1	<i>Medição da eficiência térmica</i>	88
3.7.3.2	<i>Dados utilizados</i>	88
3.7.3.3	<i>Cálculo da eficiência térmica</i>	89
3.7.3.4	<i>Procedimento para cálculo</i>	89
3.7.4	Consumo de combustível	90
3.7.4.1	<i>Medição do consumo de combustível</i>	90
3.7.4.2	<i>Dados utilizados</i>	90
3.7.4.3	<i>Avaliação do consumo de combustível</i>	90
3.7.4.4	<i>Procedimento para avaliação</i>	90
3.7.5	Emissões de poluentes	91

3.7.5.1	<i>Medição das emissões de poluentes</i>	91
3.7.5.2	<i>Dados utilizados</i>	91
3.7.5.3	<i>Avaliação das emissões de poluentes</i>	91
3.7.5.4	<i>Procedimento para avaliação</i>	91
3.7.6	Considerações sobre os dados de emissões	92
3.8	HARDWARE UTILIZADOS E TEMPO DAS SIMULAÇÕES	92
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	93
4.1.1	Potência do motor	93
4.1.1.1	<i>Resultados de potência a 1500, 2500 e 3500 RPM</i>	93
4.1.2	Eficiência térmica	95
4.1.2.1	<i>Resultados de eficiência térmica a 1500, 2500 e 3500 RPM</i>	95
4.1.3	Emissões	97
4.1.3.1	<i>Emissões de CO</i>	97
4.1.3.1.1	Resultados das simulações	97
4.1.3.2	<i>Emissões de CO₂</i>	99
4.1.3.2.1	Resultados das simulações	99
4.1.3.3	<i>Emissões de NO_x</i>	101
4.1.3.3.1	Resultados das simulações	101
4.1.3.4	<i>Emissões de fuligem (soot)</i>	103
4.1.3.4.1	Resultados das simulações	103
4.1.3.5	<i>Emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC)</i>	105
4.1.3.5.1	Resultados das simulações	105
4.1.4	Consumo de combustível	107
4.1.4.1	<i>Consumo de diesel</i>	107
4.1.4.1.1	Resultados das simulações para 1500 RPM	108
4.1.4.1.2	Resultados das simulações para 2500 RPM	109
4.1.4.1.3	Resultados das simulações para 3500 RPM	110
4.1.4.2	<i>Consumo de hidrogênio</i>	111
4.1.4.2.1	Resultados das simulações para 1500 RPM	111
4.1.4.2.2	Resultados das simulações para 2500 RPM	113
4.1.4.2.3	Resultados das simulações para 3500 RPM	114
4.1.5	Relação ar/combustível (lambda)	115
4.1.5.1	<i>Resultados de lambda a 1500 RPM</i>	115
4.1.5.2	<i>Resultados de lambda a 2500 RPM</i>	117
4.1.5.3	<i>Resultados de lambda a 3500 RPM</i>	118
4.1.6	Caracterização da combustão	120
4.1.6.1	<i>Caracterização da combustão a 1500 RPM</i>	120
4.1.6.2	<i>Caracterização da combustão a 2500 RPM</i>	122

4.1.6.3	<i>Caracterização da combustão a 3500 RPM</i>	123
4.1.7	Temperatura média (<i>Mean Temperature</i>)	125
4.1.7.1	<i>Temperatura média para 1500 RPM</i>	125
4.1.7.2	<i>Temperatura média para 2500 RPM</i>	126
4.1.7.3	<i>temperatura média para 3500 RPM</i>	127
4.1.8	Pressão total média (<i>Mean total pressure</i>)	128
4.1.8.1	<i>Pressão total média para 1500 RPM</i>	128
4.1.8.2	<i>Pressão total média para 2500 RPM</i>	129
4.1.8.3	<i>Pressão total média para 3500 RPM</i>	130
4.1.9	Progresso médio da reação (<i>Mean reaction progress</i>)	131
4.1.9.1	<i>Progresso médio da reação para 1500 RPM</i>	131
4.1.9.2	<i>Progresso médio da reação para 2500 RPM</i>	132
4.1.9.3	<i>Progresso médio da reação para 3500 RPM</i>	133
4.1.10	Resultados velocidade de chama laminar (<i>Laminar Flame Speed</i>)	134
4.1.10.1	<i>Velocidade de chama laminar para 1500 RPM</i>	134
4.1.10.2	<i>Velocidade de chama laminar para 2500 RPM</i>	135
4.1.10.3	135
4.2	COMPARAÇÃO COM DADOS DE MOTORES DIESEL CONVENCIO- NAIS	136
4.2.1	Potência, eficiência e consumo de combustível	137
4.2.2	Emissões de poluentes	139
4.2.3	Comparação com o motor de referência e desafios na implemen- tação	141
4.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LITERATURA	142
4.3.1	Metodologia de adição de hidrogênio	142
4.3.2	Eficiência térmica e consumo de combustível	143
4.3.3	Emissões	143
4.3.4	Discussão sobre as variáveis operacionais	144
4.4	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO E REDUÇÃO DO DIESEL INJETADO	146
4.4.1	Vantagens da adição de hidrogênio e redução do diesel injetado	146
4.4.2	Desvantagens e desafios	146
4.4.3	Considerações finais	147
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	148
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	148
5.1.1	Avaliação das proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível	148
5.1.2	Impacto da adição de hidrogênio e da redução do diesel injetado	149
5.1.3	Avaliação das emissões de CO₂, CO, Fuligem e NOx	150
5.1.4	Ajuste das variáveis de operação para manutenção da potência	151

5.2	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	152
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	153
	REFERÊNCIAS	155
	ANEXO A – ROTEIRO DAS SIMULAÇÕES (ROAD MAP)	159

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os motores diesel são amplamente utilizados em veículos comerciais, como caminhões, ônibus e vans de transporte de carga e passageiros, além de máquinas agrícolas, como tratores, colheitadeiras e plantadeiras. Esses veículos são fundamentais para a logística e o desenvolvimento econômico do país, possibilitando o transporte de pessoas, mercadorias e insumos de forma eficiente. No entanto, os motores diesel são grandes fontes de agentes poluentes, como material particulado (MP) ou fuligem (*Soot*), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que têm impactos negativos significativos sobre a qualidade do ar e a saúde pública (HEYWOOD, 2018).

Desde a implementação do PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), o Brasil tem visto melhorias notáveis na qualidade do ar devido à redução das emissões de poluentes pelos veículos automotores. O PROCONVE estabelece limites máximos de emissão de poluentes para veículos diesel, incentivando o uso de tecnologias avançadas para atender a esses padrões rigorosos (IBAMA, 2011). Tecnologias como os sistemas de recirculação de gases de escape (EGR), catalisadores SCR (Redução Catalítica Seletiva) e filtros de partículas (DPF) têm sido implementadas para reduzir as emissões de NO_x e partículas (RIBAS, 2016). Além dessas tecnologias, há um esforço contínuo para utilizar combustíveis menos poluentes, como o diesel S-10, que possui um teor reduzido de enxofre, e o biodiesel, que emite menos poluentes em comparação com o diesel convencional (HEYWOOD, 2018). Essas iniciativas têm contribuído para que os motores a diesel fabricados no Brasil atendam aos limites de emissão estabelecidos pelo PROCONVE, reduzindo significativamente a poluição do ar e os impactos ambientais.

Apesar dos avanços tecnológicos e regulatórios, os motores a diesel continuam sendo grandes emissores de poluentes, especialmente quando comparados a tecnologias mais modernas e limpas, como os veículos elétricos e movidos a hidrogênio (TEIXEIRA R.; CALIA, 2013). Os veículos elétricos e a hidrogênio possuem emissão zero de poluentes, alto nível de eficiência energética e baixo nível de ruído, tornando-se alternativas atraentes para um futuro mais sustentável. No entanto, a implementação dessas tecnologias no Brasil ainda é limitada devido aos altos custos, a falta de infraestrutura adequada e poucos incentivos governamentais.

A utilização de hidrogênio como combustível complementar em motores de combustão interna ciclo diesel tem atraído crescente interesse nos últimos anos. O hidrogênio é uma fonte de energia limpa e renovável, com potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis (AMOROSO DA SILVA, 2016). Adicionar hidrogênio à mistura ar/combustível pode aumentar a eficiência da combustão e melhorar o desempenho do motor, devido ao seu alto

poder calorífico e capacidade de acelerar a taxa de queima da mistura (JAMROZIK; GRAB-ROGALIŃSKI; TUTAK, 2020). Além disso, a combustão do hidrogênio produz principalmente água, o que contribui para a redução das emissões de CO₂ e CO. Estudos recentes demonstram que a adição de hidrogênio pode levar a uma melhoria na eficiência térmica e uma significativa redução nas emissões de poluentes (ZAREEI; ROHANI; NUÑEZ ALVAREZ, 2022). No entanto, o aumento das emissões de NOx devido à alta temperatura de combustão do hidrogênio é um desafio que precisa ser abordado (HEYWOOD, 2018).

A simulação numérica tem se tornado uma ferramenta essencial no desenvolvimento de motores, permitindo que engenheiros explorem diversas soluções para preparação de mistura, combustão, redução de emissões e pós-tratamento de gases de escape com a utilização de recursos limitados. Através de métodos como a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), é possível analisar e otimizar o desempenho dos motores em condições variáveis, prever comportamentos complexos de combustão e identificar oportunidades para melhorias na eficiência e na redução de emissões. Além disso, as simulações oferecem um ambiente controlado para testar novos combustíveis, como o hidrogênio, sem os custos e riscos associados aos testes experimentais. Ferramentas de simulação, como o AVL FIRE™ M, proporcionam uma compreensão detalhada dos processos internos do motor, auxiliando no desenvolvimento de tecnologias avançadas e sustentáveis para a próxima geração de motores de combustão interna.

Adicionalmente, a hibridização de propulsores e o uso de combustíveis alternativos são estratégias promissoras para a redução das emissões de CO₂ e a melhoria da eficiência energética. Assim como a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, combustíveis sintéticos e hidrogênio pode resultar em um funcionamento de motores de combustão interna significativamente mais sustentável e com menor impacto ambiental. Biocombustíveis, como o biodiesel, têm o potencial de reduzir as emissões de CO₂ e outros poluentes, enquanto combustíveis sintéticos podem ser produzidos a partir de fontes renováveis, contribuindo para uma economia de baixo carbono (HEYWOOD, 2018). O hidrogênio, em particular, destaca-se por sua capacidade de queima limpa, produzindo apenas vapor de água como subproduto, o que elimina as emissões de CO₂ e outros poluentes nocivos (AMOROSO DA SILVA, 2016). Estudos mostram que a integração desses combustíveis alternativos pode não apenas diminuir a pegada de carbono dos motores, mas também melhorar a eficiência da combustão e o desempenho geral do motor (JAMROZIK; GRAB-ROGALIŃSKI; TUTAK, 2020).

Os motores de combustão interna continuarão a desempenhar um papel importante no transporte e na logística por muitos anos, apesar dos avanços em tecnologias de e-mobilidade. Portanto, é crucial reduzir ao máximo suas emissões de CO₂ e demais

poluentes. Este estudo pretende contribuir para esse objetivo, avaliando o potencial do hidrogênio como aditivo na mistura ar/combustível e a redução do diesel injetado para melhorar a eficiência e reduzir as emissões dos motores diesel.

A escolha do motor VW EA288 como referência para as simulações foi baseada em sua popularidade e relevância no mercado automotivo, bem como na disponibilidade de dados detalhados sobre sua curva de potência bem como dados geométricos do motor. Ajustar as variáveis das simulações para se obter uma potência semelhante à desse motor permite uma análise aplicável aos motores diesel modernos.

Neste contexto, este estudo visa analisar, por meio de simulação numérica dinâmica de fluidos reativa computacional (CRFD), os efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e da redução do diesel injetado em um motor de combustão interna ciclo diesel. O objetivo é avaliar os ganhos em eficiência em termos de potência, bem como a redução no consumo de combustível e nas emissões de poluentes. As simulações foram realizadas utilizando o software AVL FIRE™ M versão 2023 R1, considerando diferentes proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%) e nas rotações do motor de 1500, 2500 e 3500 RPM.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar, por meio de simulação numérica CRFD os efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e da redução do diesel injetado em um motor de combustão interna ciclo diesel, mantendo valores de potência do motor operando sem H₂ e na redução de emissões de poluentes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar diferentes proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%) na mistura ar/combustível;
- Analisar o impacto da adição de hidrogênio e da redução do diesel injetado na eficiência do motor em termos de diminuição da injeção de diesel (descarbonização) e emissões.
- Avaliar as emissões de CO₂, CO, fuligem e NOx para cada proporção de hidrogênio e nível de redução de diesel injetado;
- Ajustar as variáveis de operação, principalmente diminuindo a massa de diesel injetado e alterando o ponto de injeção do combustível para garantir uma potência semelhante à do motor VW EA288 nas rotações estudadas, utilizando a curva de potência do manual do motor VW EA288 como referência.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução, apresenta uma visão geral do tema, contextualização do problema de pesquisa, objetivos, justificativa e estrutura da dissertação.

Capítulo 2: Revisão da literatura, explora os fundamentos dos motores de combustão interna ciclo diesel, a utilização de hidrogênio como combustível, estudos anteriores sobre hidrogênio em motores diesel e a simulação numérica em motores de combustão interna.

Capítulo 3: Metodologia, descreve detalhadamente o software AVL FIRE™ M, a configuração das simulações, os parâmetros do motor, condições de operação, modelagem da mistura ar/combustível com hidrogênio e redução do diesel injetado, validação do modelo e os critérios de avaliação dos resultados.

Capítulo 4: Resultados e discussão, apresenta os resultados das simulações, compara diferentes proporções de hidrogênio, analisa o impacto na eficiência do motor e nas emissões de poluentes, e discute as vantagens e desvantagens da adição de hidrogênio e da redução do diesel injetado.

Capítulo 5: Conclusões e recomendações, resume as principais conclusões do estudo, oferece recomendações para pesquisas futuras e faz considerações finais sobre a importância do trabalho e suas contribuições para a engenharia automotiva.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO DIESEL

Os motores de combustão interna ciclo diesel são amplamente utilizados devido à sua alta eficiência energética e durabilidade. A seguir, são detalhados os princípios de funcionamento e as principais características de eficiência e emissões desses motores.

2.1.1 Princípios de funcionamento

O motor ciclo Diesel é um tipo de motor de combustão interna que utiliza a compressão do ar para iniciar a combustão do combustível sem o uso de velas de ignição. Esse processo é chamado de ignição por compressão (MARTINS, 2016). Ele foi inventado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel em 1892 (HEYWOOD, 2018) e é amplamente utilizado em veículos comerciais, caminhões, ônibus, geradores de energia e em outras aplicações que exigem alta eficiência e durabilidade.

O motor ciclo diesel é conhecido por sua alta eficiência energética, um dos fatores que contribuem para sua maior eficiência energética é à sua capacidade de comprimir apenas ar antes da injeção de combustível, o que resulta em maior pressão e temperatura na câmara de combustão. Isso permite que o motor diesel extraia mais energia do combustível em comparação com outros tipos de motores de combustão interna. Outra característica importante do motor ciclo diesel é o seu alto torque em baixas rotações, o que os torna adequados para aplicações que exigem força e tração, como caminhões, ônibus, tratores e equipamentos pesados, sendo capaz de funcionar com diferentes tipos de combustível, incluindo diesel, biodiesel e outros biocombustíveis (MARTINS, 2016).

O motor ciclo Diesel opera com quatro tempos: admissão, compressão, combustão (expansão) e exaustão:

- **Admissão:** Durante a fase de admissão, a válvula de admissão se abre e o pistão se move para baixo, permitindo que o ar atmosférico entre no cilindro.
- **Compressão:** Na fase de compressão, a válvula de admissão se fecha e o pistão se move para cima, comprimindo o ar dentro do cilindro. A compressão eleva significativamente a temperatura do ar.
- **Combustão:** Quando o pistão atinge o topo do seu curso, o combustível diesel é injetado diretamente na câmara de combustão. A alta temperatura do ar comprimido faz com que o combustível se inflame espontaneamente, iniciando a combustão. A pressão resultante empurra o pistão para baixo, gerando trabalho mecânico.

- Exaustão: Finalmente, na fase de exaustão, a válvula de escape se abre e o pistão se move para cima novamente, expulsando os gases de combustão para fora do cilindro (MARTINS, 2016).

2.1.2 Ciclo diesel ideal e real

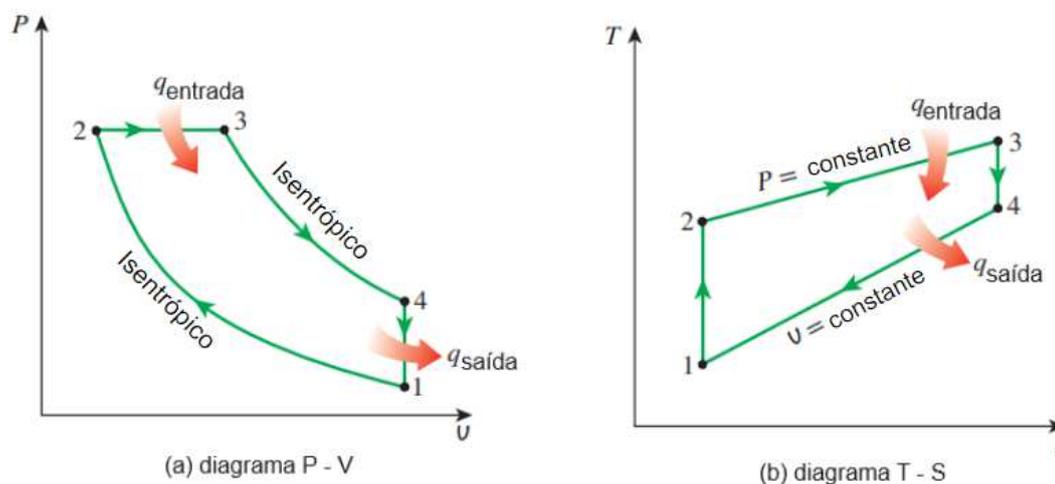
Para uma compreensão completa do funcionamento dos motores diesel, é crucial distinguir entre os ciclos Diesel ideal e real.

2.1.2.1 Ciclo diesel ideal

O ciclo Diesel ideal é um modelo teórico que simplifica o comportamento dos motores diesel para facilitar a análise e compreensão. Ele é composto por quatro processos principais conforme Figura 1 (a e b):

1. Compressão isentrópica (1-2): No ciclo ideal, o ar é comprimido de forma isentrópica, onde não há troca de calor com o ambiente e a entropia permanece constante. Figura. Este processo resulta em um aumento significativo de pressão e temperatura. Segundo Heywood (2018), este tipo de compressão é uma simplificação que ajuda na análise teórica da eficiência do motor.
2. Combustão a pressão constante (2-3): Durante a combustão, o combustível é injetado e queimado a uma pressão constante, aumentando a temperatura e o volume dos gases.
3. Expansão isentrópica (3-4): Os gases quentes se expandem de forma isentrópica, empurrando o pistão para baixo e realizando trabalho mecânico, com a entropia permanecendo constante.
4. Rejeição de calor a volume constante (4-1): Os gases de combustão são expelidos a volume constante, preparando o cilindro para a próxima admissão de ar.

Figura 1 – Diagramas P-v e T-s para o ciclo diesel ideal.



Fonte: (ÇENGEL; BOLES; KANOĞLU, 2019)

2.1.2.2 Ciclo diesel real

O ciclo Diesel real difere significativamente do ciclo ideal devido a vários fatores práticos:

- Perdas de calor: Nos motores reais, parte da energia gerada pela combustão é perdida como calor para os componentes do motor e o ambiente.
- Atrito: O atrito entre as partes móveis do motor consome parte da energia, reduzindo a eficiência global.
- Dinâmica da combustão: A combustão em um motor real não ocorre instantaneamente nem a pressão constante, como no modelo ideal. Há um atraso na ignição e variações de pressão ao longo do processo de combustão.
- Eficácia volumétrica: Nos motores reais, a quantidade de ar que entra no cilindro durante a admissão pode ser menor do que o volume total do cilindro devido a restrições no fluxo de ar.
- Perdas de exaustão: As perdas de exaustão ocorrem devido à pressão residual dos gases de combustão que não são totalmente expelidos do cilindro.

Essas diferenças são cruciais para o desenvolvimento e otimização dos motores diesel, permitindo que engenheiros identifiquem áreas de melhoria para aumentar a eficiência e reduzir as emissões de poluentes.

2.1.3 Eficiência e emissões

Os motores ciclo diesel são reconhecidos por sua alta eficiência energética, em parte devido à capacidade de operar com uma relação de compressão mais alta do que os motores a gasolina. Essa característica permite uma melhor conversão de energia térmica em trabalho mecânico, resultando em menor consumo de combustível para uma mesma quantidade de trabalho produzido (HEYWOOD, 2018).

No entanto, os motores diesel também são conhecidos por emitir altos níveis de poluentes. As emissões típicas desses motores incluem:

- Óxidos de nitrogênio (NOx): Formados devido às altas temperaturas de combustão, os NOx são poluentes prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, contribuindo para a poluição atmosférica;
- Material particulado (MP): Partículas sólidas emitidas durante a combustão, que podem causar problemas respiratórios e contribuir para a poluição do ar;
- Monóxido de carbono (CO): Um gás tóxico formado pela combustão incompleta do combustível;
- Hidrocarbonetos não queimados (HC): Compostos orgânicos voláteis produtos de combustão incompleta que contribuem para a formação de ozônio troposférico e da poluição atmosférica (HEYWOOD, 2018).

Para mitigar essas emissões, diversas tecnologias têm sido implementadas em motores diesel modernos, como:

- Sistemas de recirculação de gases de escape (EGR): Reduzem a formação de NOx ao recircular uma parte dos gases de escape de volta para a entrada de ar, diminuindo a temperatura de combustão.
- Filtros de partículas diesel (DPF): Capturam e removem o material particulado dos gases de escape.
- Catalisadores de redução catalítica seletiva (SCR): Utilizam um agente redutor, como a ureia (Arla 32), para converter NOx em nitrogênio e água (RIBAS, 2016; HEYWOOD, 2018).

Essas tecnologias permitem que os motores diesel atendam a regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, como as estabelecidas pelo PROCONVE no Brasil. O PROCONVE estabelece limites máximos de emissão de poluentes para veículos

diesel, incentivando o uso dessas tecnologias avançadas para reduzir a poluição do ar e os impactos ambientais (IBAMA,2011).

2.1.4 Taxa de compressão

A taxa de compressão é um parâmetro crítico no design e funcionamento dos motores de combustão interna. Ela é definida como a razão entre o volume total do cilindro quando o pistão está no ponto morto inferior (PMI) e o volume da câmara de combustão quando o pistão está no ponto morto superior (PMS) (HEYWOOD, 2018). Em termos matemáticos, a taxa de compressão (CR) pode ser expressa pela equação (1):

$$CR = \frac{V_c + V_s}{V_c} \quad (1)$$

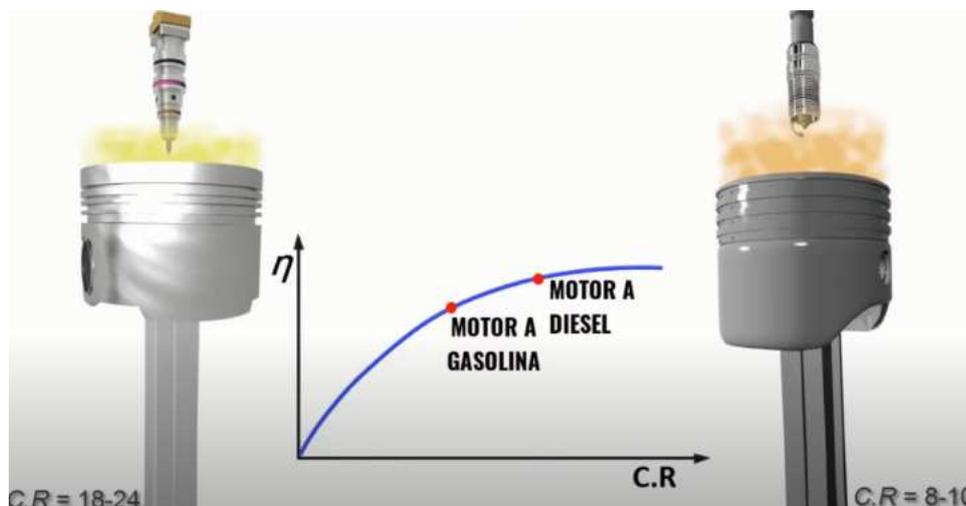
onde V_c é o volume da câmara de combustão e V_s é o volume deslocado pelo pistão (ou volume de varredura).

A taxa de compressão tem uma importância fundamental para a eficiência térmica do motor. Uma maior compressão eleva a pressão e a temperatura da mistura ar-combustível antes da ignição, resultando em uma combustão mais eficiente e uma melhor conversão de energia térmica em trabalho mecânico (HEYWOOD, 2018). Além disso, uma maior taxa de compressão pode aumentar a potência de saída do motor, pois a mistura de ar e combustível é mais densamente comprimida, permitindo uma combustão mais vigorosa. A relação eficiência x taxa de compressão pode ser observada na Figura 2.

A taxa de compressão também influencia as emissões dos motores. Motores com maior taxa de compressão tendem a ter menores emissões de CO_2 , mas podem emitir mais NO_x devido às temperaturas de combustão mais altas (HEYWOOD, 2018). Portanto, há um equilíbrio delicado entre melhorar a eficiência do motor e controlar as emissões de poluentes.

Em termos práticos, motores a gasolina geralmente têm taxas de compressão entre 8:1 e 12:1, enquanto motores diesel, que dependem da ignição por compressão, tendem a ter taxas de compressão mais altas, variando de 14:1 a 22:1 (HEYWOOD, 2018). Estas diferenças refletem as necessidades específicas de cada tipo de motor em termos de eficiência e controle de emissões.

Figura 2 – Eficiência e taxa de compressão

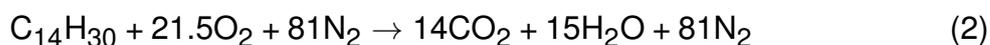


Fonte: (MECÂNICA ONLINE, 2023)

2.1.5 Estequiometria do ar de admissão em motores diesel

A relação ar/combustível estequiométrica é fundamental para o funcionamento eficiente dos motores diesel. Conforme HEYWOOD (2018), a relação estequiométrica para motores diesel é de aproximadamente 14,5:1, o que significa que para cada unidade de combustível, são necessárias 14,5 unidades de ar para uma combustão completa. Esse balanço é essencial para garantir que todo o combustível seja queimado, evitando tanto o excesso de combustível quanto o excesso de oxigênio na câmara de combustão.

Os combustíveis diesel são compostos principalmente por hidrocarbonetos, que podem ser representados pela fórmula geral $C_{14}H_{30}$. A combustão completa de $C_{14}H_{30}$ pode ser representada pela reação química (2):



Na equação (2), 21,5 moléculas de oxigênio (O_2) são necessárias para queimar completamente uma molécula de $C_{14}H_{30}$, resultando em dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) como produtos da combustão (HEYWOOD, 2018).

A relação ar/combustível estequiométrica em massa é calculada considerando a quantidade de oxigênio presente no ar. O ar atmosférico contém aproximadamente 21% de oxigênio em volume e 79% de nitrogênio e outros gases. A massa molar do ar, considerando apenas oxigênio e nitrogênio, é de aproximadamente 28,85 g/mol. Para uma molécula de $C_{14}H_{30}$, a massa molar do combustível é de 198 g/mol. A quantidade de oxigênio necessária é 21,5 moléculas de O_2 , resultando em uma massa de oxigênio de 688 g. A quantidade de ar necessária, sabendo que 21% do ar é oxigênio,

é de aproximadamente 3276 g. Portanto, a relação ar/combustível estequiométrica em massa é de aproximadamente 16,55:1 (HEYWOOD, 2018).

O coeficiente lambda (λ) é um indicador da razão entre a quantidade de ar real fornecida para a combustão e a quantidade de ar estequiométrica necessária. Quando $\lambda = 1$, a mistura é estequiométrica; quando $\lambda > 1$, a mistura é pobre (excesso de ar); e quando $\lambda < 1$, a mistura é rica (excesso de combustível). Motores diesel geralmente operam com uma mistura pobre ($\lambda > 1$), o que significa que há mais ar do que o necessário para a combustão estequiométrica, ajudando a reduzir a formação de fuligem (*soot*) e hidrocarbonetos não queimados (HEYWOOD, 2018).

A gestão da relação estequiométrica é crucial para a eficiência do motor e a emissão de poluentes. Motores diesel tendem a ser mais eficientes com misturas pobres, o que maximiza a energia extraída do combustível. Além disso, a quantidade de oxigênio disponível afeta a formação de poluentes. Misturas pobres tendem a reduzir as emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC), mas podem aumentar as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) devido às altas temperaturas de combustão (HEYWOOD, 2018).

2.1.6 Pressão de alimentação do ar em motores diesel

A pressão de alimentação do ar em motores diesel é um parâmetro crucial que afeta diretamente a eficiência e o desempenho do motor. Esta pressão, também conhecida como pressão de sobrealimentação, é geralmente aumentada por meio de dispositivos como turbocompressores ou compressores mecânicos, que comprimem o ar antes de ele entrar na câmara de combustão. Esse aumento na pressão de alimentação resulta em uma maior densidade do ar, permitindo que mais oxigênio seja disponibilizado para a combustão.

Em um motor diesel, a pressão de alimentação típica pode variar significativamente dependendo do design do motor e das condições de operação. Em motores modernos, especialmente aqueles equipados com turbocompressores, a pressão de alimentação do ar pode ser aumentada significativamente acima da pressão atmosférica. Segundo HEYWOOD (2018), a pressão de alimentação do ar pode variar de 1,5 a 2,5 bar em relação à pressão atmosférica em motores turboalimentados.

A compressão do ar antes da admissão tem vários benefícios importantes:

- Aumento da potência: Com mais ar disponível na câmara de combustão, é possível queimar mais combustível, resultando em um aumento da potência gerada pelo motor.
- Melhoria da eficiência de combustão: A maior densidade do ar melhora a mistura ar-combustível e a distribuição do calor, levando a uma combustão mais completa e eficiente.

- Redução de emissões: A combustão mais completa resultante de uma melhor mistura ar-combustível pode levar a uma redução nas emissões de poluentes como monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC).
- Controle de temperatura: Aumentar a pressão de alimentação do ar também pode ajudar a controlar a temperatura de combustão, o que é crucial para gerenciar as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx).

O uso de turbocompressores é particularmente eficaz para aumentar a pressão de alimentação do ar. Um turbocompressor utiliza os gases de escape do motor para acionar uma turbina que, por sua vez, aciona um compressor de ar. Isso não apenas aumenta a pressão de alimentação do ar, mas também melhora a eficiência global do motor, aproveitando a energia que de outra forma seria desperdiçada nos gases de escape (HEYWOOD, 2018).

Motores diesel modernos também podem utilizar sistemas de intercooler para resfriar o ar comprimido antes de ele entrar na câmara de combustão. Isso aumenta ainda mais a densidade do ar e melhora a eficiência da combustão. Além disso, sistemas de gerenciamento eletrônico avançados são empregados para otimizar a pressão de alimentação do ar em diferentes condições de operação, garantindo que o motor opere de forma eficiente e limpa em uma ampla gama de cargas e velocidades.

2.1.7 Relação ar/combustível (lambda) em motores diesel

A relação ar/combustível, frequentemente representada pela letra grega lambda (λ), é um parâmetro fundamental na análise da combustão em motores de combustão interna. O valor de lambda é definido como a razão entre a quantidade de ar realmente presente na mistura de combustão e a quantidade de ar necessária para uma combustão estequiométrica perfeita. Em termos matemáticos, lambda é expresso por meio da Equação (3):

$$\lambda = \frac{A/F_{\text{real}}}{A/F_{\text{estequiométrico}}} \quad (3)$$

Onde: - A/F_{real} é a razão real de ar/combustível. - $A/F_{\text{estequiométrico}}$ é a razão estequiométrica de ar/combustível.

Para motores diesel, a operação usual é com uma mistura pobre, ou seja, com um excesso de ar. Isso significa que os valores de lambda são tipicamente maiores que 1. Um valor de lambda maior que 1 indica uma mistura pobre (excesso de ar), enquanto um valor menor que 1 indica uma mistura rica (falta de ar).

2.1.7.1 Importância do lambda em motores diesel

Nos motores diesel, a combustão é iniciada pela compressão do ar no cilindro, o que aumenta a sua temperatura até o ponto de autoignição do combustível injetado. A quantidade de ar admitida no cilindro é geralmente maior do que a quantidade necessária para uma combustão estequiométrica, resultando em uma mistura pobre. Essa operação com excesso de ar traz várias vantagens:

- Redução de emissões de CO e HC: A presença de excesso de ar assegura que o combustível é completamente queimado, reduzindo as emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC) (HEYWOOD, 2018).
- Melhora da eficiência térmica: Uma mistura pobre geralmente melhora a eficiência térmica do motor, pois permite que a combustão ocorra a uma temperatura mais alta e com uma maior expansão dos gases (HEYWOOD, 2018).
- Menor formação de fuligem (*soot*): O excesso de ar reduz a formação de fuligem, uma vez que mais oxigênio está disponível para reagir com o carbono do combustível (HEYWOOD, 2018).

2.1.7.2 Valores típicos de lambda em motores diesel

Os valores típicos de lambda em motores diesel variam de acordo com a carga e as condições operacionais do motor. Em condições de carga parcial, os valores de lambda podem variar de aproximadamente 1,5 a 2,0. Em condições de plena carga, esses valores podem ser ligeiramente menores, mas ainda superiores a 1 (HEYWOOD, 2018).

Esses valores são ajustados para assegurar uma combustão completa e eficiente, minimizando as emissões de poluentes e maximizando a eficiência do motor. Nos motores modernos, tecnologias como a recirculação de gases de escape (EGR) e a injeção eletrônica de combustível permitem um controle preciso da razão ar/combustível, otimizando os valores de lambda em diversas condições operacionais (MARTINS, 2016).

2.1.7.3 Controle de lambda

O controle da relação ar/combustível em motores diesel é feito principalmente através da gestão da quantidade de ar admitida e do tempo e quantidade de injeção de combustível. Nos motores modernos, sensores de oxigênio (lambda) são usados para monitorar a composição dos gases de escape e ajustar a injeção de combustível

em tempo real, garantindo que o motor opere com a mistura ar/combustível ideal em todas as condições de operação (MARTINS, 2016).

Os ajustes na pressão do ar de entrada e o uso de tecnologias como o *swirl*, que promove uma melhor mistura do ar e combustível no cilindro, são métodos comuns para garantir que os valores de lambda estejam dentro do intervalo desejado, proporcionando uma combustão eficiente e controlando as emissões de poluentes (HEYWOOD, 2018).

2.1.7.4 Impacto da adição de hidrogênio no lambda

A adição de hidrogênio à mistura ar/combustível em motores diesel pode influenciar significativamente os valores de lambda. O hidrogênio possui um alto poder calorífico e queima mais rapidamente do que o diesel, o que pode resultar em uma mistura mais rica em ar. Estudos têm mostrado que a adição de hidrogênio pode aumentar os valores de lambda, indicando uma operação ainda mais pobre (excesso de ar), o que pode melhorar a eficiência da combustão e reduzir as emissões de alguns poluentes (AMOROSO DA SILVA, 2016).

No entanto, o aumento excessivo dos valores de lambda deve ser controlado para evitar problemas de combustão incompleta e formação de óxidos de nitrogênio (NOx). Ajustes precisos na injeção de combustível e na pressão do ar de entrada são necessários para otimizar a operação do motor com a adição de hidrogênio (AMOROSO DA SILVA, 2016).

2.1.8 *Swirl* em motores diesel

O *swirl* em motores diesel refere-se ao movimento de rotação do ar dentro do cilindro, que ocorre durante a fase de admissão e compressão. Este movimento rotacional é crucial para melhorar a mistura ar-combustível, a combustão e, conseqüentemente, a eficiência do motor. O *swirl* é gerado através do design da válvula de admissão e do formato da câmara de combustão.

O *swirl* tem vários efeitos positivos na operação do motor diesel:

- Melhora na mistura ar-combustível: O movimento rotacional do ar ajuda a distribuir o combustível injetado de maneira mais uniforme dentro da câmara de combustão, promovendo uma mistura mais homogênea. Isso é especialmente importante em motores diesel, onde o combustível é injetado diretamente no cilindro e precisa se misturar com o ar para uma combustão eficiente.
- Combustão mais eficiente: Uma melhor mistura ar-combustível leva a uma combustão mais completa e eficiente, resultando em maior extração de ener-

gia do combustível e menor emissão de poluentes como hidrocarbonetos não queimados (HC) e monóxido de carbono (CO).

- Redução de emissões: O *swirl* pode ajudar a reduzir as emissões de poluentes ao melhorar a combustão. Uma mistura mais homogênea e uma combustão mais eficiente significam menos formação de fuligem (*soot*) e menores emissões de óxidos de nitrogênio (NOx).
- Controle de temperatura: O movimento de *swirl* também ajuda a distribuir o calor de maneira mais uniforme dentro do cilindro, o que pode ajudar a controlar a temperatura de combustão e a prevenir pontos quentes que podem levar à formação excessiva de NOx.

As principais equações para cálculo do *swirl* são as seguintes:

1. Coeficiente de *swirl* (C_s): Definido pela Equação (4):

$$C_s = \frac{\omega_p B}{v_0} \quad (4)$$

Onde:

- ω_p é a velocidade angular da roda paddle (igual a $2\pi N_p$, onde N_p é a velocidade de rotação).
- B é o diâmetro do cilindro.
- v_0 é a velocidade característica, derivada da queda de pressão através da válvula, calculada usando a Equação (5):

$$v_0 = \left(\frac{2(p_0 - p_c)}{\rho} \right)^{1/2} \quad (5)$$

ou, para fluxo compressível a Equação (6):

$$v_0 = \left[\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 - \left(\frac{p_c}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

Onde:

- p_0 e p_c são as pressões de estagnação e pressão do cilindro, respectivamente.
- ρ é a densidade do ar.
- γ é a razão de calores específicos.

2. *Swirl Ratio* (R_s): Esta é uma métrica usada para definir o nível de swirl no motor. É dada pela Equação (7):

$$R_s = \frac{\omega_z}{2\pi N} \quad (7)$$

Onde:

- ω_z é a velocidade angular do sólido rotativo fictício do fluxo de ar no final do processo de admissão.
- N é a velocidade angular do virabrequim.

Essas equações são fundamentais para quantificar o movimento de rotação (*swirl*) do ar dentro do cilindro, o que impacta diretamente na mistura ar-combustível e, conseqüentemente, na eficiência da combustão em motores Diesel.

O nível de *swirl* em um motor diesel é influenciado por vários fatores, incluindo o design da válvula de admissão, a forma da câmara de combustão e a velocidade do motor. Em motores de alta performance, o *swirl* é otimizado para maximizar a eficiência de combustão e minimizar as emissões.

Segundo HEYWOOD (2018), o *swirl* é uma técnica eficaz para melhorar a mistura ar-combustível e a combustão em motores diesel. O design da válvula de admissão e da câmara de combustão desempenha um papel crucial na geração do *swirl*. Em motores modernos, o uso de tecnologias de simulação e otimização permite que engenheiros projetem motores com níveis ideais de *swirl*, melhorando a eficiência e reduzindo as emissões.

Além disso, o *swirl* pode ser ajustado em tempo real em alguns motores diesel modernos através de sistemas de válvulas variáveis e outras tecnologias avançadas de gerenciamento de motor. Isso permite que o nível de *swirl* seja otimizado para diferentes condições de operação, garantindo que o motor opere de maneira eficiente e limpa em uma ampla gama de cargas e velocidades.

2.1.9 Bico injetor em motores diesel

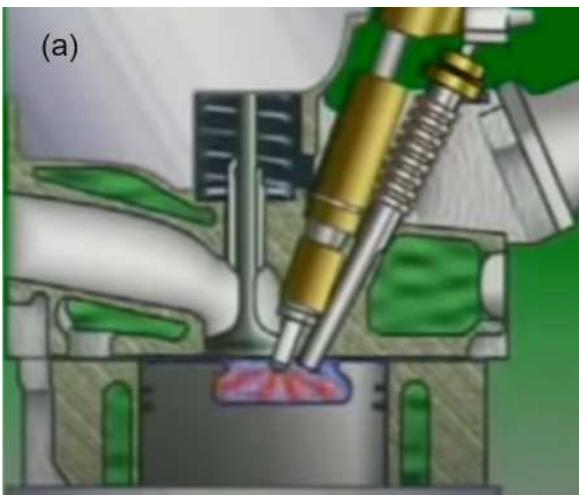
Os bicos injetores são componentes essenciais em motores diesel, responsáveis pela introdução do combustível na câmara de combustão sob alta pressão. O desempenho dos bicos injetores afeta diretamente a eficiência da combustão, o consumo de combustível e as emissões de poluentes. Os bicos injetores modernos são projetados para atomizar o combustível em partículas finas, garantindo uma mistura ar-combustível homogênea e uma combustão eficiente.

2.1.9.1 Função e importância dos bicos injetores

Os bicos injetores têm várias funções críticas em motores diesel:

- Atomização do combustível: Os bicos injetores atomizam o combustível, transformando-o em finas gotículas para melhorar a mistura com o ar. Uma boa atomização é crucial para uma combustão eficiente e completa. Um exemplo pode ser visto na Figura 3 (a).
- Controle da quantidade de combustível: Eles regulam a quantidade exata de combustível injetado em cada ciclo de combustão, ajustando a injeção de acordo com a carga e a velocidade do motor.
- Precisão no tempo de injeção: A precisão no início e término da injeção é essencial para otimizar a combustão e reduzir as emissões de poluentes.
- Pressão de injeção: Operam sob altas pressões, que podem exceder 2000 bar, o que é necessário para garantir uma atomização fina e uma distribuição uniforme do combustível na câmara de combustão (HEYWOOD, 2018).

Figura 3 – Funcionamento (a) e exemplo de bico injetor diesel (b)



Fonte: (DIESEL TECHNOLOGY FORUM, 2010)



Fonte: (ASTRAL DIESEL, 2024)

2.1.9.2 Tipos de bicos injetores

Existem vários tipos de bicos injetores utilizados em motores diesel, cada um com características específicas para atender diferentes requisitos de desempenho. A Figura 3 (b) mostra um exemplo de bico injetor:

- Bico injetor de orifício: Composto por múltiplos orifícios que pulverizam o combustível em padrões específicos para garantir uma distribuição uniforme. São comuns em sistemas de injeção direta.
- Bico injetor de pintle: Possui uma agulha móvel que controla a abertura e fechamento do orifício de injeção, proporcionando um padrão de pulverização em forma de cone. São utilizados em sistemas de injeção indireta.
- Bico injetor piezoelétrico: Utiliza cristais piezoelétricos para controlar a injeção com alta precisão. Oferecem resposta rápida e controle preciso da quantidade de combustível injetado, sendo comuns em motores modernos de alta performance.
- Bico injetor *common rail*: Parte de um sistema de injeção *common rail*, onde o combustível é mantido em alta pressão em um acumulador comum e distribuído para cada bico injetor. Permite maior controle sobre o tempo e a quantidade de injeção, resultando em melhor eficiência de combustão e menores emissões.

2.1.9.3 Tecnologias avançadas de bicos injetores

Os avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de bicos injetores mais eficientes e precisos:

- Injeção eletrônica de alta pressão: Sistemas como o *common rail* permitem pressões de injeção extremamente altas, melhorando a atomização do combustível e a precisão da injeção.
- Controle eletrônico: A utilização de controle eletrônico permite ajustes dinâmicos dos parâmetros de injeção, como a duração e o tempo de injeção, otimizando a combustão em várias condições de operação.
- Bicos injetores piezoelétricos: Oferecem resposta rápida e alta precisão na injeção de combustível, melhorando a eficiência do motor e reduzindo as emissões.

2.1.9.4 Funcionamento do bico injetor em motores diesel

O funcionamento do bico injetor em motores diesel é um processo crítico que determina a eficiência da combustão, o desempenho do motor e as emissões de poluentes. De acordo com HEYWOOD (2018), o bico injetor deve garantir que o combustível seja introduzido na câmara de combustão de maneira otimizada para maximizar a eficiência e minimizar as emissões.

2.1.9.4.1 Processo de injeção

O bico injetor é responsável por atomizar o combustível, transformando-o em pequenas gotas que se misturam uniformemente com o ar na câmara de combustão. O processo de injeção pode ser dividido em várias etapas:

1. Pressurização do combustível: O combustível é pressurizado por uma bomba de alta pressão e direcionado para o bico injetor. Em sistemas de injeção moderna, como o common rail, a pressão pode exceder 2000 bar.
2. Abertura do bico injetor: O bico injetor é controlado eletronicamente e abre no momento preciso para iniciar a injeção do combustível. Em bicos injetores piezoelétricos, cristais piezoelétricos são usados para abrir e fechar o bico com alta precisão.
3. Atomização do combustível: À medida que o combustível pressurizado é forçado através dos pequenos orifícios do bico injetor, ele se atomiza em finas gotas. Essa atomização é crucial para garantir uma boa mistura do ar e combustível.
4. Injeção na câmara de combustão: O combustível atomizado é injetado na câmara de combustão onde se mistura com o ar comprimido. O design do bico injetor, incluindo o número e a disposição dos orifícios, influencia a distribuição do combustível e a formação da mistura ar-combustível.
5. Fechamento do bico injetor: Após a quantidade necessária de combustível ser injetada, o bico injetor fecha para interromper a injeção. A precisão no fechamento é tão importante quanto a abertura para garantir a quantidade exata de combustível seja injetada.

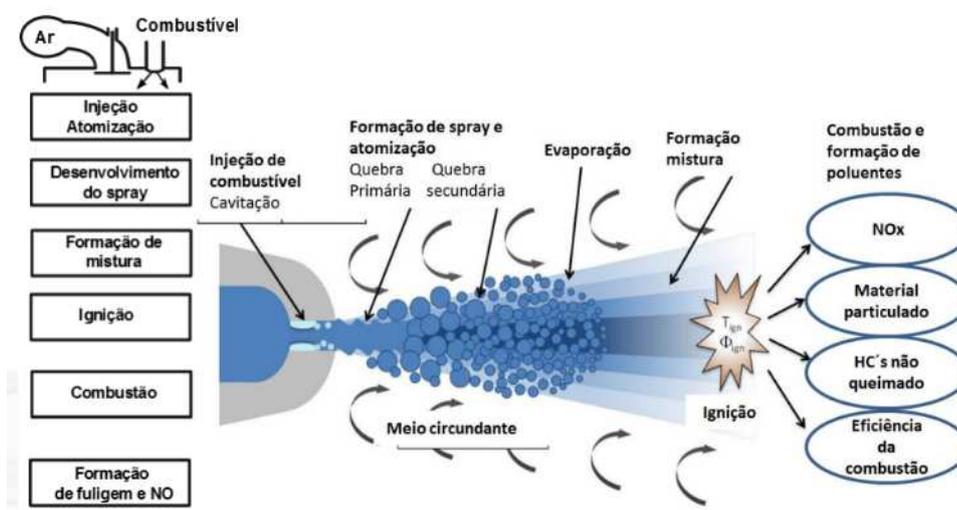
2.1.9.4.2 Atomização do combustível

A atomização do combustível é um dos aspectos mais importantes do funcionamento do bico injetor. Gotículas menores de combustível têm uma maior área de superfície em relação ao seu volume, o que facilita uma mistura mais homogênea com o ar e uma combustão mais completa. Esta atomização é detalhada na Figura 4. Uma boa atomização ajuda a:

- Melhorar a eficiência de combustão: Garantindo que mais combustível seja queimado de forma eficiente, extraíndo mais energia do combustível.
- Reduzir as emissões de poluentes: Minimiza a formação de fuligem (*soot*) e óxidos de nitrogênio (NOx).

- Aumentar a eficiência do motor: Melhorando a mistura ar-combustível e a combustão, o motor opera de forma mais eficiente e econômica.

Figura 4 – Atomização do combustível



Fonte: (SÁNCHEZ, 2017)

2.1.9.4.3 Controle eletrônico

O avanço dos sistemas de controle eletrônico permite um controle preciso sobre os parâmetros de injeção, como o tempo, a quantidade e a pressão de injeção. Isso resulta em uma otimização contínua da combustão em diversas condições operacionais. Motores diesel modernos utilizam sensores e unidades de controle eletrônico (ECUs) para monitorar e ajustar a injeção de combustível em tempo real, melhorando o desempenho e reduzindo as emissões.

2.1.10 Ângulos de início e término da injeção do combustível dos bicos injetores

Os ângulos de início e término da injeção do combustível são parâmetros críticos no desempenho de motores diesel. O ângulo de início da injeção refere-se ao ponto do ciclo do motor em que os bicos injetores começam a introduzir o combustível na câmara de combustão, enquanto o ângulo de término da injeção marca o ponto em que a injeção de combustível é concluída. Esses ângulos são geralmente medidos em graus de rotação do virabrequim antes do ponto morto superior (PMS) da fase de compressão.

O ajuste adequado desses ângulos é essencial por várias razões:

- **Eficiência de combustão:** A sincronização precisa dos ângulos de início e término da injeção é crucial para garantir uma mistura ar-combustível bem preparada para a combustão. A injeção deve começar e terminar em momentos que maximizem a eficiência da combustão e minimizem o consumo de combustível.
- **Emissões:** Os ângulos de injeção influenciam as emissões de poluentes. Uma injeção prematura pode aumentar a formação de óxidos de nitrogênio (NOx) devido às altas temperaturas de combustão, enquanto uma injeção tardia pode resultar em emissões elevadas de hidrocarbonetos não queimados (HC) e monóxido de carbono (CO) devido à combustão incompleta.
- **Ruído e vibração:** A combustão em motores diesel é acompanhada por picos de pressão elevados, que podem causar ruído e vibração. Ajustar os ângulos de injeção pode ajudar a controlar a taxa de aumento da pressão e, conseqüentemente, reduzir o ruído e a vibração do motor.
- **Durabilidade do motor:** Injeções inadequadas podem levar a pressões e temperaturas excessivas nas paredes do cilindro, aumentando o desgaste e reduzindo a vida útil do motor. Portanto, a sincronização correta da injeção é crucial para a durabilidade do motor.

Segundo HEYWOOD (2018), o ângulo de início da injeção varia dependendo do design do motor e das condições de operação, geralmente ajustado entre 10 a 25 graus antes do PMS. O ângulo de término da injeção também é ajustado de forma a garantir que o combustível tenha tempo suficiente para se misturar com o ar antes da combustão.

2.1.10.1 Injeção com dois bicos injetores

Em motores diesel modernos, é comum o uso de dois bicos injetores na câmara de combustão para otimizar a mistura ar-combustível e melhorar a eficiência da combustão. Quando dois bicos injetores são utilizados, os ângulos de início e término da injeção para cada bico devem ser cuidadosamente sincronizados para maximizar os benefícios.

Os principais benefícios da injeção com dois bicos injetores incluem:

- **Melhora na mistura ar-combustível:** A utilização de dois bicos injetores permite uma melhor distribuição do combustível dentro da câmara de combustão, resultando em uma mistura mais homogênea.
- **Redução de emissões:** A melhor distribuição do combustível pode levar a uma combustão mais completa, reduzindo as emissões de poluentes como

HC, CO e fuligem (*soot*).

- Controle de temperatura: A injeção dividida ajuda a distribuir o calor de forma mais uniforme dentro do cilindro, reduzindo a formação de pontos quentes e as emissões de NOx.

Nos sistemas de injeção com dois bicos injetores, o controle eletrônico é essencial para sincronizar os ângulos de injeção de ambos os bicos. Isso permite ajustes dinâmicos dos ângulos de início e término da injeção em tempo real, otimizando a combustão sob diferentes condições de operação.

2.1.11 Exemplo de motores diesel modernos: VW EA288

O motor VW EA288 é amplamente utilizado em veículos modernos e é conhecido por sua eficiência e conformidade com normas de emissões rigorosas. Este motor serve como uma excelente referência para estudos de otimização de motores diesel, como o realizado nesta dissertação.

O VW EA288 é um motor diesel de quatro cilindros, com uma cilindrada de 2.0 litros. Ele incorpora diversas tecnologias avançadas para melhorar a eficiência e reduzir as emissões, incluindo: O sistema de recirculação de gases de escape (EGR) reduz as emissões de NOx ao recircular uma parte dos gases de escape de volta para a entrada de ar, diminuindo a temperatura de combustão (VOLKSWAGEN AG, 2013). A injeção direta de combustível utiliza um sistema de injeção de alta pressão para atomizar o combustível, proporcionando uma mistura ar/combustível mais eficiente e uma combustão mais completa (VOLKSWAGEN AG, 2013). Além disso, a turboalimentação aumenta a quantidade de ar que entra no motor, melhorando a eficiência volumétrica e permitindo uma combustão mais completa (VOLKSWAGEN AG, 2013). Por fim, o filtro de partículas diesel (DPF) captura e remove o material particulado dos gases de escape, reduzindo as emissões de fuligem (VOLKSWAGEN AG, 2013).

O motor VW EA288 atende a rigorosas normas de emissões, como as regulamentações Euro 6 na Europa e similares em outras regiões. Estas normas exigem limites estritos para emissões de NOx, CO₂, CO e partículas. Para cumprir esses requisitos, o EA288 utiliza tecnologias como a Redução Catalítica Seletiva (SCR) com injeção de AdBlue (ureia), que reduz as emissões de NOx convertendo-os em nitrogênio e água (VOLKSWAGEN AG, 2013).

O EA288 é utilizado em uma variedade de veículos do grupo Volkswagen, incluindo modelos como o VW Golf, VW Passat, VW Tiguan, Audi A3, Audi A4, Audi A6, Audi Q3, SEAT León, SEAT Ateca, Skoda Octavia, Skoda Superb e Skoda Kodiaq. Sua versatilidade e conformidade com normas de emissões fazem dele uma escolha popular para veículos que necessitam de um equilíbrio entre desempenho e eficiência ambiental (VOLKSWAGEN AG, 2013).

A escolha do motor VW EA288 como referência para este estudo foi baseada em sua representatividade e desempenho comprovado em veículos modernos. Utilizando a curva de potência do EA288 como base, este estudo visa ajustar as variáveis das simulações para obter uma potência semelhante, permitindo uma análise comparativa precisa. Isso proporciona uma base sólida para avaliar o impacto da adição de hidrogênio e da redução do diesel injetado na eficiência e nas emissões do motor (VOLKSWAGEN AG, 2013).

2.2 COMBUSTÍVEIS

Combustível é uma substância que, quando queimada, libera energia na forma de calor e produz gases, como dióxido de carbono, água e outros gases, dependendo do combustível. Os combustíveis são utilizados em diversos setores, como no transporte, na geração de energia elétrica e em processos industriais. Existem vários tipos de combustíveis, sendo os mais comuns:

- Combustíveis fósseis: Derivados de materiais orgânicos que foram fossilizados ao longo de milhões de anos. Exemplos incluem petróleo, carvão e gás natural.
- Biocombustíveis: Produzidos a partir de matérias orgânicas renováveis, como milho, cana-de-açúcar e outras culturas. Exemplos incluem o etanol e o biodiesel.
- Hidrogênio: Um combustível limpo e renovável que pode ser produzido a partir de fontes de energia renovável, como a energia solar e eólica.

A escolha do combustível a ser utilizado depende do uso final, dos custos envolvidos e das considerações ambientais e de segurança. Atualmente, o combustível de petróleo e o hidrogênio são utilizados em setores distintos. O combustível de petróleo é amplamente utilizado em motores de combustão interna, como os motores a diesel e a gasolina, enquanto o hidrogênio é usado principalmente em tecnologias de células de combustível para gerar eletricidade.

No entanto, estão sendo realizadas pesquisas para combinar o uso de hidrogênio e combustível de petróleo em motores a combustão interna, em uma tentativa de reduzir as emissões de poluentes. Isso pode ser feito através da injeção de hidrogênio na mistura ar/combustível dentro da câmara de combustão, o que pode levar a uma combustão mais completa e, portanto, a uma redução nas emissões de poluentes. Porém, essa tecnologia ainda está em fase experimental e apresenta alguns desafios técnicos e econômicos a serem superados antes de se tornar uma solução viável para

reduzir as emissões de poluentes em motores a combustão interna (ZAREEI; ROHANI; NUÑEZ ALVAREZ, 2022; JAMROZIK; GRAB-ROGALIŃSKI; TUTAK, 2020).

2.2.1 Óleo diesel

O óleo diesel é um combustível líquido derivado de petróleo bruto, amplamente utilizado em motores de combustão interna devido à sua alta densidade energética e eficiência. De acordo com a PETROBRAS (2023), o diesel é composto majoritariamente por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 átomos de carbono, podendo conter, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio. É formulado através da mistura de diversas correntes como gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas de processamento do petróleo bruto.

2.2.1.1 Características e propriedades do óleo diesel

1. Poder calorífico: O poder calorífico do óleo diesel é de aproximadamente 43 MJ/kg, contribuindo para sua eficiência energética nos motores de combustão interna (HEYWOOD, 2018).
2. Densidade energética: A densidade energética volumétrica do óleo diesel é cerca de 35.8 MJ/L, comparada a aproximadamente 32 MJ/L da gasolina (HEYWOOD, 2018).
3. Temperatura de ignição: A temperatura de ignição do diesel é cerca de 210 °C, mais baixa que a da gasolina, permitindo uma ignição por compressão eficiente (HEYWOOD, 2018).
4. Viscosidade: O óleo diesel tem uma viscosidade maior que a da gasolina, ajudando na lubrificação das partes móveis do motor e melhorando a eficiência da combustão (PETROBRAS, 2023).

Os óleos diesel, no que tange à adição de biodiesel, classificam-se em:

- Óleo diesel A: Combustível produzido a partir de processos de refino de petróleo e processamento de gás natural, sem adição de biodiesel.
- Óleo diesel B: Obtido a partir da adição de biodiesel ao óleo diesel A, no teor estabelecido pela legislação vigente.

De acordo com o uso, são especificados dois tipos básicos de óleo diesel para uso rodoviário:

- Óleo diesel S10: Produto com um máximo de 10 mg/kg de enxofre total, destinado a veículos homologados segundo os critérios das fases P7 e subsequentes do PROCONVE.
- Óleo diesel S500: Produto com um máximo de 500 mg/kg de enxofre total.

No entanto, o diesel também é conhecido por emitir uma quantidade significativa de poluentes, como óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado (MP) e hidrocarbonetos (HC). Essas emissões podem contribuir para problemas de saúde pública e poluição do ar (HEYWOOD, 2018). Além disso, segundo BRUNETTI (2012), a combustão incompleta do diesel pode gerar quantidades consideráveis de monóxido de carbono (CO), um gás tóxico.

2.2.2 Biodiesel

O biodiesel é um combustível produzido a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais e gorduras animais. Ele pode ser usado puro ou misturado com diesel mineral em diferentes proporções. No Brasil, o biodiesel é adicionado ao diesel mineral na proporção determinada pelo conselho nacional de política energética (CNPE). Segundo a PETROBRAS (2023), o biodiesel comercializado no Brasil é produzido principalmente a partir de óleo de soja.

2.2.2.1 Características e propriedades do biodiesel

1. Poder calorífico: O poder calorífico do biodiesel é ligeiramente inferior ao do óleo diesel, aproximadamente 37-40 MJ/kg, dependendo da matéria-prima utilizada (HEYWOOD, 2018).
2. Densidade energética: A densidade energética volumétrica do biodiesel é cerca de 33 MJ/L, o que é um pouco menor que a do óleo diesel (HEYWOOD, 2018).
3. Temperatura de ignição: A temperatura de ignição do biodiesel é maior que a do óleo diesel, variando entre 250°C e 300°C, proporcionando uma combustão mais segura (HEYWOOD, 2018).
4. Viscosidade: O biodiesel possui uma viscosidade maior que a do óleo diesel, o que pode melhorar a lubrificação, mas também pode causar problemas em motores não adaptados para seu uso (PETROBRAS, 2023).

O uso de biodiesel reduz significativamente as emissões de CO₂, CO e material particulado em comparação com o diesel convencional. No entanto, pode aumentar ligeiramente as emissões de NOx devido à sua composição química e propriedades de combustão (BRUNETTI, 2012).

2.2.3 Hidrogênio

O hidrogênio é uma espécie química comum na natureza, sendo o elemento mais leve e mais abundante no universo. Ele pode ser utilizado como combustível em motores de combustão interna e células de combustível, oferecendo um potencial significativo para a redução de emissões de gases poluentes.

2.2.3.1 Características e propriedades do hidrogênio

1. Poder calorífico: O poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio é de aproximadamente 120 MJ/kg, um dos mais altos entre os combustíveis, proporcionando uma alta densidade energética por massa (HEYWOOD, 2018).
2. Densidade energética: Apesar de seu alto poder calorífico, a densidade energética volumétrica do hidrogênio gasoso a 700 bar é cerca de 5.6 MJ/L, significativamente menor que a do óleo diesel e da gasolina (HEYWOOD, 2018).
3. Temperatura de ignição: A temperatura de ignição do hidrogênio é cerca de 585 °C, o que é mais alto que a da gasolina e do diesel, tornando-o seguro de manusear em certas condições (HEYWOOD, 2018).
4. Velocidade de chama: A velocidade de chama do hidrogênio é aproximadamente 2.65 m/s, muito maior que a da gasolina (0.37 m/s), permitindo uma combustão rápida e eficiente (HEYWOOD, 2018).
5. Calor específico: O calor específico do hidrogênio a 298 K é de aproximadamente 14.304 J/(mol·K), comparado a cerca de 8.314 J/(mol·K) para a gasolina, indicando uma alta capacidade de armazenar e transferir calor (HEYWOOD, 2018).

O hidrogênio oferece vantagens significativas como combustível devido às suas propriedades de combustão limpa e alta eficiência energética. No entanto, enfrenta desafios relacionados ao armazenamento, transporte e custos de produção, especialmente quando comparado a combustíveis fósseis (AMOROSO DA SILVA, 2016).

Apesar desses desafios, o hidrogênio tem o potencial de desempenhar um papel importante na transição para um sistema de energia mais limpo e renovável. Pesquisas e investimentos continuam sendo feitos para melhorar a tecnologia de célula de combustível e a infraestrutura relacionada ao hidrogênio (ZAREEI; ROHANI; NUÑEZ ALVAREZ, 2022; JAMROZIK; GRAB-ROGALIŃSKI; TUTAK, 2020).

2.3 UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL

O hidrogênio tem ganhado destaque como uma alternativa promissora para combustíveis fósseis devido às suas propriedades de combustão limpa e alta eficiência energética. A seguir, são discutidos os benefícios e desafios da adição de hidrogênio como combustível em motores de combustão interna ciclo diesel, assim como estudos anteriores sobre essa aplicação.

2.3.1 Benefícios e desafios da adição de hidrogênio

Como benefício destaca-se que uma das principais vantagens do uso de hidrogênio como combustível é a sua combustão limpa. A reação de combustão do hidrogênio resulta principalmente na produção de água (H_2O), eliminando praticamente as emissões de dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO). Isso contribui significativamente para a redução do efeito estufa e da poluição atmosférica (HEYWOOD, 2018). Estudos indicam que a utilização de hidrogênio pode reduzir as emissões de CO_2 em mais de 50% em comparação com motores diesel convencionais (ZAREEI; ROHANI; NUÑEZ ALVAREZ, 2022).

Além disso, o hidrogênio possui um poder calorífico superior de aproximadamente 120 MJ/kg, muito maior que o do diesel (43 MJ/kg) e do biodiesel (37-40 MJ/kg). Essa característica permite uma combustão mais eficiente e a possibilidade de obter maior potência com menor quantidade de combustível (HEYWOOD, 2018). Estudos como o de Jamrozik, Grab-Rogaliński e Tutak (2020) mostram que a adição de hidrogênio pode aumentar a eficiência térmica dos motores.

Outro benefício significativo é a rápida taxa de queima do hidrogênio. A velocidade de chama do hidrogênio é aproximadamente 2.65 m/s, muito superior à da gasolina (0.37 m/s). Isso possibilita uma combustão mais rápida e completa, melhorando a eficiência do motor e reduzindo as emissões de hidrocarbonetos não queimados (HEYWOOD, 2018).

A adição de hidrogênio também pode reduzir significativamente as emissões de material particulado (MP), que são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (JAMROZIK; GRAB-ROGALIŃSKI; TUTAK, 2020).

Recentemente, a produção de hidrogênio verde, que utiliza fontes renováveis como energia solar e eólica para a eletrólise da água, tem se tornado um tema relevante. Esse método permite a produção de hidrogênio sem emissões de gases de efeito estufa, tornando-o uma opção ainda mais atrativa para a sustentabilidade energética (IRENA, 2020; IEA, 2019).

No entanto, a adoção do hidrogênio como combustível enfrenta vários desafios. Um dos principais é o armazenamento e transporte. O hidrogênio tem uma densidade energética volumétrica muito baixa (5.6 MJ/L a 700 bar) comparada ao diesel

(35.8 MJ/L). Isso apresenta desafios significativos para o armazenamento e transporte, exigindo tanques de alta pressão ou sistemas criogênicos ((MARTINS, 2016).

Outro desafio importante é a produção de NOx. Embora a combustão do hidrogênio não produza CO₂ ou CO, a alta temperatura de combustão pode levar ao aumento das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), que são poluentes nocivos. Métodos adicionais de controle de NOx, como sistemas de recirculação de gases de escape (EGR) e catalisadores de redução catalítica seletiva (SCR), podem ser necessários (HEYWOOD, 2018).

O custo de produção do hidrogênio, especialmente a partir de fontes renováveis, ainda é elevado comparado à produção de combustíveis fósseis. A eletrólise da água e a reforma de gás natural são os métodos mais comuns, mas ambos apresentam desafios econômicos e energéticos (AMOROSO DA SILVA, 2016). No entanto, avanços tecnológicos e investimentos em larga escala podem reduzir esses custos no futuro (IEA,2019).

A infraestrutura para a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio é ainda limitada e subdesenvolvida em muitos lugares, representando uma barreira significativa para a adoção em larga escala (ZAREEI; ROHANI; NUÑEZ ALVAREZ, 2022)).

Sendo assim, a adição de hidrogênio como combustível em motores de combustão interna ciclo diesel apresenta diversos benefícios, incluindo a combustão limpa, alta eficiência energética e a redução de emissões de material particulado. No entanto, desafios como o armazenamento e transporte, a produção de NOx, o custo de produção e a infraestrutura limitada ainda precisam ser superados. Estudos anteriores mostram resultados promissores, mas indicam a necessidade de mais pesquisas para viabilizar a adoção em larga escala dessa tecnologia.

2.3.2 Estudos anteriores sobre hidrogênio em motores diesel

O estudo do uso de hidrogênio como combustível complementar em motores diesel tem atraído crescente interesse devido às suas vantagens em termos de eficiência e redução de emissões. Diversos artigos investigaram diferentes aspectos da combustão de hidrogênio em motores diesel, proporcionando uma compreensão abrangente dos efeitos desse combustível alternativo.

Jamrozik, Grab-Rogaliński e Tutak (2020) conduziram um estudo experimental sobre a adição de hidrogênio em um motor diesel de dupla combustão, onde o hidrogênio foi introduzido no coletor de admissão enquanto o diesel foi injetado diretamente no cilindro. O estudo avaliou os efeitos da co-combustão de hidrogênio e diesel na estabilidade da combustão, desempenho do motor e emissões de gases de escape. Os resultados mostraram que a adição de hidrogênio aumentou a eficiência térmica do motor em até 17% para misturas contendo 14% e 25% de hidrogênio. Além disso,

houve uma redução significativa nas emissões de fuligem (quase 85%), monóxido de carbono (57%) e dióxido de carbono (27%) com até 25% de hidrogênio adicionado. No entanto, um aumento considerável nas emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) foi observado, especialmente com uma proporção de hidrogênio de 30%, resultando em um aumento de mais de 80%. O estudo destacou que a co-combustão de hidrogênio e diesel pode melhorar a eficiência da combustão e reduzir as emissões de alguns poluentes, embora a gestão das emissões de NOx continue sendo um desafio significativo.

Zhou *et al.* (2016) realizaram uma investigação experimental sobre a combustão dual-fuel de diesel e hidrogênio, focando nos impactos sobre emissões gasosas não regulamentadas e emissões de particulados sob diferentes cargas e velocidades do motor. O estudo utilizou um motor diesel naturalmente aspirado com hidrogênio adicionado para substituir 10%, 20% e 30% da energia total do combustível em 10 modos operacionais selecionados a partir do ciclo de teste japonês de 13 modos. Os resultados indicaram um aumento gradual da pressão máxima no cilindro e da taxa de liberação de calor com a adição de hidrogênio em cargas médias e altas do motor. Observou-se que a adição de hidrogênio reduziu significativamente as emissões específicas de acetaldeído, alcenos (como etileno e propileno), arenos (como benzeno e tolueno) e massa de particulados. No entanto, com a operação de substituição de 30% de energia por hidrogênio, houve um aumento nas emissões totais ponderadas de hidrocarbonetos e formaldeído em cerca de 27% e 8%, respectivamente, enquanto as emissões de NOx aumentaram em cerca de 17%. A adição de hidrogênio mostrou um efeito inibidor na formação de partículas de fuligem, atribuído ao mecanismo de abstração de hidrogênio e adição de C₂H₂ (HACA).

Hosseini *et al.* (2023) realizaram uma revisão abrangente sobre o uso de hidrogênio em motores diesel de dupla combustão, destacando as oportunidades e limitações dessa abordagem. O estudo discute como as propriedades físico-químicas únicas do hidrogênio, como seu alto valor calorífico, velocidade de chama elevada e difusividade no ar, podem efetivamente melhorar o desempenho e as características de combustão dos motores diesel. A revisão indica que o hidrogênio pode mitigar emissões prejudiciais, como monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados, material particulado, fuligem e fumaça. No entanto, os motores diesel alimentados por hidrogênio sofrem de combustão por detonação e maiores emissões de óxidos de nitrogênio (NOx). O estudo explora diversas soluções, como a reformulação do combustível piloto com aditivos, mistura de hidrogênio com outros combustíveis gasosos, ajuste de parâmetros do motor, otimização de condições operacionais, modificação da estrutura do motor, uso de gás hidroxila e emprego de catalisadores de gases de escape, para alcançar motores diesel alimentados por hidrogênio que sejam seguros, eficientes e econômicos. A revisão enfatiza que, embora o hidrogênio possa não melhorar todos

os indicadores de desempenho e emissões dos motores diesel simultaneamente, ele oferece um potencial significativo para avanços em eficiência e redução de emissões.

Saravanan *et al.* (2007) conduziram uma investigação experimental sobre a injeção de hidrogênio no coletor de admissão em um motor diesel de injeção direta (DI). O estudo avaliou o desempenho do motor e as emissões ao utilizar hidrogênio como combustível suplementar ao diesel. Os resultados mostraram que a eficiência térmica máxima de 29,4% foi alcançada em carga plena com a duração de injeção de hidrogênio otimizada para 90° de ângulo de manivela (CA). As emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) foram reduzidas para 705 ppm em condições de carga plena com a duração de injeção otimizada e o tempo de injeção ajustado para o ponto morto superior (TDC). As emissões de fumaça foram reduzidas em três vezes para o motor operado com hidrogênio nas condições otimizadas. A investigação concluiu que a injeção de hidrogênio no coletor de admissão aumentou a eficiência térmica do motor e reduziu significativamente as emissões de poluentes, embora seja necessário um controle cuidadoso das emissões de NOx.

BAYRAMOGLU e YILMAZ (2020) realizaram uma investigação numérica sobre diferentes estratégias de injeção de hidrogênio em motores diesel, focando nos efeitos sobre a performance e as emissões do motor. Utilizando o código comercial de CFD ANSYS Forte, o estudo avaliou a injeção de hidrogênio em várias proporções (0%, 5%, 10% e 15%) e tempos de injeção (20°, 15° e 10° CA BTDC). Os resultados mostraram que a máxima pressão, temperatura e taxa de liberação de calor foram observadas com a proporção de 15% de hidrogênio e tempo de injeção de 20° CA BTDC. A adição de hidrogênio melhorou significativamente a potência do motor, a eficiência térmica e a pressão média efetiva indicada (IMEP). No entanto, houve um aumento nas emissões de NOx com o aumento da proporção de hidrogênio e o tempo de injeção antecipado. O estudo concluiu que a determinação precisa do tempo de injeção e da quantidade ótima de hidrogênio é crucial para otimizar o desempenho do motor e reduzir as emissões.

Özer e Vural (2024) realizaram um estudo experimental para avaliar o efeito da adição de H₂, H₂+HHO e H₂+HHO+O₂ no coletor de admissão sobre as emissões de escape de um gerador diesel utilizando diesel, tolueno e éter dietílico como combustível piloto. O estudo investigou a mudança no tempo de atraso da ignição e as melhorias nas emissões de CO, CO₂, HC, fumaça e NOx. A adição de tolueno e éter dietílico ao diesel, juntamente com gases ricos em hidrogênio e oxigênio, mostrou uma redução significativa em todas as emissões de escape. O melhor desempenho em termos de emissões foi alcançado com a mistura de H₂+HHO+O₂, que aumentou a eficiência da combustão e reduziu as emissões de forma mais eficaz.

Koten (2018) realizou uma pesquisa experimental para avaliar os efeitos da adição de hidrogênio no desempenho e nas emissões de um motor diesel. O hidrogênio foi adicionado através do coletor de admissão em diferentes quantidades (0.20, 0.40,

0.60 e 0.80 lpm) em várias cargas do motor (20%, 40%, 60%, 80% e 100%) a uma velocidade constante de 1800 rpm. Os resultados mostraram que o aumento da quantidade de hidrogênio resultou em uma melhoria na eficiência térmica do freio (BTE) e uma redução no consumo específico de combustível (BSFC). No entanto, as emissões de NOx aumentaram significativamente com a adição de 0.80 lpm de hidrogênio em cargas mais altas. As emissões de CO, hidrocarbonetos não queimados (HC) e fuligem diminuíram significativamente com a adição de hidrogênio em todas as cargas. O estudo concluiu que a adição de hidrogênio pode melhorar a eficiência da combustão e reduzir algumas emissões de poluentes, embora o controle das emissões de NOx permaneça um desafio.

Esses estudos fornecem uma base sólida para a compreensão dos efeitos da adição de hidrogênio em motores diesel, destacando tanto os benefícios quanto os desafios dessa abordagem. A integração desses achados com os resultados das simulações numéricas realizadas no presente estudo permite uma análise mais robusta e abrangente do potencial do hidrogênio como combustível complementar em motores diesel.

2.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

A simulação numérica tem se tornado uma ferramenta essencial no desenvolvimento e otimização de motores de combustão interna. Ela permite que engenheiros analisem detalhadamente os processos de combustão, emissão de poluentes e eficiência energética sob diversas condições operacionais sem a necessidade de realizar testes experimentais extensivos e custosos (HEYWOOD, 2018). As simulações podem ser realizadas usando dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e dinâmica de fluidos computacional com reação química (CRFD), cada uma com suas características e aplicações específicas.

2.4.1 Métodos e ferramentas

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e a dinâmica de fluidos computacional com reação química (CRFD) são técnicas avançadas usadas para modelar o comportamento dos fluidos e as reações químicas dentro dos motores de combustão interna. Enquanto a CFD se concentra principalmente no movimento dos fluidos, a CRFD inclui também a modelagem de reações químicas complexas, como a combustão. Ambas são essenciais para realizar simulações precisas e detalhadas, proporcionando uma compreensão abrangente dos processos e permitindo otimizações significativas dos motores (HEYWOOD, 2018; AVL, 2023a).

2.4.1.1 Tipos de simulação

A simulação em 0D, também conhecida como modelagem de volume médio, é uma abordagem simplificada que considera o motor como um sistema termodinâmico único. Nessa simulação, as características do fluxo de ar, combustível e exaustão são modeladas com base em equações médias e relações empíricas. Essa abordagem é útil para análises preliminares de desempenho, como estimativa de potência, consumo de combustível e emissões gerais.

Por outro lado, a simulação em 3D envolve a modelagem detalhada dos componentes do motor, incluindo geometria complexa, fluxo de fluido, mistura ar-combustível, combustão e interações térmicas. Essa abordagem leva em consideração os fenômenos físicos reais que ocorrem dentro do motor e permite uma análise mais precisa e detalhada. As simulações em 3D são especialmente úteis para otimizar o desempenho de motores, reduzir emissões e melhorar a eficiência.

2.4.1.2 Modelos usados em CRFD

Na simulação de motores de combustão interna, os modelos usados em CRFD são fundamentais para representar os diversos aspectos dos fluxos de fluidos e das reações químicas envolvidas. Esses modelos são desenvolvidos para capturar a complexidade dos processos de combustão, desde a mistura de ar e combustível até a formação de poluentes. Eles incluem equações detalhadas que descrevem a termodinâmica, a cinética química e a dinâmica dos fluidos, permitindo uma análise precisa e detalhada do desempenho e das emissões dos motores. Exemplos desses modelos incluem modelos de combustão, modelos de turbulência e modelos de spray. A escolha e a implementação correta desses modelos são cruciais para obter resultados confiáveis nas simulações.

2.4.1.2.1 Modelos de combustão

Na simulação de motores de combustão interna, os modelos de combustão são essenciais para descrever os processos de queima de combustível e a formação de poluentes. Esses modelos capturam a complexidade das reações químicas e a dinâmica dos fluidos durante a combustão, permitindo uma análise precisa e detalhada do desempenho dos motores. Abaixo estão alguns dos principais modelos de combustão usados em CRFD, incluindo exemplos específicos utilizados pelo software AVL FIRE™ M.

1 -Modelos de combustão em regime permanente

Os modelos de combustão em regime permanente assumem que a combustão

ocorre em um estado estacionário, sem variações significativas ao longo do tempo. Esse tipo de modelo é adequado para simular motores a diesel, onde a combustão ocorre de forma contínua e previsível. Eles são úteis para análises preliminares e para entender o comportamento geral da combustão sob condições estáveis.

Exemplo: Modelo de Ignition Delay (ID). Os modelos de Ignition Delay são utilizados para prever o atraso de ignição em motores a diesel. Eles consideram fatores como temperatura, pressão e composição da mistura para determinar o tempo necessário para a ignição do combustível. Esses modelos são críticos para otimizar a injeção de combustível e melhorar a eficiência da combustão (HEYWOOD, 2018).

2 - Modelos de combustão em regime transiente

Ao contrário dos modelos de regime permanente, os modelos de combustão em regime transiente levam em consideração as variações temporais nas condições do motor. Essas variações podem incluir mudanças na taxa de injeção de combustível, no perfil de temperatura e na mistura ar-combustível. Esses modelos são especialmente úteis para simular motores de ciclo Otto (motores a gasolina) e motores a jato, onde as condições de combustão podem mudar rapidamente.

3 - Modelos de combustão com química detalhada

Os modelos de combustão química detalhada incluem a cinética química completa das reações de combustão. Eles consideram as reações intermediárias e a formação de espécies químicas, proporcionando uma descrição mais precisa dos processos de queima. Esses modelos são particularmente importantes para simulações que exigem alta precisão na previsão das emissões de poluentes e na eficiência da combustão.

Exemplo: Modelos de combustão particionada (PCM). Os modelos de combustão particionada dividem a câmara de combustão em regiões distintas para descrever a evolução da chama e a formação de poluentes de maneira mais detalhada. Esses modelos são úteis para entender a distribuição espacial da combustão e a formação de NOx e material particulado (HEYWOOD, 2018).

4 - Modelos de lei de mistura

Nos modelos de lei de mistura, a mistura de combustível e ar é tratada como um único fluido, e a taxa de combustão é determinada pela função de densidade de reação. Esse tipo de modelo é adequado para simular a combustão em motores com mistura pobre ou estratificada, onde a distribuição da mistura pode variar significativamente

dentro da câmara de combustão.

5 - Modelos de combustão turbulenta

Os modelos de combustão turbulenta levam em consideração a interação entre a turbulência do fluxo e os processos de combustão. Eles utilizam modelos de turbulência, como o modelo $k-\varepsilon$, para descrever a mistura turbulenta de ar e combustível e a propagação da chama. Esses modelos são essenciais para simular motores onde a turbulência desempenha um papel significativo na eficiência da combustão e na formação de poluentes.

Exemplo: *Extended Coherent Flame Model - 3 Zones* (ECFM-3Z). O ECFM-3Z é um modelo de combustão avançado projetado para descrever a combustão em motores de combustão interna, tanto em condições pré-misturadas quanto não pré-misturadas. Este modelo é baseado no conceito de superfície de chama laminar e é especialmente adequado para simulações de motores a diesel, onde a combustão ocorre em condições heterogêneas e turbulentas. O modelo utiliza uma descrição de três zonas de mistura e está acoplado a uma descrição aprimorada da química dos gases queimados. Um modelo esquemático das zonas do modelos ECFM-3Z pode ser observado na Figura 5.

Princípios de funcionamento: A combustão turbulenta pré-misturada é especificada usando propriedades como escala de tempo químico, escala de comprimento integral e intensidade de turbulência. O ECFM assume que, em muitos dispositivos de combustão (como motores de combustão interna reciprocantes), as escalas de tempo químico são muito menores em comparação com as escalas turbulentas. Este modelo é atraente porque considera um tratamento desacoplado da química e da turbulência.

Modelagem da superfície de chama: Todos os modelos de flamelet (chama) assumem que a reação ocorre em camadas relativamente finas, que separam o gás não queimado do gás totalmente queimado. Usando essa suposição, a taxa média de reação turbulenta é calculada como o produto da densidade da superfície de chama (Σ) e da velocidade de queima laminar (S_L) via equação (8):

$$\overline{\rho \dot{r}_{fu}} = -\omega_L \Sigma \quad (8)$$

com ω_L como a taxa média de consumo de combustível laminar por unidade de superfície ao longo da frente de chama.

$$\omega_L = \rho_{fu,fr} S_L \quad \text{com} \quad \rho_{fu,fr} = \rho_{fr} Y_{fu,fr} \quad (9)$$

Nesta equação, $\rho_{fu,fr}$ é a densidade parcial do combustível no gás fresco, ρ_{fr} a

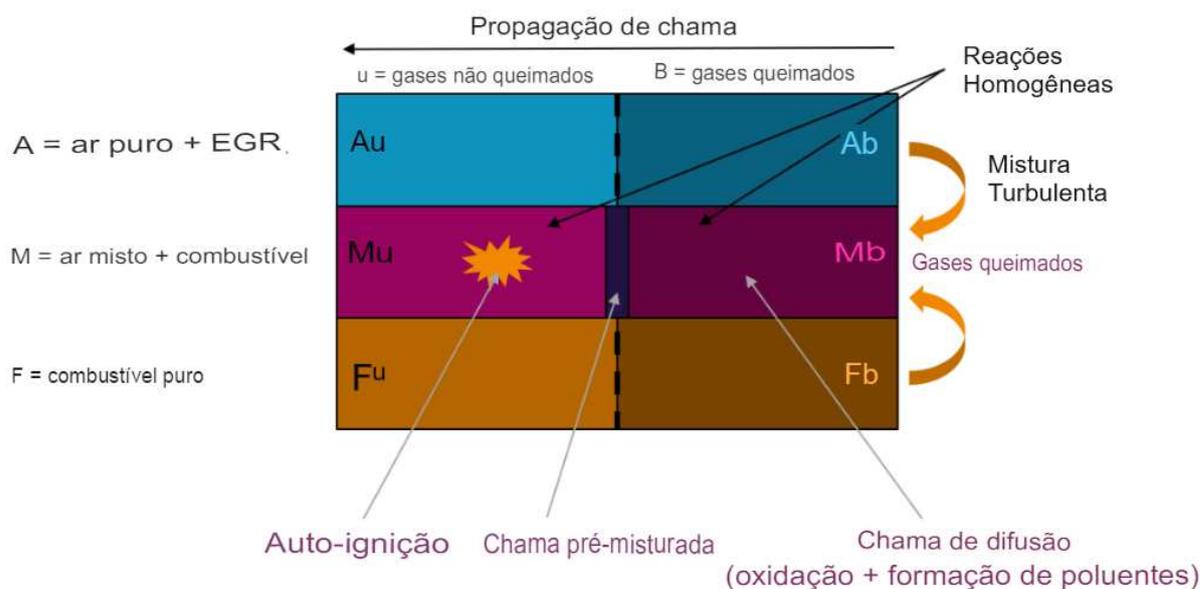
densidade do gás fresco e $y_{fu,fr}$ é a fração mássica do combustível no gás fresco.

Quando a combustão começa, vários novos termos precisam ser computados. Entre eles estão os termos fonte e duas quantidades para usar na equação (8): Σ e S_L .

O modelo ECFM-3Z divide a combustão em três zonas distintas, permitindo uma descrição detalhada dos processos de mistura e combustão. Este modelo inclui uma equação de transporte para a densidade da superfície de chama e um modelo de mistura que descreve a combustão turbulenta pré-misturada e difusa.

Originalmente, o modelo ECFM-3Z foi desenvolvido para casos de auto-ignição, embora o código estivesse preparado para lidar com ambos os procedimentos de ignição: auto-ignição e ignição por faísca. A implementação atual permite que a combustão pré-misturada também seja tratada pelo modelo ECFM-3Z, usando todas as características atraentes, como o tratamento geral de espécies ou o mecanismo de reação de oxidação separada de CO/CO₂. Dessa maneira, todas as aplicações de motor padrão podem ser calculadas pelo mesmo modelo de combustão.

Figura 5 – Zonas no modelo ECFM-3Z



Fonte: (AVL, 2024)

O ECFM-3Z, conforme fornecido, está totalmente acoplado a uma descrição multicomponente do spray de combustível em evaporação e inclui um modelo de mistura que contabiliza a intermistura de combustível e oxidante. Este modelo é crítico para simulações detalhadas e precisas de motores de combustão interna, permitindo

a otimização do desempenho e a redução de emissões. (AVL, 2024).

6 - TABKIN

O TABKIN é um módulo de combustão utilizado em software de dinâmica de fluidos computacional (CFD), como o AVL FIRE™ M. Esse módulo pré-calcula a química da combustão e armazena os resultados em tabelas de referência (*look-up tables*). Durante a simulação, essas tabelas são acessadas para fornecer dados sobre as reações químicas, eliminando a necessidade de cálculos em tempo real e melhorando a eficiência computacional. Isso é particularmente útil para simulações envolvendo combustíveis duplos, como diesel e hidrogênio (TAP F.; SCHAPOTSCHNIKOW, 2012).

O método TABKIN utiliza um modelo de fração de mistura/variável de progresso com funções de densidade de probabilidade presumidas para modelar as interações entre turbulência e química. Essa abordagem permite capturar com precisão fenômenos físicos complexos, como a ignição automática, o desenvolvimento e a estabilização da chama em motores de combustão interna. Em estudos de casos com n-heptano como combustível modelo, foi demonstrado que o TABKIN consegue representar de forma precisa a física básica de uma chama de spray de diesel levantada (TAP F.; SCHAPOTSCHNIKOW, 2012).

Além disso, o TABKIN facilita a integração de modelos de combustão avançados no processo de CFD de maneira robusta. Isso torna possível que mesmo usuários não especialistas possam utilizar esses modelos em ambientes industriais com múltiplos usuários e locais. A geração de tabelas de química detalhadas simplifica o ciclo de trabalho e aumenta a acessibilidade dos modelos avançados de combustão (AVL, 2023b).

Os principais benefícios do uso do TABKIN incluem a eficiência computacional, precisão e simplicidade de uso. Ao utilizar tabelas predefinidas, o TABKIN reduz significativamente o tempo de computação necessário para simulações de combustão, permitindo a inclusão de química detalhada de forma eficiente. As tabelas geradas permitem a modelagem precisa dos processos de combustão, proporcionando resultados que correspondem de perto aos dados experimentais. Além disso, a facilidade de uso torna o TABKIN acessível para uma ampla gama de usuários, simplificando o processo de simulação (TAP F.; SCHAPOTSCHNIKOW, 2012; AVL, 2023b).

2.4.1.2.2 Escoamento turbulento: modelagem

Na simulação numérica de motores de combustão interna, os modelos de turbulência são essenciais para descrever o comportamento dos fluxos turbulentos. Esses modelos ajudam a capturar os efeitos da turbulência na mistura de ar e combustível,

na propagação da chama e na formação de poluentes.

1 - RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*)

Esta metodologia utiliza médias temporais para representar o comportamento médio do fluxo e resolve as equações médias de Navier-Stokes. Ele assume que a turbulência é estacionária, o que simplifica a solução computacionalmente, mas não captura totalmente a interação entre a turbulência e o fluxo (HEYWOOD, 2018).

A metodologia RANS possui alguns modelos de turbulência como:

- k-epsilon: Baseia-se na resolução das equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação (ϵ). É simples e robusto (HEYWOOD, 2018). As equações são:

Equação (10) de transporte para k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - \rho \epsilon \quad (10)$$

Equação (11) de transporte para ϵ :

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

- RNG k-epsilon: Uma variante do modelo *k-epsilon* padrão que inclui correções adicionais para melhor prever escoamentos com alta curvatura e efeitos de baixa Reynolds (HEYWOOD, 2018).
- k-omega: Utiliza a energia cinética turbulenta (k) e a frequência específica da dissipação turbulenta (ω), adequado para escoamentos próximos à parede (HEYWOOD, 2018). As equações são:

Equação (12) de transporte para k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - Y_k \quad (12)$$

Equação (13) de transporte para ω :

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha \frac{\omega}{k} G_k - \beta \rho \omega^2 \quad (13)$$

- SST (*Shear Stress Transport*): Combina os modelos *k-epsilon* e *k-omega*, utilizando o *k-omega* na região próxima à parede e o *k-epsilon* na região distante da parede (HEYWOOD, 2018).
- k-zeta-f: Utilizado para descrever a turbulência em regiões próximas à parede, capturando os efeitos das interações entre o fluxo turbulento e as superfícies sólidas (AVL, 2023a).

2 - LES (*Large Eddy Simulation*)

A metodologia LES resolve as equações de Navier-Stokes para as grandes escalas do turbilhão, enquanto as escalas menores são modeladas. Captura detalhes mais finos da turbulência e é adequado para simulações de fluxos turbulentos transientes (HEYWOOD, 2018). O AVL FIRE™ M oferece suporte para o modelo LES, ideal para capturar os detalhes das grandes estruturas turbulentas em fluxos transientes (AVL, 2023a).

As equações do LES são derivadas das equações de Navier-Stokes, filtrando as pequenas escalas de turbulência. A equação (14) básica é:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (14)$$

onde \bar{u}_i são as velocidades filtradas e $\overline{u'_i u'_j}$ é o tensor de tensões de Reynolds, que precisa ser modelado.

3 - DES (*Detached Eddy Simulation*)

A metodologia DES combina elementos do RANS e do LES. Utiliza o RANS nas regiões onde a camada limite é aderente à superfície e o LES nas regiões "desprendidas", onde ocorrem turbilhões maiores. Este modelo é útil para simular fluxos em geometrias complexas, equilibrando precisão e custo computacional (HEYWOOD, 2018). O DES é implementado no AVL FIRE™ M para simulações que requerem a

captura das grandes estruturas turbulentas sem o alto custo computacional do LES completo (AVL, 2023a).

4 - PANS (*Partially-Averaged Navier-Stokes*)

A metodologia PANS é uma abordagem que combina elementos do RANS e do LES, permitindo um controle contínuo do nível de turbulência resolvido. Utiliza um filtro para separar as escalas de turbulência resolvida e não resolvida (HEYWOOD, 2018).

5 - DNS (*Direct Numerical Simulation*)

A simulação numérica direta (DNS) resolve todas as escalas espaciais e temporais do fluxo diretamente, sem a necessidade de modelos de turbulência. É computacionalmente muito exigente e geralmente usado apenas para casos de pesquisa ou em problemas de turbulência de baixa complexidade (HEYWOOD, 2018).

2.4.1.2.3 Modelos de spray

Existem vários modelos de spray utilizados na simulação de pulverização de líquidos em aplicações como motores de combustão interna, sistemas de injeção, aerossóis, entre outros. Aqui estão alguns dos principais modelos de spray:

1 - Modelo de gota discreta

Nesse modelo, as gotas de líquido são representadas como partículas individuais que são rastreadas ao longo do tempo. Cada partícula possui propriedades como tamanho, velocidade e taxa de evaporação, e interage com o fluxo de gás e outras partículas. Esse modelo é computacionalmente intensivo, mas oferece uma representação detalhada do spray (HEYWOOD, 2018).

2 - Modelo de equações de transporte

Esse modelo utiliza equações de transporte para descrever as propriedades médias do spray, como a densidade, velocidade e fração de massa do líquido. As equações de transporte consideram a evaporação, a dispersão e outras interações entre as fases líquida e gasosa. Esse modelo é menos computacionalmente exigente do que o modelo de gota discreta, mas ainda oferece informações sobre a distribuição do líquido (AVL, 2023a).

Equação (15) de transporte:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varphi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi \quad (15)$$

onde ρ é a densidade do fluido, φ representa a propriedade escalar (como fração de massa, velocidade, etc.), u_j é a velocidade do fluido, Γ_φ é o coeficiente de difusão, e S_φ é o termo fonte.

3 - Modelo Lagrange-Euleriano

Esse modelo combina elementos do modelo de gota discreta e do modelo de equações de transporte. As gotas são representadas como partículas rastreadas individualmente, mas suas propriedades médias são calculadas usando equações de transporte. Esse modelo é uma alternativa computacionalmente mais eficiente ao modelo de gota discreta, mantendo um nível razoável de detalhe (HEYWOOD, 2018).

4 - Modelo de quebra e evaporação

Esse modelo considera a quebra das gotas de líquido em tamanhos menores e a evaporação subsequente. Ele leva em conta os mecanismos de quebra, como a colisão entre as gotas e a ação das forças aerodinâmicas. Esse modelo é útil para simular a formação de gotículas menores e a evolução do spray ao longo do tempo (AVL, 2023a).

Equação (16) de *breakup*:

$$\frac{dD}{dt} = -B_0 \left(\frac{\rho_a U^2}{\sigma} \right)^{0.5} D^{1.5} \quad (16)$$

onde D é o diâmetro da gota, B_0 é uma constante do modelo, ρ_a é a densidade do ar, U é a velocidade relativa entre o combustível e o ar, e σ é a tensão superficial do combustível.

Equação (17) de evaporação:

$$\dot{m} = -k \cdot A \cdot (Y_{f,s} - Y_{f,\infty}) \quad (17)$$

onde \dot{m} é a taxa de evaporação da gota, k é o coeficiente de transferência de massa, A é a área superficial da gota, $Y_{f,s}$ é a fração de massa de vapor de combustível

na superfície da gota, e $Y_{f,\infty}$ é a fração de massa de vapor de combustível no fluxo de ar circundante.

5 - Modelo de múltiplos momentos

Esse modelo utiliza uma série de momentos para representar a distribuição do tamanho das gotas de líquido. Cada momento corresponde a uma estatística específica, como a média, o desvio padrão e a assimetria da distribuição. Esse modelo oferece um equilíbrio entre complexidade e eficiência computacional (HEYWOOD, 2018).

6 - Modelo de atomização

A atomização é o processo pelo qual o combustível líquido é quebrado em pequenas gotas durante a injeção. Este processo é crucial para garantir uma boa mistura de combustível e ar, o que influencia diretamente a eficiência da combustão e as emissões de poluentes.

Equação (18) de atomização:

$$\dot{m} = \frac{\Delta P \cdot A}{\sqrt{2\pi\rho_f}} \quad (18)$$

onde \dot{m} é a taxa de atomização do combustível, ΔP é a diferença de pressão através do injetor, A é a área do orifício do injetor, e ρ_f é a densidade do combustível.

A escolha do modelo de spray depende das características do processo de pulverização, da quantidade de detalhes desejada e da disponibilidade de recursos computacionais. É comum utilizar uma combinação de modelos para diferentes aspectos do spray, como a formação das gotas, a evaporação e a dispersão.

7 - Modelo de Schiller-Naumann

O modelo de Schiller-Naumann é amplamente utilizado para prever o coeficiente de arrasto (C_d) de partículas esféricas em escoamentos. Este modelo é aplicável para o número de Reynolds (Re_p) da partícula variando até 1000. A expressão empírica

que define o coeficiente de arrasto é dada pela Equação (19):

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \left(1 + 0.15 Re_p^{0.687} \right), \quad \text{para } Re_p \leq 1000 \quad (19)$$

Onde: C_d é o coeficiente de arrasto, Re_p é o número de Reynolds da partícula.

O número de Reynolds para partículas pode ser definido pela Equação (20)

$$Re_p = \frac{\rho d_p u}{\mu} \quad (20)$$

Onde: ρ é a densidade do fluido, d_p é o diâmetro da partícula, u é a velocidade relativa entre a partícula e o fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Este modelo é utilizado para simulações em dinâmica de fluidos computacional (CFD), especialmente em problemas que envolvem transferência de massa e calor com partículas suspensas em escoamentos turbulentos. Segundo HEYWOOD (2018), o modelo de Schiller-Naumann é frequentemente utilizado em simulações de combustão e escoamentos multifásicos.

Nos motores de combustão interna, o comportamento de partículas, como fuligem ou gotículas de combustível, pode ser modelado utilizando o coeficiente de arrasto estimado pelo modelo de Schiller-Naumann. Isso é particularmente importante em simulações de injeção de combustível e combustão, onde a interação entre as partículas e o escoamento de ar afeta a eficiência do motor e as emissões de poluentes.

8 - Modelo de Dukowicz

O modelo de Dukowicz é amplamente utilizado em simulações multifásicas, particularmente em cavitação e fenômenos de transferência de calor envolvendo líquidos e vapores. Este modelo semi-implícito utiliza uma abordagem de volume fracionário para descrever o comportamento de misturas de fases. A formulação proposta por Dukowicz permite lidar com a conservação de massa e energia de forma eficiente, mesmo em situações com mudanças de fase.

A Equação (21) geral de conservação de massa no modelo de Dukowicz pode

ser descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \mathbf{u}_g) = \dot{m}_{g \rightarrow l} - \dot{m}_{l \rightarrow g}, \quad (21)$$

onde: α_g é a fração de volume do vapor, \mathbf{u}_g é a velocidade da fase gasosa, $\dot{m}_{g \rightarrow l}$ e $\dot{m}_{l \rightarrow g}$ são as taxas de troca de massa entre as fases gasosa e líquida.

A Equação (22) de conservação de energia para a fase líquida é:

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l h_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{u}_l h_l) = -\dot{q} + \dot{m}_{g \rightarrow l} \Delta h_{gl}, \quad (22)$$

onde: α_l é a fração de volume da fase líquida, ρ_l é a densidade da fase líquida, h_l é a entalpia da fase líquida, \dot{q} é a taxa de transferência de calor, Δh_{gl} é a entalpia de vaporização.

O modelo de Dukowicz é particularmente útil para a simulação de cavitação, onde a transição entre as fases líquida e vapor ocorre rapidamente em condições de baixa pressão. A cavitação é modelada através da variação da fração de volume α_g e da taxa de mudança de fase.

A taxa de mudança de fase pode ser expressa pela Equação (23):

$$\dot{m}_{g \rightarrow l} = C (P_{sat} - P) H(P_{sat} - P), \quad (23)$$

onde: C é uma constante de proporcionalidade, P_{sat} é a pressão de saturação do líquido, P é a pressão local, H é a função Heaviside que garante que a mudança de fase só ocorra quando $P_{sat} > P$.

O modelo de Dukowicz proporciona uma forma eficiente de simular fenômenos multifásicos em que a transferência de massa e energia entre fases desempenha um papel crucial. Ele é amplamente utilizado em simulações de cavitação e transferência de calor em várias indústrias.

2.4.1.3 Geração de malha

A geração de malha é um passo crucial na simulação numérica de motores de combustão interna e outros processos de engenharia. Uma malha bem construída

garante que os fenômenos físicos sejam capturados com precisão e que os resultados da simulação sejam confiáveis.

Existem várias abordagens para geração de malha, sendo que destacamos algumas utilizadas pelo software AVL FIRE™ M, que é um software amplamente utilizado para simulações de motores de combustão interna e também será utilizado neste estudo.

2.4.1.3.1 Tipos de malha

Os tipos de malha utilizados em simulações numéricas incluem a malha estruturada, a malha não estruturada, a malha híbrida e a malha adaptativa. A malha estruturada é formada por elementos regulares, como quadriláteros ou hexaedros, que seguem um padrão regular. Ela oferece melhor resolução e controle da qualidade da malha em regiões de interesse, mas pode ser mais trabalhosa de ser gerada em geometrias complexas (AVL, 2023a). A malha não estruturada, por outro lado, é mais flexível e é composta por elementos irregulares, como triângulos ou tetraedros, que podem se adaptar à geometria de forma mais livre, sendo mais adequada para geometrias complexas; no entanto, pode ser menos precisa em certas regiões (HEYWOOD, 2018). A malha híbrida combina elementos estruturados e não estruturados em uma única malha, aproveitando as vantagens de ambos os tipos, utilizando elementos estruturados em regiões de geometria regular e elementos não estruturados em regiões mais complexas, proporcionando uma solução eficiente e precisa para simulações em motores de combustão interna (AVL, 2023a). A malha adaptativa refina ou coarsens a malha localmente em regiões de interesse, com base em critérios específicos, permitindo melhor resolução em áreas com gradientes significativos ou fenômenos de interesse, enquanto áreas menos críticas podem ter uma malha mais grossa, otimizando o equilíbrio entre precisão e eficiência computacional (HEYWOOD, 2018). Cada abordagem de geração de malha tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha da abordagem mais adequada depende da geometria do problema, da precisão desejada, dos recursos computacionais disponíveis e dos objetivos da simulação.

2.4.1.3.2 Qualidade da malha

A qualidade da malha é fundamental para obter resultados precisos e estáveis. Alguns critérios importantes para avaliar a qualidade da malha incluem:

- *Aspect ratio*: A razão entre o comprimento e a largura das células deve ser próxima de 1 para evitar distorções.
- *Orthogonality*: As células devem ser o mais ortogonais possível para minimizar erros numéricos.

- *Skewness*: Medida de quanto uma célula está distorcida em relação a uma célula ideal. Células com baixa skewness são preferíveis.

2.4.1.3.3 Refinamento de malha

O refinamento de malha é utilizado para aumentar a resolução em regiões de interesse, como áreas com gradientes elevados de propriedades físicas (ex. velocidade, temperatura, concentração de espécies). Existem diferentes técnicas de refinamento, incluindo:

- Refinamento local: Refinamento de células em regiões específicas da malha.
- Refinamento global: Refinamento uniforme de todas as células da malha.
- Adaptativo: A malha é refinada automaticamente durante a simulação com base em critérios predefinidos, como o erro numérico estimado.

2.4.1.3.4 Equações e métodos de interpolação

Para garantir a precisão na simulação, é importante usar métodos de interpolação adequados que considerem a qualidade da malha. Aqui estão algumas das equações e métodos usados na interpolação de variáveis na malha:

Equação (24) interpolação linear:

$$\varphi_P = \frac{1}{V_P} \sum_{f \in \text{faces}} \varphi_f A_f \quad (24)$$

onde φ_P é a variável no centro da célula, V_P é o volume da célula, φ_f é a variável na face da célula, e A_f é a área da face da célula.

Equação (25) método de volumes finitos (FVM):

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\varphi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\varphi) + S_\varphi \quad (25)$$

onde φ é a variável transportada, ρ é a densidade, \mathbf{u} é a velocidade do fluido, Γ é o coeficiente de difusão, e S_φ é o termo fonte.

2.4.2 Software AVL FIRE™ M

O software AVL FIRE™ M é uma ferramenta avançada de simulação utilizada para a análise de motores de combustão interna e outras aplicações de dinâmica de

fluidos computacional (CFD). Reconhecido por suas capacidades robustas de modelagem e simulação, o AVL FIRE™ M é essencial para prever o comportamento de processos de combustão, transferência de calor e fluxo de fluidos em ambientes complexos. A seguir, são apresentadas as principais funcionalidades e características do software, conforme descrito no manual do usuário de 2023.

O AVL FIRE™ M oferece diversas funcionalidades que tornam possível a realização de simulações detalhadas e precisas. O software oferece uma variedade de modelos para simular a queima de diferentes tipos de combustíveis em motores de combustão interna. Estes modelos incluem tanto a combustão homogênea quanto a heterogênea. Entre os modelos de combustão disponíveis, destacam-se o ECFM-3Z (*Extended coherent flame model - 3 zones*), que é utilizado para descrever a combustão em motores de combustão interna considerando zonas distintas de mistura e combustão, e o PDF (*Probability density function*), utilizado para modelar a combustão turbulenta através da distribuição de probabilidade das variáveis de mistura (AVL, 2023a).

A modelagem precisa do processo de injeção de combustível e atomização do spray é crucial para prever o desempenho do motor. O AVL FIRE™ M inclui modelos como o Modelo de Gota Discreta, que representa as gotas de combustível como partículas individuais rastreadas ao longo do tempo, e o Modelo KH-RT (Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor), que descreve a quebra das gotas de combustível devido a instabilidades aerodinâmicas (AVL, 2023a).

O software permite a simulação detalhada da transferência de calor entre fluidos e superfícies sólidas, essencial para a análise térmica de motores. Utiliza métodos como o método dos volumes finitos (FVM) para resolver as equações de conservação de massa, momento e energia (HEYWOOD, 2018). Além disso, o AVL FIRE™ M oferece ferramentas avançadas para a geração de malha, suportando tanto malhas estruturadas quanto não estruturadas. As principais ferramentas incluem a malhagem automática, que permite a geração automática de malha com base em parâmetros definidos pelo usuário, e o refinamento adaptativo, que ajusta automaticamente a malha durante a simulação para capturar fenômenos físicos com maior precisão (AVL, 2023a).

O software também integra diferentes fenômenos físicos em uma única simulação, permitindo análises multifísicas detalhadas. Exemplos incluem a interação fluido-estrutura (FSI), que permite a simulação acoplada do comportamento de fluidos e estruturas mecânicas, e a eletroquímica, que modela processos eletroquímicos como a formação de depósitos de carbono (AVL, 2023a).

O AVL FIRE™ M oferece ferramentas robustas para a visualização e análise dos resultados de simulação, permitindo a identificação e diagnóstico de problemas potenciais. As funcionalidades incluem a plotagem de contornos e vetores, que propor-

ciona a visualização gráfica das variáveis simuladas, e a análise temporal, que permite a avaliação da evolução das variáveis ao longo do tempo (AVL, 2023a).

O software AVL FIRE™ M é amplamente utilizado em diversas aplicações industriais e de pesquisa, incluindo o desenvolvimento de motores de combustão interna, a análise térmica de componentes do motor e sistemas de arrefecimento, a simulação de fluxo de fluidos, como a análise de aerodinâmica interna e externa em sistemas de admissão e escape, e o desenvolvimento de novos combustíveis, avaliando o desempenho de combustíveis alternativos e misturas combustíveis (AVL, 2023a).

Além disso, o software AVL FIRE™ M possui recursos exclusivos que abrangem todas as etapas do processo de simulação, incluindo pré-processamento, resolução e pós-processamento. Esses recursos permitem uma análise detalhada e precisa dos fenômenos físicos envolvidos. O software pode manipular qualquer malha computacional, desde células hexaédricas até poliédricas, incluindo malhas com interfaces arbitrárias. Essa flexibilidade é essencial para resolver aplicações com alta complexidade geométrica. O software combina a tecnologia básica de volume finito para malhas poliédricas com o método immersed boundary (imerso vinculado), permitindo a resolução de movimentos de corpo e malha. Esta abordagem única é conhecida como *embedded body method* (Método de Corpo Incorporado).

As características e capacidades do AVL FIRE™ M tornam-no uma escolha ideal para este estudo, proporcionando a precisão e a robustez necessárias para a modelagem e simulação das misturas ar/combustível com hidrogênio em motores de combustão interna ciclo diesel.

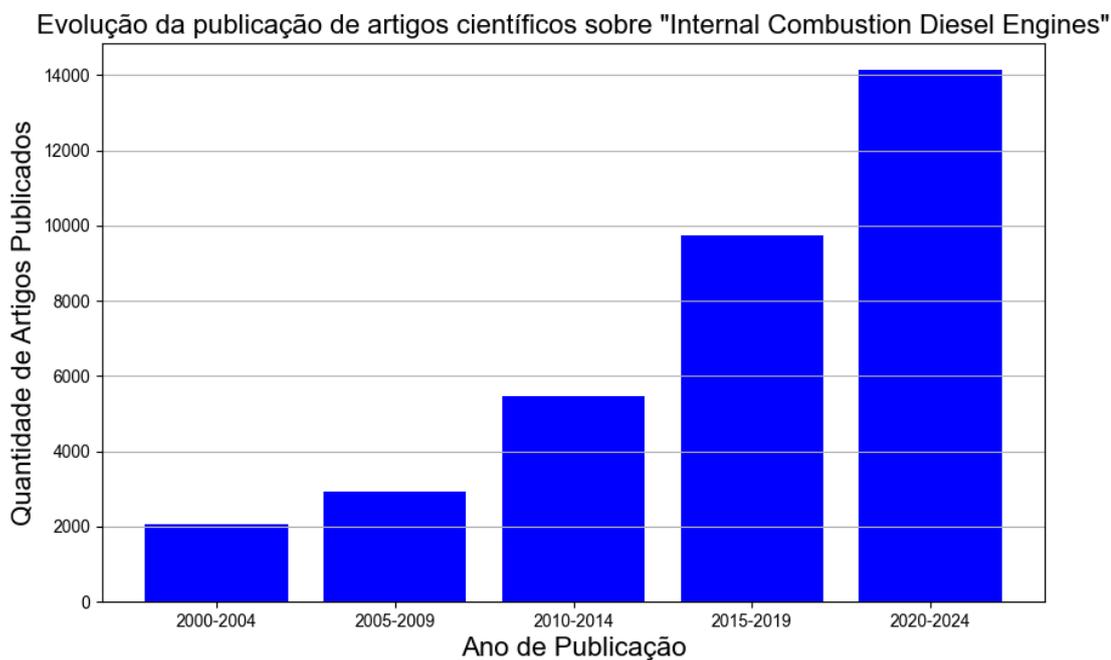
2.5 RELEVÂNCIA DESTE ESTUDO

A relevância de estudos relacionados aos motores de combustão interna ciclo diesel não se restringe apenas ao setor automotivo, mas abrange diversas aplicações, conforme evidenciado pelo aumento de publicações científicas nos periódicos. A Figura 6 (a) apresenta a evolução dessas publicações de acordo com a base de dados *ScienceDirect*. Utilizando como pesquisa o termo "Internal Combustion Diesel Engines" no período de 2000 a 2024, verificou-se que existem 34.324 artigos publicados, onde a cada período de 5 anos, observa-se uma tendência de crescimento de publicações científicas sobre o tema.

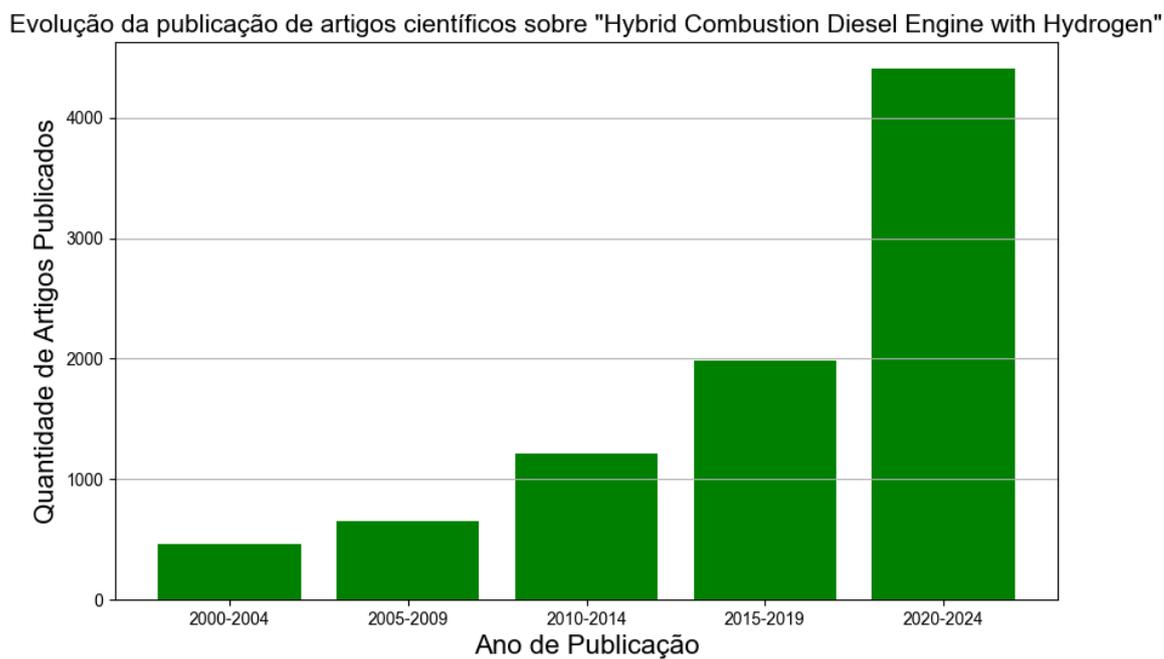
No entanto, mesmo com o aumento no número de publicações sobre motores de combustão interna ciclo diesel, constatou-se uma quantidade menor de estudos relacionados ao uso de hidrogênio como combustível em motores diesel durante o mesmo período. A Figura 6 (b) apresenta a evolução dessas publicações de acordo com a base de dados *ScienceDirect*. Utilizando como pesquisa o termo "Hybrid Combustion Diesel Engine with Hydrogen" no período de 2000 a 2024, verificou-se que existem 9718 artigos publicados. Estes estudos tem apresentado uma tendência de

crescimento, principalmente nos últimos 5 anos, onde houve uma aumento de mais de 50% de artigos publicados, eles representam atualmente 28,3% do total de artigos científicos relacionados com motores de combustão interna ciclo diesel.

Figura 6 – Evolução da publicação de artigos científicos.



(a)



(b)

Fonte: o autor (2024)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será detalhada a abordagem metodológica adotada para a realização deste estudo, que se concentra na análise dos efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e na redução do diesel fóssil injetado em motores de combustão interna de ignição por compressão. A escolha do método de simulação numérica, utilizando o software AVL FIRE™ M versão 2023 R1, visa proporcionar um ambiente controlado e preciso para a avaliação das diferentes proporções de hidrogênio (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%) e das suas implicações sobre a eficiência térmica, a potência e as emissões de poluentes.

A simulação numérica tem se mostrado uma ferramenta essencial no desenvolvimento de motores, pois permite prever e analisar com alto nível de detalhe os processos que ocorrem dentro do cilindro, sem a necessidade de testes experimentais complexos e onerosos. Assim, será descrito o modelo do motor utilizado, bem como os parâmetros e as condições operacionais que foram considerados nas simulações. A metodologia também inclui a modelagem da mistura de hidrogênio com ar, a redução de diesel injetado e as variáveis de simulação como pressão de alimentação, swirl, ângulos de injeção e rotação do motor.

3.1 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE AVL-FIRE™ M

O software AVL-FIRE™ M é uma ferramenta de simulação avançada utilizada para a análise de motores de combustão interna e outras aplicações de dinâmica dos fluidos reativa (CRFD). Este software é amplamente reconhecido por sua capacidade de modelagem detalhada e precisa dos processos de combustão, transferência de calor e fluxo de fluidos em ambientes complexos. É utilizado para prever o comportamento de combustíveis diversos em motores, incluindo misturas de diesel e hidrogênio, como no presente estudo (AVL, 2023a).

O AVL-FIRE™ M inclui uma ampla gama de modelos de combustão, turbulência e spray, permitindo simulações realistas e precisas dos processos dentro da câmara de combustão. Os modelos de combustão incluem desde regimes permanentes até transientes, cobrindo combustão homogênea e heterogênea, bem como a cinética química detalhada (HEYWOOD, 2018). Modelos de turbulência, como o RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) e LES (Large Eddy Simulation), são usados para descrever a interação entre a turbulência do fluxo e os processos de combustão. Além disso, o software oferece modelos detalhados para a simulação de sprays, incluindo quebra e evaporação das gotas de combustível (AVL, 2023a).

3.1.1 Simulação modelo: AVL FIRE™ M - *In-Cylinder Flow (Dual Fuel)* (9607)

Para a realização das simulações numéricas deste estudo, foi utilizado o modelo *In-Cylinder Flow (Dual Fuel)* (fluxo no cilindro (combustível duplo) (9607) do software AVL FIRE™ M versão 2023 R1. Este modelo foi escolhido por sua capacidade de simular com precisão o comportamento dos motores de combustão interna ciclo diesel com adição de combustíveis alternativos, como o hidrogênio.

3.1.1.1 Informações e características do modelo

O modelo *In-Cylinder Flow (Dual Fuel)* (9607) do AVL FIRE™ M é uma ferramenta avançada de simulação que permite a análise detalhada do fluxo de gases e processos de combustão dentro do cilindro de motores de combustão interna.

Estas são as principais características deste modelo:

- **Simulação *dual fuel*:** Permite a simulação de motores que utilizam uma mistura de dois combustíveis diferentes, como diesel e hidrogênio.
- **Dinâmica de fluidos computacional (CFD):** Utiliza métodos avançados de CFD para modelar o fluxo de gases, a mistura de combustíveis e o processo de combustão dentro do cilindro.
- **Modelagem de reações químicas:** Inclui uma biblioteca extensa de reações químicas para a simulação detalhada da combustão e da formação de poluentes, como NO_x, CO₂ e material particulado.
- **Análise de emissões:** Capaz de prever a formação e a emissão de poluentes em diferentes condições operacionais e configurações de combustível.

3.1.1.2 Utilização do modelo cinético *combustion dualfuel*

O modelo cinético *Combustion dualfuel* (combustão bicomcombustível) utilizado no AVL FIRE™ M versão 2023 R1 emprega a metodologia TABKIN para a modelagem da combustão. Esta abordagem pré-calcula a química da combustão e armazena os resultados em tabelas de referência, as quais são acessadas durante a simulação para fornecer dados sobre as reações químicas sem a necessidade de cálculo em tempo real, melhorando a eficiência computacional (GIRAMONDI, 2021; BASARA, 2023).

A metodologia TABKIN é particularmente útil para simulações complexas de combustão em motores de combustível duplo, permitindo a modelagem precisa de diferentes regimes de combustão, como pré-misturado e não pré-misturado. Para isso, são utilizadas tabelas dedicadas para cada regime, com a solução final sendo interpolada com base no regime de combustão calculado durante a simulação (BASARA, 2023).

Essa metodologia permite uma representação precisa dos processos de combustão e formação de emissões, melhorando a eficiência da simulação e reduzindo os requisitos de memória e tempo de geração de tabelas (M, 2023).

3.1.1.3 Especificações técnicas

O modelo 9607 do AVL FIRE™ M possui várias especificações técnicas que o tornam adequado para este estudo. Algumas características relevantes do motor são destacadas a seguir:

- Diâmetro do cilindro: 81.0 mm
- Curso do pistão: 93.15 mm
- Comprimento da biela: 147 mm
- Taxa de compressão: 16.25
- Número de cilindros: 4
- Velocidade do motor: 2000 rpm
- Diâmetro do furo do bico no centro: 0.002 m
- Taxa de fluxo do injetor: 0.0215 kg/s
- Início da injeção: 714 graus

Essas especificações são semelhantes às do motor Volkswagen EA288 Diesel Engine Family, garantindo que as simulações sejam representativas das condições reais de operação do motor diesel utilizado como base de comparação (VOLKSWAGEN AG, 2013). A escolha do modelo AVL FIRE™ M foi baseada na sua capacidade de fornecer resultados precisos e detalhados sobre o comportamento do motor, especialmente em relação à adição de hidrogênio como combustível complementar (M, 2023).

3.1.1.4 Benefícios do uso do modelo 9607

O modelo *In-Cylinder Flow (Dual Fuel)* (9607) do AVL FIRE™ M é uma ferramenta essencial para a análise detalhada e precisa dos efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível em motores de combustão interna ciclo diesel. A capacidade avançada de CFD e a modelagem detalhada de reações químicas garantem previsões precisas do desempenho do motor e das emissões. Além disso, a flexibilidade do modelo permite a simulação de diferentes configurações de combustível e condições operacionais, oferecendo uma visão abrangente dos efeitos da adição de hidrogênio (M, 2023).

3.2 CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

A configuração das simulações no software AVL-FIRE™ M é um passo crucial para garantir a precisão e a relevância dos resultados. As simulações foram baseadas no modelo 9607 do AVL FIRE™ M, com algumas variáveis modificadas conforme necessário para refletir as condições específicas de cada simulação (AVL, 2023a).

3.2.1 Parâmetros do motor

A geometria do motor utilizada nas simulações foi baseada no modelo AVL-FIRE™ M - *In-Cylinder Flow (Dual Fuel)* (9607). Este modelo fornece uma representação genérica e precisa da câmara de combustão e dos canais de admissão e escape, sendo adequado para os objetivos do estudo.

Para justificar a escolha dos parâmetros utilizados nas simulações, apresentamos a tabela 1 comparativa com os dados semelhantes entre o motor do modelo AVL e o motor Volkswagen EA288. Os parâmetros utilizados nas simulações foram os do modelo AVL, que são muito próximos aos do motor VW, assegurando a representatividade e a relevância dos resultados.

Tabela 1 – Tabela comparativa motor do modelo AVL e o motor VW EA288

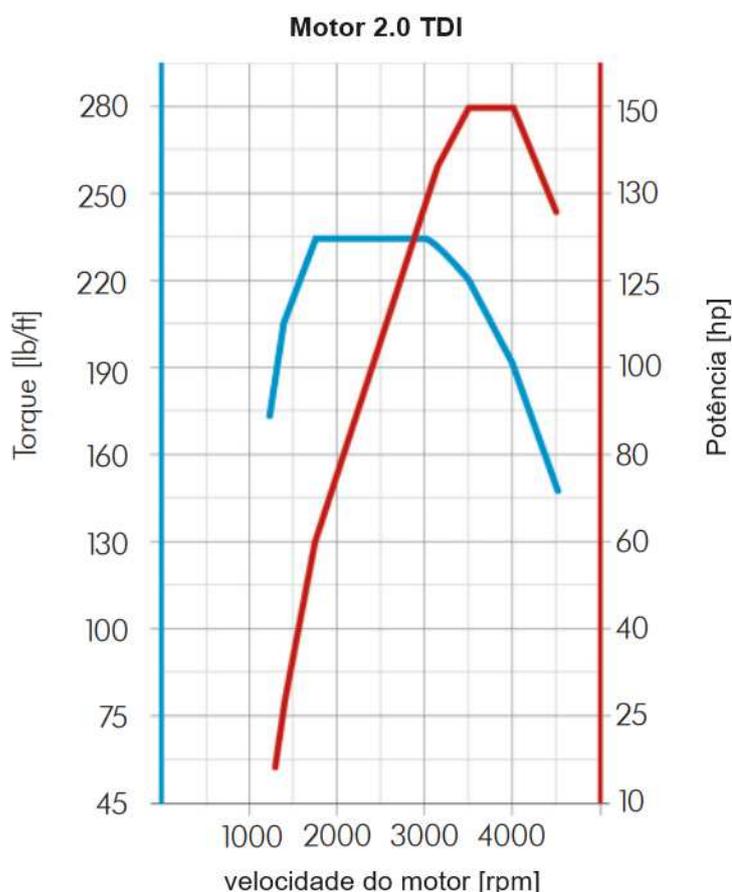
Características	Modelo AVL FIRE™ M (9607)	Motor Volkswagen EA288
Diâmetro do cilindro	81,0 mm	81,0 mm
Curso do pistão	93,15 mm	95,5 mm
Comprimento da biela	147 mm	144 mm
Taxa de compressão	16,25	16,5
Número de cilindros	4	4
Velocidade do motor	2000 rpm	2000 rpm
Diâmetro do furo do bico no centro	0,002 m	0,002 m
Taxa de fluxo do injetor	0,0215 kg/s	0,021 kg/s
Início da injeção	714 graus	714 graus

Fonte: adaptada de AVL FIRE™M Documentation, 2023; Volkswagen AG

Para as simulações, utilizou-se a curva de potência do motor VW EA288 como referência apresentada na Figura 7. Este motor foi fundamental para definir as condições operacionais das simulações. As rotações do motor (1500 RPM, 2500 RPM e 3500 RPM) foram escolhidas com base nesta curva para garantir que as simulações reflitam condições operacionais reais. Essas rotações cobrem uma faixa ampla de

operação do motor, desde baixas até altas rotações, permitindo uma avaliação abrangente do desempenho. Além disso, estas rotações foram selecionadas porque foram retiradas da curva de potência do manual do motor VW EA288, garantindo que as simulações se baseiem em dados reais e precisos.

Figura 7 – Curva de potência do manual do motor VW EA288



Fonte: (VOLKSWAGEN AG, 2013)

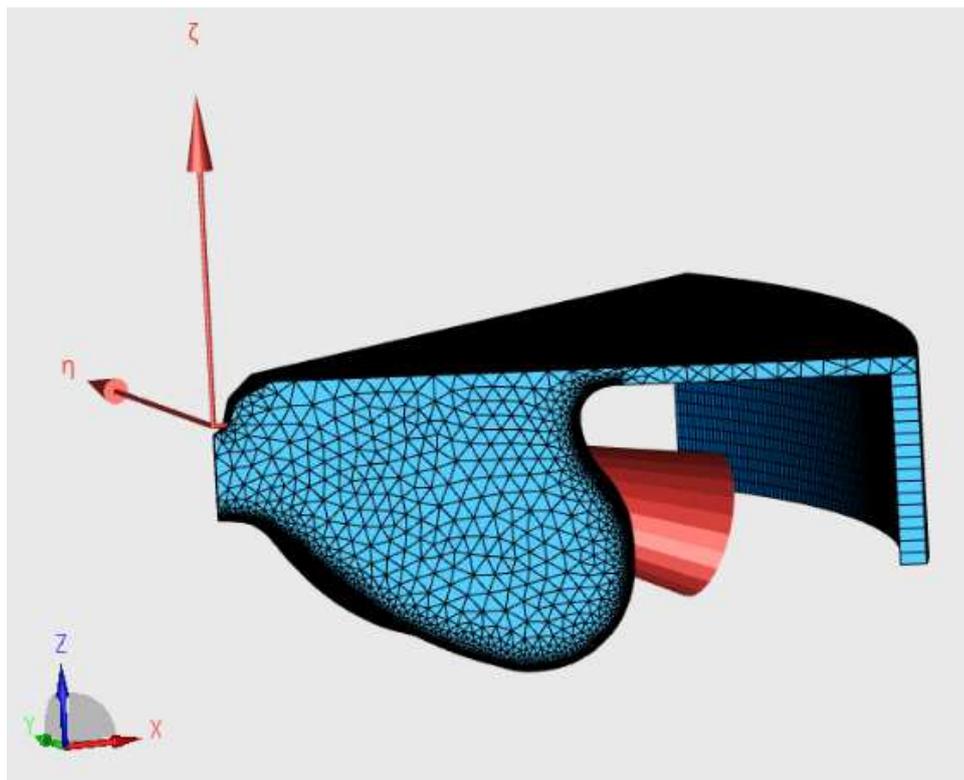
As variáveis das simulações, incluindo a proporção de hidrogênio na mistura, a pressão de alimentação do ar/hidrogênio, o *swirl* e o ângulo de injeção dos bicos de diesel, foram ajustadas para obter uma potência semelhante à do motor VW EA288 nos três pontos de rotação do motor. Este ajuste é crucial para permitir uma análise comparativa precisa, garantindo que os resultados das simulações sejam realistas e aplicáveis a motores diesel modernos.

3.2.2 Domínio da geometria

O domínio da geometria refere-se ao conjunto de informações e parâmetros que definem o espaço tridimensional no qual ocorrem os fenômenos simulados, como a mistura de ar/combustível, combustão, e dinâmica dos gases. Isso inclui a definição

do volume de controle (a câmara de combustão do motor, o cilindro, as válvulas de admissão e escape, entre outros), que foram utilizados para resolver as equações governantes da dinâmica dos fluidos e das reações químicas. O domínio geométrico utilizado nas simulações descritas neste trabalho é um segmento do cilindro incluindo a curva da cabeça do pistão tendo como base a geometria do motor do modelo EA288 (Volkswagen) conforme Figura 8.

Figura 8 – Domínio da geometria



Fonte: o autor

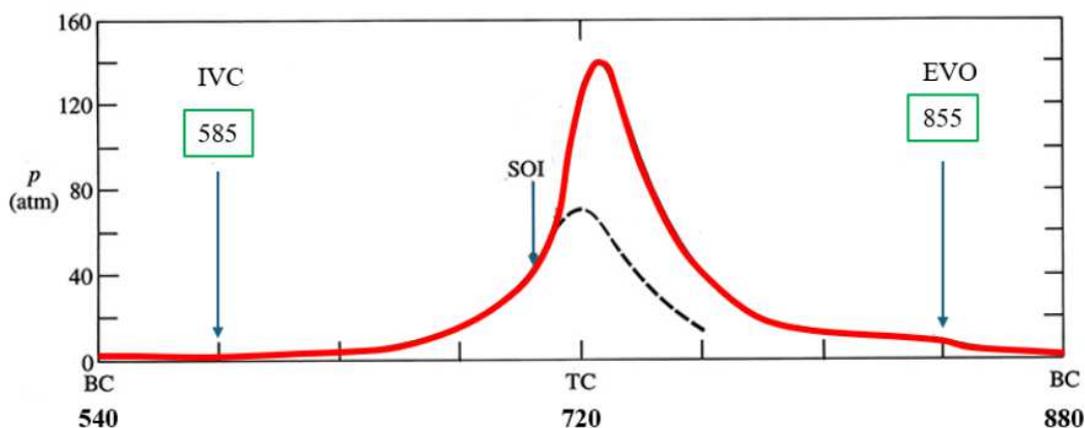
3.2.3 Intervalo da simulação

As simulações ocorreram dentro de um intervalo específico. Este intervalo inicia após o fechamento das válvulas de admissão, no ângulo de 585° CA (*crank angle*), e se estende até antes da abertura das válvulas de escape, no ângulo de 855° CA conforme Figura 9

Este período específico é crucial para avaliar o desempenho do motor e a eficiência da combustão ao adicionar hidrogênio à mistura ar-combustível. O início do intervalo, após o fechamento das válvulas de admissão, marca o ponto onde a mistura de ar e hidrogênio começa a ser comprimida e preparada para a combustão. A partir deste ponto, é importante monitorar como o hidrogênio afeta a eficiência térmica e a produção de energia, bem como os efeitos nas emissões de poluentes. No final do intervalo, antes da abertura das válvulas de escape, o foco deve ser a análise da

eficiência da combustão e a preparação para a fase de escape. É um momento crítico para avaliar a eficiência geral do motor e a redução das emissões

Figura 9 – Intervalo das simulações



Fonte: o autor

onde: BC (*Bottom Center*): É o ponto inferior do curso do pistão, também chamado de "ponto morto inferior"(PMI). Neste ponto, o pistão está no final do seu deslocamento descendente dentro do cilindro.

TC (*Top Center*): Refere-se ao ponto superior do curso do pistão, também conhecido como "ponto morto superior"(PMS). Aqui, o pistão atinge o final do seu deslocamento ascendente.

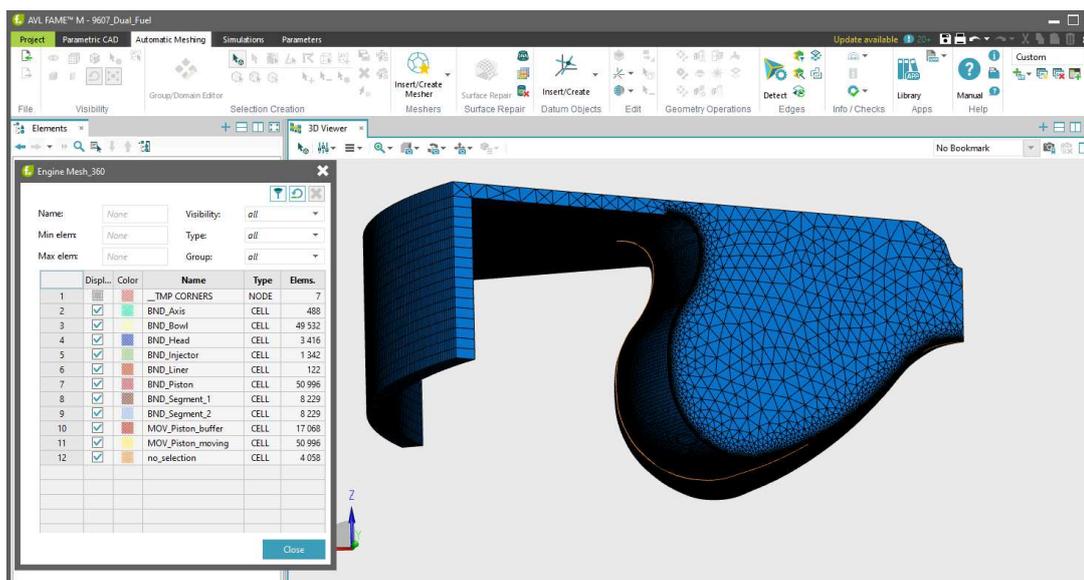
IVC (*Intake Valve Closure*): Momento em que a válvula de admissão se fecha após o pistão ter puxado a mistura de ar (ou ar e combustível, dependendo do tipo de motor) para dentro do cilindro. Isso ocorre durante o ciclo de compressão.

EVO (*Exhaust Valve Opening*): É o ponto em que a válvula de escape se abre, permitindo que os gases de combustão sejam expelidos do cilindro. Este evento ocorre durante o ciclo de escape.

3.2.4 Geração de malha

A geração de malha para este estudo utilizou as ferramentas automáticas e adaptativas do software AVL FIRE™ M versão 2023 R1, baseando-se no modelo In-Cylinder Flow (Dual Fuel) 9607. Este modelo proporciona uma malha híbrida, combinando elementos estruturados e não estruturados, permitindo uma adaptação eficiente às complexidades geométricas do motor (AVL, 2023a).

Figura 10 – Malha utilizada nas simulações



Fonte: o autor

A malha híbrida garantiu uma representação precisa dos segmentos do cilindro que foi simulado. As quantidades de células e elementos podem ser verificados na Figura 10

A validação da malha foi realizada através de testes comparativos com dados experimentais disponíveis, ajustando iterativamente a malha para garantir a concordância entre a simulação e os dados experimentais (AVL, 2023a).

3.2.5 Variáveis ajustadas nas simulações

Nesta seção, são detalhadas as variáveis utilizadas nas simulações para avaliar o impacto da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e da redução do diesel injetado em um motor de combustão interna ciclo diesel. As simulações foram conduzidas utilizando o software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1, e as variáveis foram selecionadas com base na literatura e nas necessidades específicas do estudo. As variáveis consideradas incluem a proporção de hidrogênio na mistura, a rotação do motor, a pressão de alimentação do ar/hidrogênio, o *swirl* e o ângulo de injeção dos bicos de diesel e as massas de diesel nos injetores 1 e 2. As variáveis foram ajustadas de forma a se obter uma potência semelhante ao motor VW EA288 nas rotações estudadas.

3.2.5.1 Proporção de hidrogênio na mistura

As simulações consideraram diferentes proporções de hidrogênio adicionadas à mistura ar/combustível. As proporções foram escolhidas para avaliar os efeitos em vá-

rias concentrações, mantendo a segurança e a viabilidade prática do uso de hidrogênio. As proporções utilizadas foram:

1. 0% (controle)
2. 2.5%
3. 5%
4. 7.5%
5. 10%

Essas proporções foram ajustadas de modo a manter a estequiometria da mistura ar-combustível para uma combustão eficiente e limpa. No contexto dos motores diesel, a relação estequiométrica refere-se à proporção ideal de ar para o combustível que permite a combustão completa, ou seja, a quantidade de ar necessária para queimar completamente o combustível injetado no cilindro. Os motores diesel geralmente operam com uma mistura mais pobre em combustível (excesso de ar) para melhorar a eficiência e reduzir as emissões. A relação ar/combustível real pode variar significativamente dependendo das condições de operação, como carga e velocidade do motor.

Para o ar de admissão nas simulações foram mantidos apenas a composição de O_2 , N_2 e proporcionalmente o H_2 .

3.2.5.2 Rotação do motor

Essas rotações foram selecionadas porque foram retiradas da curva de potência do manual do motor VW EA288. As simulações nessas rotações foram realizadas para obter uma curva semelhante e ajustar o modelo para as simulações. Além disso, as variáveis foram ajustadas para garantir uma potência semelhante à do motor VW EA288 nas rotações estudadas.

Para analisar o comportamento do motor em diferentes condições operacionais, as simulações foram realizadas em três rotações distintas: 1500, 2500 e 3500 RPM.

Essas rotações cobrem uma faixa ampla de operação do motor, desde baixas até altas rotações, permitindo uma avaliação abrangente do desempenho.

3.2.5.3 Pressão de alimentação do ar/hidrogênio

A pressão de alimentação do ar e do hidrogênio foi ajustada para garantir uma mistura adequada e uma combustão eficiente. As pressões consideradas nas simulações foram determinadas com base em parâmetros operacionais típicos e na necessidade de garantir a segurança da operação. Esses ajustes também visaram obter uma potência semelhante à do motor VW EA288.

3.2.5.4 *Swirl*

O *swirl*, ou movimento rotacional do ar dentro do cilindro, melhora a mistura do ar com o combustível e aumenta a eficiência da combustão. Estudos mostram que o ajuste do *swirl* pode levar a uma melhor distribuição da mistura e, conseqüentemente, a uma combustão mais eficiente e menos poluente. O *swirl* foi variado conforme necessário para cada simulação visando sempre alcançar uma potência semelhante à do motor VW EA288. O valor da variável *swirl* é um valor configurado para as condições iniciais de cada simulação.

3.2.5.5 *Ângulo de injeção dos bicos de diesel*

O ângulo de injeção dos bicos de diesel foi uma variável crítica nas simulações, afetando diretamente a formação da mistura ar/combustível e a eficiência da combustão. Diferentes ângulos de injeção foram testados para otimizar a combustão do diesel com a adição de hidrogênio, garantindo a melhor performance possível em termos de potência e emissões. Esses ângulos foram ajustados para se obter uma potência semelhante à do motor VW EA288 nas rotações estudadas.

3.2.5.6 *Redução do diesel injetado*

Além da adição de hidrogênio, a quantidade de diesel injetado foi reduzida proporcionalmente para avaliar o impacto na eficiência e nas emissões. A redução do diesel injetado foi realizada em diferentes níveis para encontrar o equilíbrio ideal entre a quantidade de hidrogênio e diesel, maximizando a eficiência e minimizando as emissões. Esses ajustes foram feitos de forma a manter a potência semelhante à do motor VW EA288.

3.2.5.7 *Considerações finais sobre as variáveis*

A escolha dessas variáveis e seus respectivos níveis de ajuste foi baseada em um estudo detalhado da literatura existente e nas características específicas do modelo de motor utilizado. Através da variação controlada dessas variáveis nas simulações, foi possível obter uma compreensão aprofundada dos efeitos da adição de hidrogênio e da redução do diesel injetado no desempenho e nas emissões do motor ciclo diesel, mantendo uma potência semelhante à do motor VW EA288 nas rotações estudadas.

3.3 MODELAGEM DA MISTURA AR/COMBUSTÍVEL COM HIDROGÊNIO

Para a modelagem da mistura ar/combustível com hidrogênio, foi utilizado o modelo ECFM-3Z (*extended coherent flame model - 3 zones*). Este modelo é amplamente reconhecido por sua capacidade de descrever detalhadamente os processos

de mistura e combustão em motores de combustão interna ciclo diesel, especialmente em condições heterogêneas e turbulentas. Abaixo, detalham-se as características e a implementação desse modelo.

3.3.1 Implementação no software AVL-FIRE™ M

O modelo ECFM-3Z foi implementado no software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1, utilizando as capacidades avançadas de CFD do software. As simulações foram configuradas para avaliar os efeitos de diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível, variando de 0% a 10%.

- Configuração da malha: Utilizou-se uma malha híbrida, combinando elementos estruturados e não estruturados, para representar com precisão a geometria da câmara de combustão e dos canais de admissão e escape.
- Condições de operação: As simulações foram realizadas em três rotações distintas do motor (1500 RPM, 2500 RPM e 3500 RPM), cobrindo uma faixa ampla de operação do motor.
- Parâmetros de combustão: A pressão de alimentação do ar/hidrogênio e o *swirl* foram ajustados para garantir uma mistura adequada e uma combustão eficiente. O ângulo de injeção dos bicos de diesel foi otimizado para maximizar a eficiência da combustão com a adição de hidrogênio.

3.3.2 Avaliação da combustão e emissões

O modelo ECFM-3Z permite uma avaliação detalhada da combustão e das emissões resultantes da adição de hidrogênio. Os principais parâmetros analisados incluem:

- Eficiência térmica: A adição de hidrogênio pode aumentar a eficiência térmica do motor, devido ao seu alto poder calorífico e capacidade de acelerar a taxa de queima da mistura.
- Formação de poluentes: A análise das emissões de NO_x, CO, CO₂ e fuligem (*soot*) é essencial para avaliar o impacto ambiental da adição de hidrogênio. Estudos mostram que a combustão do hidrogênio produz principalmente água, contribuindo para a redução das emissões de CO₂ e CO, embora possa aumentar as emissões de NO_x devido às altas temperaturas de combustão.
- Consumo de combustível: A redução do diesel injetado em combinação com a adição de hidrogênio é avaliada para determinar o equilíbrio ideal entre eficiência e emissões.

3.4 REDUÇÃO DO DIESEL INJETADO

A redução do diesel injetado é uma estratégia essencial para melhorar a eficiência e reduzir as emissões dos motores de combustão interna ciclo diesel. Esta seção descreve a metodologia utilizada para ajustar as quantidades de diesel injetado e os ângulos de injeção dos dois bicos injetores, conforme diferentes cenários de adição de hidrogênio.

3.4.1 Estratégias de redução do diesel injetado

A estratégia adotada para a redução do diesel injetado envolveu ajustes na massa de combustível injetada e nos ângulos de injeção para cada bico injetor, mantendo uma potência semelhante ao do motor de referência. A proporção de hidrogênio variou de 0% a 10%, com a massa de diesel ajustada proporcionalmente. As variáveis das simulações, assim como a redução da massa de diesel, foram ajustadas de modo a obter a mesma potência do motor de referência para a rotação.

Para analisar o impacto da adição de hidrogênio e da redução do diesel injetado, foram realizadas simulações numéricas para diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM). A Tabela 2 apresenta os dados detalhados das simulações:

Tabela 2 – Redução da massa de diesel injetado

RPM	H ₂ (%)	Massa Diesel Inj. 1 (mg)	Massa Diesel Inj. 2 (mg)	Massa Total Diesel (mg)	Redução (%)
1500	0	0,5	5,75	6,25	0
1500	2,5	0,5	4,75	5,25	-16
1500	5	0,25	3,12	3,37	-46
1500	7,5	0,25	2,75	3,00	-52
1500	10	0,25	2,60	2,85	-54
2500	0	1,0	11,0	12,0	0
2500	2,5	0,75	7,0	7,75	-35
2500	5	0,75	5,8	6,55	-45
2500	7,5	0,70	5,1	5,80	-52
2500	10	0,70	4,85	5,55	-54
3500	0	0,5	10,75	11,25	0
3500	2,5	0,5	6,0	6,50	-42
3500	5	0,5	5,2	5,70	-49
3500	7,5	0,5	5,0	5,50	-51
3500	10	0,5	4,65	5,15	-54

Fonte: o autor

Esses dados demonstram que a adição de hidrogênio permite uma significativa redução na massa de diesel injetada, mantendo a potência do motor semelhante ao do motor de referência. As reduções variaram de 16% a 54%, dependendo da rotação do motor e da proporção de hidrogênio adicionada.

As simulações demonstram o potencial do hidrogênio como um combustível complementar para motores de combustão interna ciclo diesel, contribuindo para a redução das emissões e o aumento da eficiência energética.

3.4.2 Implementação no software AVL-FIRE™ M

A implementação desta estratégia no software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1 foi realizada da seguinte maneira:

- Configuração das simulações: As simulações foram configuradas para diferentes proporções de hidrogênio (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%) e nas rotações do motor de 1500 RPM, 2500 RPM e 3500 RPM. A quantidade de diesel

injetado foi ajustada para cada cenário de hidrogênio, buscando manter a potência do motor semelhante à do motor VW EA288 utilizado como referência.

- Ajuste dos parâmetros de injeção: Os ângulos de injeção dos bicos de diesel foram otimizados para maximizar a eficiência da combustão com a adição de hidrogênio. Este ajuste foi essencial para garantir uma mistura homogênea e uma combustão completa, reduzindo a formação de poluentes como CO e fuligem.

3.4.3 Dados de injeção de diesel

Os dados de injeção de diesel para diferentes proporções de hidrogênio e rotações do motor foram obtidos a partir das condições de operação do motor, conforme mostrado na tabela 3.

Tabela 3 – Condições de operação do motor a 1500, 2500 e 3500 RPM

RPM	H ₂ (%)	Mass_inj_1 (mg)	Mass_inj_2 (mg)	SOI_1 (CA)	SOI_2 (CA)	EOI_1 (CA)	EOI_2 (CA)
1500	0	0,5	5,75	710,8	716,2	711,6	726,5
1500	2,5	0,5	4,75	712,3	717,7	713,1	728,0
1500	5	0,25	3,12	712,3	717,7	713,1	728,0
1500	7,5	0,25	2,75	712,3	717,7	713,1	728,0
1500	10	0,25	2,6	712,3	717,7	713,1	728,0
2500	0	1,0	11,0	715,8	718,7	716,6	729,0
2500	2,5	0,75	7,0	712,8	715,7	713,6	726,0
2500	5	0,5	5,8	711,8	714,7	712,6	725,0
2500	7,5	0,7	5,1	711,8	714,7	712,6	725,0
2500	10	0,7	4,85	711,8	714,7	713,6	725,0
3500	0	0,5	10,75	715,8	718,7	716,6	729,0
3500	2,5	0,5	6,0	711,8	714,7	713,2	725,0
3500	5	0,5	5,2	710,3	713,2	711,1	723,5
3500	7,5	0,5	5,0	710,3	713,2	711,1	723,5
3500	10	0,5	4,65	710,3	713,2	711,1	723,5

Fonte: o autor

onde: Mass_inj_1 (mg) refere-se à massa de diesel injetada pelo injetor 1, enquanto Mass_inj_2 (mg) refere-se à massa de diesel injetada pelo injetor 2. soi_1 (CA)

indica o *start of injection* (início da injeção) para o injetor 1, e *soi_2* (CA) indica o *start of injection* (início da injeção) para o injetor 2. Da mesma forma, *eoi_1* (CA) refere-se ao *end of injection* (fim da injeção) para o injetor 1, enquanto *eoi_2* (CA) refere-se ao *end of injection* (fim da injeção) para o injetor 2.

3.4.4 Avaliação da eficiência e emissões

A avaliação da eficiência e das emissões com a redução do diesel injetado foi realizada com base nos seguintes parâmetros:

- Eficiência térmica: A redução do diesel injetado, combinada com a adição de hidrogênio, resultou em um aumento na eficiência térmica do motor. O hidrogênio, devido ao seu alto poder calorífico, contribuiu para uma combustão mais rápida e completa, aumentando a eficiência do processo.
- Emissões de poluentes: As emissões de NO_x, CO, CO₂ e fuligem foram monitoradas para cada proporção de hidrogênio e nível de redução de diesel. Estudos anteriores mostraram que a adição de hidrogênio pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ e CO, embora possa aumentar as emissões de NO_x devido às altas temperaturas de combustão. Sistemas de pós-tratamento, como EGR e SCR, podem ser necessários para mitigar esse aumento de NO_x.
- Consumo de combustível: A redução do diesel injetado foi avaliada quanto ao seu impacto no consumo de combustível. A combinação com hidrogênio permitiu uma diminuição no consumo total de diesel, contribuindo para uma operação mais sustentável e econômica do motor.

3.5 PARÂMETROS DO AR DE ADMISSÃO

Os parâmetros do ar de admissão, incluindo a pressão de entrada, o *swirl* e as frações molares da composição do ar, desempenham um papel crucial na eficiência da combustão e na formação de poluentes em motores de combustão interna ciclo diesel. Esta seção detalha as condições de operação do ar de admissão utilizadas nas simulações.

3.5.1 Pressão de entrada do ar na câmara de combustão

A pressão de entrada do ar na câmara de combustão é um parâmetro vital que afeta a densidade do ar, a eficiência da combustão e a formação de poluentes. Diferentes pressões foram configuradas para cada rotação do motor e proporção de hidrogênio, conforme mostrado na tabela 4.

3.5.2 *Swirl*

O *swirl* refere-se ao movimento de rotação do ar dentro da câmara de combustão, que ajuda a melhorar a mistura ar/combustível e a eficiência da combustão. As condições de *swirl* foram ajustadas para cada cenário de simulação para otimizar a combustão. .

3.5.3 Frações molares da composição do ar

A composição do ar de entrada na câmara de combustão foi controlada em termos de frações molares de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). A porcentagem de hidrogênio (H_2) foi calculada com base nas frações molares contidas no ar, variando de acordo com a proporção de hidrogênio adicionada. A composição do ar de entrada de acordo de cada simulação está listada na tabela 4.

Tabela 4 – Condições de operação do ar de admissão a 1500, 2500 e 3500 RPM

RPM	H_2 (%)	Pressão (bar)	<i>Swirl</i> (1/min)	H_2 (Fração Molar)	N_2 (Fração Molar)	O_2 (Fração Molar)
1500	0	2,25	2200	1e-06	0,789999	0,21
1500	2,5	2,15	2200	0,02505	0,77021	0,20474
1500	5	1,89	2200	0,05003	0,75047	0,1995
1500	7,5	1,75	2200	0,075	0,73075	0,19425
1500	10	1,65	2200	0,1005	0,71096	0,18899
2500	0	3,575	2450	1e-05	0,78999	0,21
2500	2,5	3,3	2450	0,02505	0,77021	0,20474
2500	5	3,225	2450	0,05003	0,75047	0,1995
2500	7,5	3,1	2450	0,075	0,73075	0,19425
2500	10	3,0	2450	0,1005	0,71096	0,18899
3500	0	3,575	2600	1e-05	0,78999	0,21
3500	2,5	3,25	2600	0,02505	0,77021	0,20474
3500	5	3,25	2600	0,05003	0,75047	0,1995
3500	7,5	3,12	2600	0,075	0,73075	0,19425
3500	10	3,0	2600	0,1005	0,71096	0,18899

Fonte: o autor

onde: RPM refere-se à rotação do motor. Pressão indica a pressão de operação em (bar). *Swirl* se refere à taxa de rotação do ar (1/min). H_2 (Fração Molar) representa a

fração molar de hidrogênio. N_2 (Fração Molar) representa a fração molar de nitrogênio. O_2 (Fração Molar) representa a fração molar de oxigênio.

3.6 COMPARAÇÃO COM OS DADOS DE POTÊNCIA DO MANUAL DO MOTOR VW EA288

A validação do modelo é um passo crucial para garantir a precisão e a confiabilidade das simulações numéricas. Neste estudo, a validação do modelo foi realizada comparando os resultados das simulações com dados experimentais disponíveis na literatura e com dados de motores diesel convencionais. O principal parâmetro utilizado para validar a precisão das simulações foi a curva de potência do motor VW EA288.

3.6.1 Comparação com dados experimentais

Para validar o modelo utilizado nas simulações, foram comparados os resultados obtidos com dados experimentais disponíveis na literatura e com dados específicos do manual do motor VW EA288, que serviu como base para as simulações. Essa comparação é fundamental para assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados das simulações realizadas com o software AVL-FIRE™ M.

Os dados experimentais utilizados para validação incluem estudos anteriores que investigaram o desempenho de motores diesel com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível. Por exemplo, o estudo de Jamrozik, Grab-Rogaliński e Tutak (2020) analisou a co-combustão de hidrogênio e diesel, avaliando os efeitos na estabilidade da combustão, desempenho do motor e emissões de gases de escape. Os resultados mostraram que a adição de hidrogênio aumentou a eficiência térmica do motor e reduziu significativamente as emissões de fuligem, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2), embora tenha sido observado um aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio (NOx).

Além disso, os dados fornecidos pelo manual do motor VW EA288 foram cruciais para a validação do modelo. O manual oferece informações detalhadas sobre a configuração e os parâmetros operacionais do motor, como a curva de potência, que foi utilizada como referência para ajustar as variáveis das simulações. A comparação das curvas de potência das simulações com as do motor VW EA288 ajudou a garantir que os modelos numéricos refletissem com precisão o comportamento real do motor.

3.6.2 Metodologia de validação

A metodologia de validação seguiu os seguintes passos:

- Coleta de dados experimentais: Foram coletados dados experimentais relevantes da literatura, incluindo estudos que investigaram o desempenho de motores diesel.
- Configuração das simulações: As simulações foram configuradas para replicar as condições dos experimentos, incluindo rotações do motor e parâmetros operacionais.
- Execução das simulações: As simulações foram executadas utilizando o software AVL FIRE™ M, e os resultados foram registrados para análise.
- Análise comparativa: Os resultados das simulações foram comparados com os dados experimentais.

3.6.3 Resultados da validação

Os resultados da validação mostraram uma boa concordância entre os dados experimentais e os resultados das simulações. A seguir, apresentamos as tabelas 5 e 6 que compara os principais parâmetros de desempenho e consumo de combustível (*iSFC*), considerando apenas simulações com 0% de H₂ e os dados do motor de referência nas rotações de 1500, 2500 e 3500 RPM.

Tabela 5 – Comparação dos resultados de potência

Rotação (RPM)	Potência Simulada (HP)	Potência VW EA288 (HP)	Diferença (%)
1500	33,00	35,50	7,04*
2500	101,91	106,25	4,08*
3500	148,73	150,00	0,85*

Fonte: o autor

Tabela 6 – Comparação do consumo de combustível (*iSFC*)

Rotação (RPM)	<i>iSFC</i> Simulado (g/kWh)	<i>iSFC</i> VW EA288 (g/kWh)	Diferença (%)
1500	182,91	210,00	12,89*
2500	189,51	–	–
3500	170,43	–	–

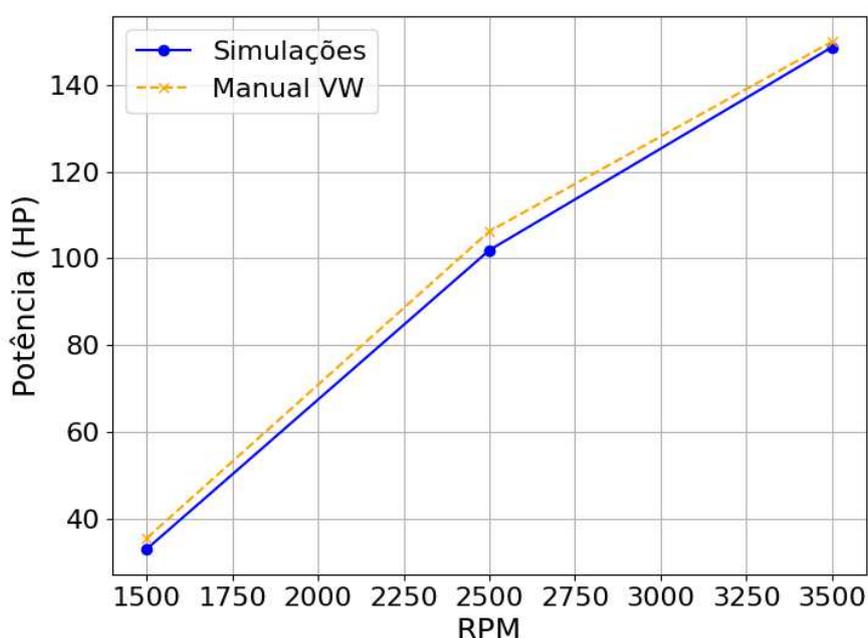
Fonte: o autor

* especificidades das simulações

3.6.4 Comparação das curvas de potência

A comparação das curvas de potência foi realizada entre os valores das simulações e os valores do motor VW EA288. Os valores de potência para o motor VW foram extraídos do manual do fabricante e comparados com os valores das simulações para as rotações de 1500, 2500 e 3500 RPM. O gráfico comparativo da Figura 11 ajuda a visualizar a precisão das simulações. Este tipo de comparação é essencial para validar o desempenho do modelo simulado.

Figura 11 – Gráfico com a comparação das curvas de potência



Fonte: o autor

A validação do modelo mostrou uma boa concordância entre os resultados simulados e os dados experimentais, especialmente para os parâmetros de potência e consumo de combustível ($iSFC$). As pequenas discrepâncias observadas podem ser atribuídas a variações nas condições experimentais e nas especificidades do modelo numérico. A abordagem metodológica adotada demonstrou ser eficaz para validar os resultados das simulações, reforçando a confiabilidade das conclusões do estudo.

3.7 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, são detalhados os critérios utilizados para avaliar os resultados das simulações realizadas com o software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1. Os critérios de avaliação foram definidos para analisar a eficiência térmica, o consumo de combustível,

a potência do motor e as emissões de poluentes, conforme descrito nas subseções a seguir.

3.7.1 Pós-processamento dos dados

O pós-processamento dos dados das simulações é uma etapa crucial para a análise dos resultados obtidos com o software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1. Nesta seção, detalhamos o método utilizado para processar os dados e gerar informações relevantes para a avaliação da eficiência térmica, consumo de combustível, potência do motor e emissões de poluentes.

3.7.1.1 Pós-processamento dos dados das simulações

Os dados brutos das simulações foram gerados em arquivos CSV para cada execução, correspondendo a diferentes combinações de RPM e porcentagens de hidrogênio (% H₂). Além disso, informações complementares foram obtidas de um arquivo TXT contendo condições de operação do motor. Para consolidar e analisar esses dados, foi desenvolvido pelo prof. Leonel Rincon Cancino, Dr. Eng. um script denominado *AVL FIRE™ M data post-processing*. Este script desempenha as seguintes funções:

1. Leitura dos dados:

- O script lê os arquivos CSV gerados pelas simulações para cada combinação de RPM e % H₂.
- Além disso, lê o arquivo TXT contendo condições de operação do motor, como volume deslocado, velocidade do motor, massas de injeção e ângulos de injeção para diferentes proporções de H₂.

2. Consolidação dos dados:

- As informações de múltiplos arquivos CSV são consolidadas em um único arquivo de resultados CSV para cada rotação do motor, facilitando a análise comparativa.
- Os dados do arquivo TXT são utilizados para complementar e contextualizar os dados das simulações.

3. Cálculo dos parâmetros:

- O script calcula parâmetros chave como:
 - Massa de hidrogênio (*H₂ mass*)
 - Massa de diesel (*Diesel mass*)
 - Razão ar/combustível (*A/F ratio*)
 - Fluxo de energia do diesel (*Diesel energy flow*)
 - Fluxo de energia do hidrogênio (*H₂ energy flow*)

- Fluxo de energia total (*Total energy flow*)
- Potência indicada (*Indicated Power*)
- Consumo específico de combustível indicado (iSFC)
- Emissões específicas (sCO₂, sCO, sHC, sNOx, ssoot)
- Caracterização da combustão (mfb10, mfb50, mfb90)

4. Geração de gráficos:

- Gráficos detalhados são gerados para visualizar os resultados de interesse, permitindo uma análise mais intuitiva e comparativa entre as diferentes simulações.

5. Exportação dos resultados:

- Os resultados consolidados e os gráficos são exportados para facilitar a documentação e análise posterior.

Este processo de pós-processamento garante que os dados das simulações sejam tratados de maneira consistente e precisa, proporcionando uma base sólida para a avaliação dos critérios de desempenho do motor.

3.7.2 Potência do motor

A potência do motor é um parâmetro fundamental para avaliar o desempenho de um motor de combustão interna. Nesta seção, detalhamos o método utilizado para medir, calcular e avaliar a potência do motor nas diferentes simulações realizadas.

3.7.2.1 Medição da potência do motor

A potência do motor foi medida para diversas proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%) e em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM). Os dados necessários foram obtidos a partir das simulações numéricas realizadas no software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1.

3.7.2.2 Dados utilizados

Os dados utilizados para avaliar a potência do motor foram extraídos diretamente dos resultados das simulações. As simulações geraram arquivos CSV para cada execução, correspondendo a diferentes combinações de RPM e % H₂. Um script denominado *AVL FIRE™ M data post-processing* foi utilizado para processar esses dados. Este script consolidou as informações em um único arquivo CSV para cada RPM e gerou gráficos detalhados com os resultados de interesse.

3.7.2.3 Avaliação da potência do motor

A potência indicada (*Indicated Power*) foi obtida através do pós-processamento dos resultados das simulações, fornecendo uma medida clara da eficiência com a qual o motor converte a energia do combustível em trabalho mecânico. Os valores de potência indicada foram utilizados para comparar o desempenho do motor entre diferentes proporções de hidrogênio e rotações do motor.

3.7.2.4 Procedimento para avaliação

1. Coleta de dados: Os dados de potência indicada são obtidos através do pós-processamento dos resultados das simulações.
2. Análise dos dados: Os dados são analisados para comparar a potência do motor entre diferentes proporções de hidrogênio e rotações do motor.
3. Interpretação dos resultados: Os resultados são interpretados para entender como a adição de hidrogênio afeta a potência do motor e a eficiência global.

Este procedimento metodológico garante a precisão dos dados e oferece uma análise comparativa detalhada das diferentes configurações testadas, contribuindo para o desenvolvimento de motores de combustão interna mais eficientes e sustentáveis.

3.7.3 Eficiência térmica

A eficiência térmica é um parâmetro crítico para avaliar o desempenho do motor, indicando a capacidade do motor em converter a energia do combustível em trabalho útil. Nesta seção, descrevemos o método utilizado para medir, calcular e avaliar a eficiência térmica nas diferentes simulações realizadas.

3.7.3.1 Medição da eficiência térmica

A eficiência térmica foi medida para diversas proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%) e em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM). Os dados necessários foram obtidos a partir das simulações numéricas realizadas no software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1.

3.7.3.2 Dados utilizados

Os dados utilizados para calcular a eficiência térmica foram extraídos diretamente dos resultados das simulações. As simulações geraram arquivos CSV para cada execução, correspondendo a diferentes combinações de RPM e % H₂. Um script denominado "AVL FIRE™ M data post-processing" foi utilizado para processar esses

dados. Este script consolidou as informações em um único arquivo CSV para cada RPM e gerou gráficos detalhados com os resultados de interesse.

A Tabela 7 apresenta uma amostra dos dados necessários para o cálculo:

Tabela 7 – Amostra de dados para cálculo da eficiência térmica

Proporção de Hidrogênio (%)	Potência Indicada (kW)	Energia do Diesel (MJ/h)	Energia do H ₂ (MJ/h)	Energia Total (MJ/h)
0	75,99	22,14	0,00	22,14
2,5	76,21	14,30	0,64	14,94
5	100,86	13,89	1,24	15,13
7,5	102,41	13,48	1,86	15,34
10	101,50	13,07	2,49	15,56

Fonte: o autor

3.7.3.3 Cálculo da eficiência térmica

A eficiência térmica foi calculada utilizando a razão entre a potência útil do motor e a energia total fornecida pelo combustível. A Equação (26) foi utilizada para calcular a eficiência térmica.

$$\text{Eficiência térmica} = \frac{\text{Potência Indicada (kW)}}{\text{Energia Total do Combustível (MJ/h)} \times 0.2778} \quad (26)$$

Onde:

- A potência indicada (P) foi obtida diretamente das simulações.
- A energia total do combustível (E_{total}) é a soma das energias fornecidas pelo diesel (E_{diesel}) e pelo hidrogênio (E_{H_2}).

3.7.3.4 Procedimento para cálculo

1. Coleta de dados: Os dados de potência indicada, energia do diesel e energia do hidrogênio são extraídos das simulações.
2. Conversão de unidades: A energia total do combustível, fornecida em MJ/h, é convertida para kW utilizando a relação $1 \text{ MJ/h} = 0.2778 \text{ kW}$.
3. Cálculo da eficiência Térmica: A eficiência térmica é calculada utilizando a fórmula mencionada acima.

3.7.4 Consumo de combustível

O consumo de combustível é um parâmetro essencial para avaliar a eficiência operacional de um motor de combustão interna. Nesta seção, detalhamos o método utilizado para medir, calcular e avaliar o consumo de combustível nas diferentes simulações realizadas.

3.7.4.1 Medição do consumo de combustível

O consumo de combustível foi medido para diversas proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%) e em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM). Os dados necessários foram obtidos a partir das simulações numéricas realizadas no software AVL-FIRE™M versão 2023 R1.

3.7.4.2 Dados utilizados

Os dados utilizados para avaliar o consumo de combustível foram extraídos diretamente dos resultados das simulações. As simulações geraram arquivos CSV para cada execução, correspondendo a diferentes combinações de RPM e % H₂. Um script denominado *AVL FIRE™ M data post-processing* foi utilizado para processar esses dados. Este script consolidou as informações em um único arquivo CSV para cada RPM e gerou gráficos detalhados com os resultados de interesse.

3.7.4.3 Avaliação do consumo de combustível

O consumo específico de combustível indicado (iSFC) foi obtido através do pós-processamento dos resultados das simulações, fornecendo uma medida clara da eficiência com a qual o motor utiliza o combustível para produzir potência. Os valores de iSFC foram utilizados para comparar o consumo de combustível entre diferentes proporções de hidrogênio e rotações do motor.

3.7.4.4 Procedimento para avaliação

1. *Coleta de dados:* Os dados de iSFC, energia do diesel e energia do hidrogênio são obtidos através do pós-processamento dos resultados das simulações.
2. *Análise dos dados:* Os dados são analisados para comparar o consumo de combustível entre diferentes proporções de hidrogênio e rotações do motor.
3. *Interpretação dos resultados:* Os resultados são interpretados para entender como a adição de hidrogênio afeta o consumo de combustível e a eficiência do motor.

Este procedimento metodológico garante a precisão dos dados e oferece uma análise comparativa detalhada das diferentes configurações testadas, contribuindo para o desenvolvimento de motores de combustão interna mais eficientes e sustentáveis.

3.7.5 Emissões de poluentes

As emissões de poluentes são um parâmetro crítico para avaliar o impacto ambiental de um motor de combustão interna. Nesta seção, detalhamos o método utilizado para medir, calcular e avaliar as emissões de poluentes nas diferentes simulações realizadas.

3.7.5.1 Medição das emissões de poluentes

As emissões de poluentes foram medidas para diversas proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%) e em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM). Os dados necessários foram obtidos a partir das simulações numéricas realizadas no software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1.

3.7.5.2 Dados utilizados

Os dados utilizados para avaliar as emissões de poluentes foram extraídos diretamente dos resultados das simulações. As simulações geraram arquivos CSV para cada execução, correspondendo a diferentes combinações de RPM e % H₂. Um script denominado *AVL FIRE™ M data post-processing* foi utilizado para processar esses dados. Este script consolidou as informações em um único arquivo CSV para cada RPM e gerou gráficos detalhados com os resultados de interesse.

3.7.5.3 Avaliação das emissões de poluentes

As emissões específicas de dióxido de carbono (sCO₂), monóxido de carbono (sCO), hidrocarbonetos (sHC), óxidos de nitrogênio (sNOx) e material particulado (ssoot) foram obtidas através do pós-processamento dos resultados das simulações. Esses valores foram utilizados para comparar as emissões de poluentes entre diferentes proporções de hidrogênio e rotações do motor.

3.7.5.4 Procedimento para avaliação

1. Coleta de dados: Os dados de emissões específicas, incluindo sCO₂, sCO, sHC, sNOx e soot, são obtidos através do pós-processamento dos resultados das simulações.

2. Análise dos dados: Os dados são analisados para comparar as emissões de poluentes entre diferentes proporções de hidrogênio e rotações do motor.
3. Interpretação dos resultados: Os resultados são interpretados para entender como a adição de hidrogênio afeta as emissões de poluentes e a eficiência do motor.

Este procedimento metodológico garante a precisão dos dados e oferece uma análise comparativa detalhada das diferentes configurações testadas, contribuindo para o desenvolvimento de motores de combustão interna mais eficientes e sustentáveis.

3.7.6 Considerações sobre os dados de emissões

Ao comparar os resultados das simulações com os dados de emissões de motores diesel convencionais ou do motor de referência, é importante notar que os resultados das simulações foram obtidos diretamente do coletor de descarga, sem qualquer pós-tratamento dos gases de escape. Em contraste, os dados de motores reais incluem as emissões após a aplicação de tecnologias de pós-tratamento, como sistemas de recirculação de gases de escape (EGR), filtros de partículas diesel (DPF), e catalisadores de redução seletiva (SCR).

Essa distinção é crucial, pois os sistemas de pós-tratamento em motores reais reduzem significativamente as emissões de NO_x, fuligem e outros poluentes. Portanto, as emissões obtidas nas simulações tendem a ser mais elevadas, refletindo uma condição anterior ao tratamento dos gases. Ao interpretar os resultados de emissões apresentados no Capítulo 4, essa diferença metodológica deve ser levada em consideração para uma comparação justa e adequada.

3.8 HARDWARE UTILIZADOS E TEMPO DAS SIMULAÇÕES

Para as simulações foram utilizados um laptop da marca Dell modelo G5 15, com 16 GB de Ram, e um processador Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU @ 2.30 GHz com windows 11 Pro e um computador Dell Optiplex 5070, 64 GB de Ram, um processador Intel(R) Core(TM) i5-9500 CPU @ 3.00 GHz com windows 10 Professional para rodar o software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1.

Tempo de simulação total: 74 dias, *full time*.

Tempo de pós processamento: 15 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir das simulações numéricas realizadas com o software AVL-FIRE™ M, versão 2023 R1 após o seu pós processamento. O objetivo principal é avaliar os efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e da redução da quantidade de diesel injetado no desempenho e nas emissões de um motor de combustão interna ciclo diesel. Foram exploradas diversas proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%) e diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM), buscando identificar os impactos sobre a eficiência térmica, potência gerada e as emissões de poluentes, como CO₂, CO, NO_x e fuligem (*soot*).

A análise detalhada dos resultados visa fornecer uma compreensão profunda das vantagens e limitações da utilização de hidrogênio como aditivo no ciclo diesel, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e eficientes para motores de combustão interna.

Observação importante: Alguns valores apresentados nos resultados, como por exemplo de CO₂ podem estar superestimados em função da abordagem numérica (TABKIN + Modelo de combustão), além disso não foram encontrados valores plausíveis de comparação de CO₂ (na saída da válvula de exaustão) na literatura.

4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

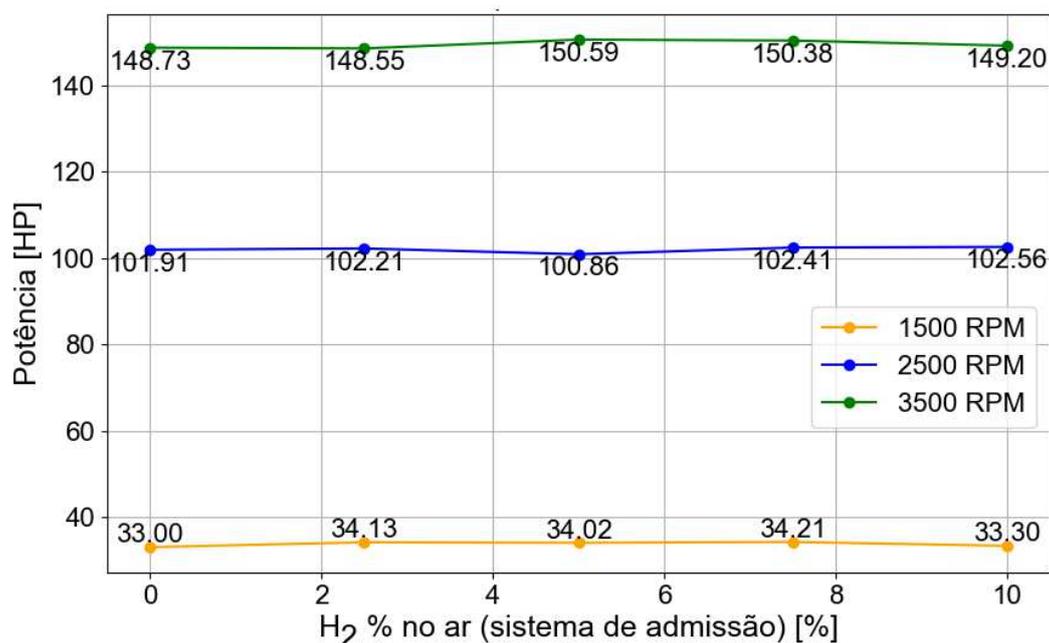
4.1.1 Potência do motor

A potência do motor foi o principal parâmetro utilizado para avaliar o desempenho nas simulações. A análise da potência foi realizada em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM) e para diversas proporções de hidrogênio adicionadas à mistura ar/combustível. Os valores de potência foram comparados com os dados do motor VW 2.0 TDI EA288 para validar a precisão do modelo.

4.1.1.1 Resultados de potência a 1500, 2500 e 3500 RPM

O objetivo principal das simulações foi ajustar as variáveis de forma a manter a potência do motor semelhante à do motor de referência VW EA288 nas rotações estudadas (1500, 2500 e 3500 RPM), sem ganhos ou perdas significativas. A análise dos resultados indica que, de maneira geral, esse objetivo foi alcançado, embora com algumas pequenas variações em determinadas proporções de hidrogênio conforme pode-se verificar na Figura 12 e a Tabela 8.

Figura 12 – Gráfico potência a 1500, 2500 e 3500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 8 – Valores de potência e variação para diferentes rotações

H ₂ (%)	Potência (HP) a 1500 RPM	Variação (%)	Potência (HP) a 2500 RPM	Variação (%)	Potência (HP) a 3500 RPM	Variação (%)
0,0	33,00	0,00	101,91	0,00	148,73	0,00
2,5	34,13	+3,42	102,21	+0,29	148,55	-0,12
5,0	34,02	+3,09	100,86	-1,03	150,59	+1,25
7,5	34,21	+3,67	102,41	+0,49	150,38	+1,11
10,0	33,30	+0,91	102,56	+0,64	149,20	+0,32

Fonte: o autor

A 1500 RPM, a potência de referência era de 33.0 HP. A adição de hidrogênio resultou em pequenos aumentos de potência, especialmente nas proporções de 2.5% e 5%, que apresentaram variações de +3.42% e +3.09%, respectivamente. A adição de 10% de H₂ manteve a potência praticamente inalterada, com uma variação de apenas +0.91%.

A 2500 RPM, com uma potência de referência de 101.91 HP, as variações foram mínimas. A proporção de 2.5% de H₂ apresentou um aumento de +0.29%, enquanto

10% de H₂ resultou em um aumento de +0.64%. A única exceção foi com 5% de H₂, onde houve uma leve redução de -1.03%.

A 3500 RPM, com uma potência de referência de 148.73 HP, as proporções de 5% e 7.5% de H₂ resultaram em variações positivas de +1.25% e +1.11%, respectivamente. As outras proporções também mantiveram a potência muito próxima do valor de referência, com variações mínimas.

Os resultados das simulações indicam que o objetivo de manter uma potência semelhante à do motor VW EA288 foi cumprido com sucesso. Em todas as rotações testadas (1500, 2500 e 3500 RPM), as variações na potência foram mínimas e dentro de uma faixa aceitável, o que demonstra a eficácia das simulações em ajustar as variáveis para alcançar o desempenho desejado. Mesmo com a adição de hidrogênio, o motor foi capaz de manter a potência dentro dos limites estabelecidos, cumprindo o objetivo central das simulações.

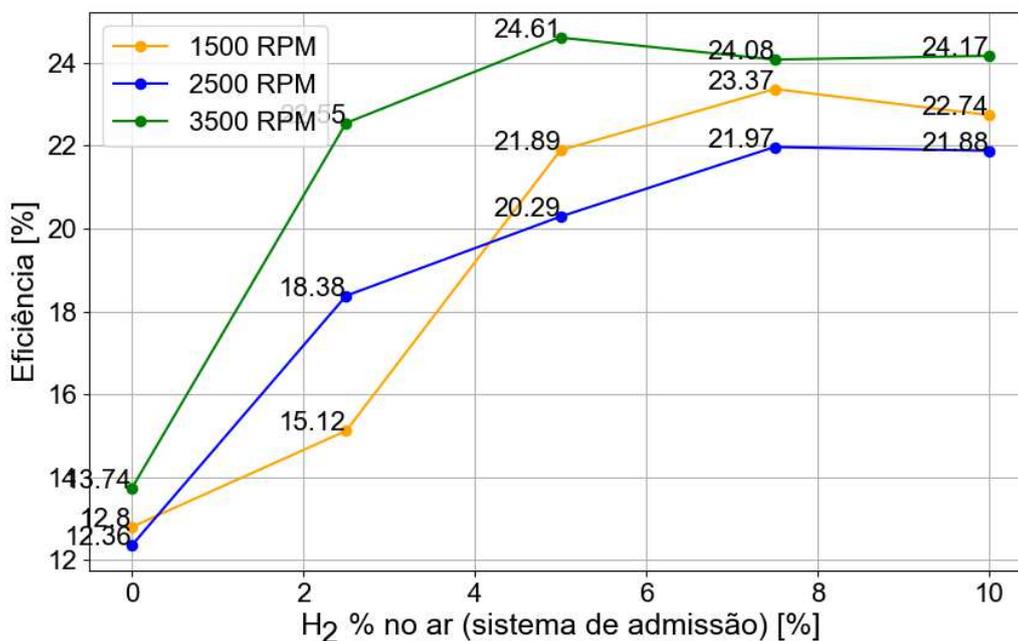
4.1.2 Eficiência térmica

A eficiência térmica dos motores de combustão interna ciclo diesel foi avaliada com base nas simulações realizadas para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível e em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM). Para o cálculo da eficiência térmica foi utilizada a Equação (26)A seguir, são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.1.2.1 Resultados de eficiência térmica a 1500, 2500 e 3500 RPM

Os resultados de eficiência térmica apresentados na Figura 13 e na Tabela 9 mostram como a adição de hidrogênio ao sistema de admissão impacta a eficiência do motor em diferentes rotações (1500, 2500 e 3500 RPM).

Figura 13 – Gráfico eficiência a 1500, 2500 e 3500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 9 – Valores de eficiência térmica e variação para diferentes rotações

H ₂ (%)	Eficiência (%) a 1500 RPM	Variação (%)	Eficiência (%) a 2500 RPM	Variação (%)	Eficiência (%) a 3500 RPM	Variação (%)
0,0	12,80	0,00	12,36	0,00	13,74	0,00
2,5	15,12	18,13	18,38	48,70	22,55	64,18
5,0	21,89	70,86	20,29	64,13	23,64	72,15
7,5	23,37	82,58	21,97	77,71	24,63	79,24
10,0	22,74	77,81	21,88	77,00	24,17	75,95

Fonte: o autor

A 1500 RPM resultou em um aumento significativo na eficiência térmica, que passou de 12,80% sem hidrogênio para 23,37% com 7,5% de H₂, representando um incremento de 82,58%. No entanto, ao aumentar para 10% de H₂, a eficiência caiu ligeiramente para 22,74%, sugerindo uma saturação na eficiência com maiores proporções de hidrogênio.

A 2500 RPM, a eficiência também aumentou com a adição de hidrogênio, atingindo 21,97% com 7,5% de H₂, um incremento de 77,71%. Assim como a 1500 RPM,

ao elevar para 10% de H₂, a eficiência manteve-se estável em 21.88%, indicando que 7.5% pode ser o ponto ideal para essa rotação.

A 3500 RPM, a eficiência térmica seguiu o mesmo padrão de aumento, passando de 13.74% sem hidrogênio para 24.63% com 7.5% de H₂, representando um incremento de 79.24%. Novamente, com 10% de H₂, a eficiência foi ligeiramente menor, ficando em 24.17%, sugerindo que proporções acima de 7.5% não trazem benefícios adicionais significativos nessa rotação.

A adição de hidrogênio ao sistema de admissão tem um efeito positivo claro na eficiência térmica do motor em todas as rotações estudadas. O aumento na eficiência é mais pronunciado nas rotações mais baixas (1500 RPM), mas continua significativo em 2500 e 3500 RPM. O ponto ótimo parece ser em torno de 7.5% de H₂ para todas as rotações, onde a eficiência é maximizada antes de começar a cair ligeiramente com proporções maiores. Estes resultados sugerem que a adição controlada de hidrogênio pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a eficiência térmica dos motores de combustão interna, especialmente em operações onde a eficiência energética é crucial.

4.1.3 Emissões

A análise das emissões de gases poluentes em motores de combustão interna ciclo diesel, com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e a redução do diesel injetado, é fundamental para entender os impactos ambientais e a eficiência energética desses motores. Este estudo utiliza simulações numéricas para avaliar o comportamento das emissões de CO, CO₂, NO_x e fuligem (*soot*) em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM) e proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%). Os resultados fornecem uma visão detalhada sobre como essas variáveis influenciam as emissões, permitindo identificar estratégias para otimizar a eficiência dos motores e reduzir o impacto ambiental.

4.1.3.1 Emissões de CO

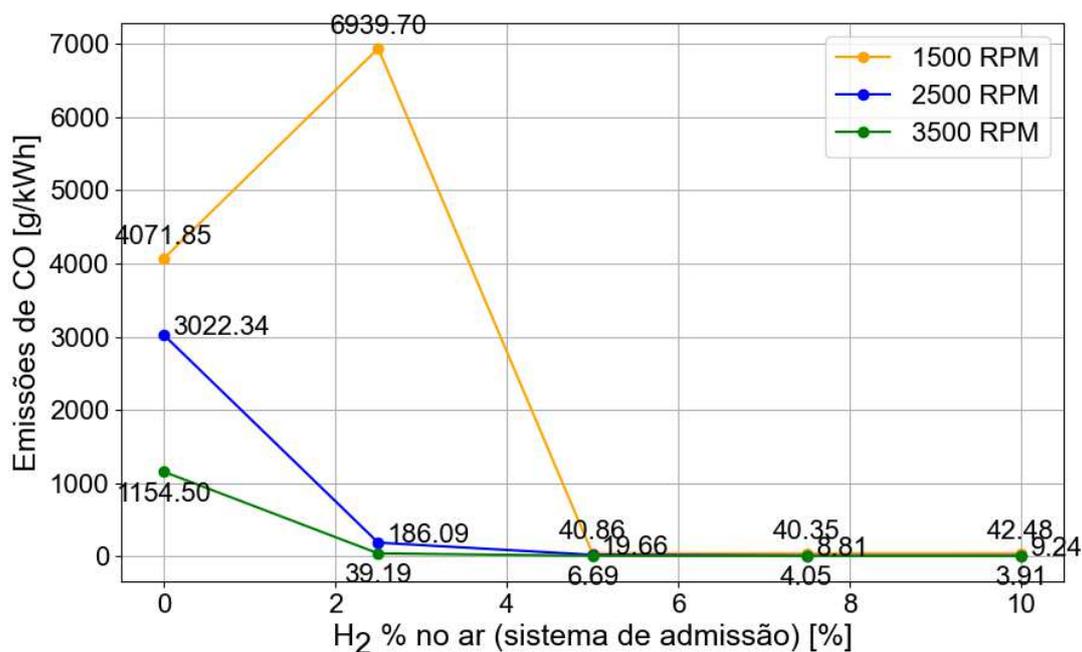
A análise das emissões de monóxido de carbono (CO) em motores de combustão interna ciclo diesel, com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e a redução do diesel injetado, é essencial para compreender os impactos ambientais e a eficiência desses motores. Este estudo utiliza simulações numéricas para avaliar o comportamento das emissões de CO em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM) e proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%).

4.1.3.1.1 Resultados das simulações

A análise dos resultados de emissões de CO conforme apresentado na Figura 14 e na Tabela 10 revela o impacto significativo da adição de hidrogênio ao sistema de

admissão em diferentes rotações do motor.

Figura 14 – Gráfico de emissões de CO



Fonte: o autor

Tabela 10 – Valores de emissões de CO e variação para diferentes rotações

H ₂ (%)	CO (g/kWh) a 1500 RPM	Varição (%)	CO (g/kWh) a 2500 RPM	Varição (%)	CO (g/kWh) a 3500 RPM	Varição (%)
0,0	4071,85	0,00	3022,34	0,00	1154,5	0,00
2,5	6939,7	70,43	39,19	-98,70	186,09	-83,88
5,0	40,86	-99,00	6,69	-99,78	19,66	-98,30
7,5	40,35	-99,01	4,05	-99,87	8,81	-99,24
10,0	42,48	-98,96	3,91	-99,87	9,24	-99,20

Fonte: o autor

Para 1500 RPM, as emissões de CO aumentaram drasticamente ao adicionar 2.5% de H₂, com um pico de 6939.7 g/kWh, representando um incremento de 70.43% em relação à condição sem hidrogênio. No entanto, com maiores proporções de hidrogênio (5% a 10%), houve uma redução drástica nas emissões, com valores em torno de 40 g/kWh e um decréscimo percentual de cerca de 99%, sugerindo uma melhoria significativa na combustão com uma maior quantidade de hidrogênio.

A 2500 RPM, a adição de hidrogênio resultou em uma diminuição substancial nas emissões de CO, com reduções de até 99.87% para as proporções de 7.5% e 10% de H₂. Esses resultados indicam que a adição de hidrogênio é particularmente eficaz nessa rotação para minimizar as emissões de CO, melhorando a eficiência da combustão.

A 3500 RPM, observou-se um padrão semelhante, com uma redução nas emissões de CO conforme a proporção de hidrogênio aumentava. As emissões de CO foram reduzidas de 1154.5 g/kWh sem hidrogênio para apenas 9.24 g/kWh com 10% de H₂, correspondendo a uma redução de 99.2%. Essa tendência confirma a eficácia do hidrogênio em diminuir as emissões de CO em altas rotações.

A análise indica que a adição de hidrogênio ao sistema de admissão melhora significativamente a qualidade da combustão, resultando em uma redução substancial nas emissões de CO, especialmente em maiores proporções de H₂. No entanto, o pico observado a 1500 RPM com 2.5% de H₂ sugere que há uma complexidade nos efeitos iniciais da adição de hidrogênio que merece uma investigação mais detalhada. Em geral, os resultados suportam a viabilidade do uso de hidrogênio como um complemento ao diesel para reduzir as emissões de poluentes, com impacto positivo mais evidente em rotações mais altas.

4.1.3.2 Emissões de CO₂

A análise das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em motores de combustão interna ciclo diesel, com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e a redução do diesel injetado, é fundamental para entender os impactos ambientais e a eficiência energética desses motores. Este estudo utiliza simulações numéricas para avaliar o comportamento das emissões de CO₂ em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM) e proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%). Os resultados fornecem uma visão detalhada sobre como essas variáveis influenciam as emissões de CO₂, permitindo identificar estratégias para otimizar a eficiência dos motores e reduzir o impacto ambiental.

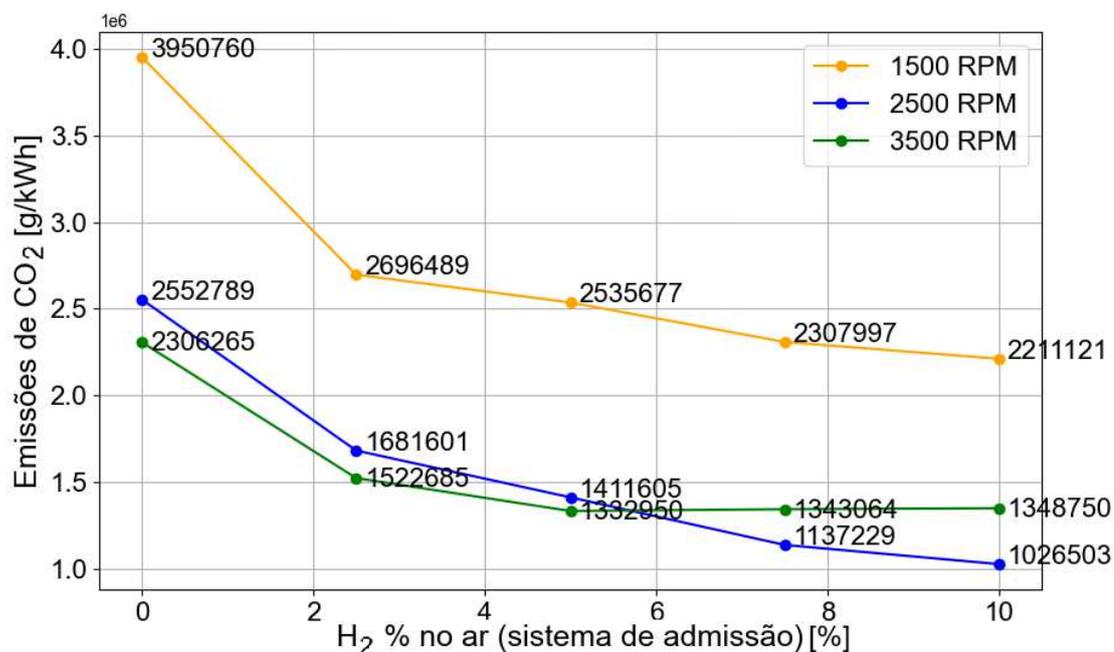
Observação importante: Os valores apresentados nos resultados de CO₂ podem estar superestimados em função da abordagem numérica (TABKIN + Modelo de combustão), além disso não foram encontrados valores plausíveis de comparação de CO₂ (na saída da válvula de exaustão) na literatura.

4.1.3.2.1 Resultados das simulações

A análise das emissões de CO₂ conforme ilustrado na Figura 15 e na Tabela 11 revela o impacto significativo da adição de hidrogênio na mistura ar/combustível sobre

as emissões de CO₂ em diferentes rotações do motor.

Figura 15 – Gráfico de emissões de CO₂



Fonte: o autor

Tabela 11 – Valores de emissões de CO₂ e variação para diferentes rotações

H ₂ (%)	CO ₂ (g/kWh) a 1500 RPM	Variação (%)	CO ₂ (g/kWh) a 2500 RPM	Variação (%)	CO ₂ (g/kWh) a 3500 RPM	Variação (%)
0,0	3950759,59	0,00	2552789,0	0,00	2306265,0	0,00
2,5	2696488,51	-31,75	1681601,0	-34,13	1522685,0	-33,98
5,0	2535677,39	-35,82	1411605,0	-44,7	1332950,0	-42,2
7,5	2307997,41	-41,58	1137229,0	-55,45	1343064,0	-41,76
10,0	2211121,25	-44,03	1026503,0	-59,79	1348750,0	-41,52

Fonte: o autor

Para 1500 RPM, as emissões de CO₂ diminuíram consistentemente com o aumento da proporção de hidrogênio. Partindo de 3950759.59 g/kWh sem hidrogênio, as emissões caíram para 2211121.25 g/kWh com 10% de hidrogênio, representando uma redução de 44.03%. Essa tendência de redução contínua sugere que a adição de

hidrogênio melhora a eficiência da combustão, resultando em menores emissões de CO₂.

A 2500 RPM, a tendência de redução das emissões de CO₂ é ainda mais pronunciada. Com o aumento da proporção de hidrogênio, as emissões caíram de 2552789.0 g/kWh (sem hidrogênio) para 1026503.0 g/kWh com 10% de hidrogênio, resultando em uma redução significativa de 59.79%. Essa redução maior em comparação com a rotação de 1500 RPM indica que o efeito do hidrogênio na melhoria da combustão é mais acentuado a esta rotação intermediária.

A 3500 RPM, as emissões de CO₂ também diminuem com a adição de hidrogênio, embora a variação não seja tão linear quanto nas rotações anteriores. As emissões caíram de 2306265.0 g/kWh para 1348750.0 g/kWh, o que corresponde a uma redução de 41.52%. Apesar de a redução não ser tão grande quanto a observada a 2500 RPM, ainda é significativa e demonstra a eficácia da adição de hidrogênio para reduzir as emissões de CO₂ em alta rotação.

A análise indica que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível é uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de CO₂ em motores diesel, especialmente a rotações mais baixas e intermediárias. A maior redução observada a 2500 RPM sugere que essa rotação é a mais favorável para a introdução de hidrogênio, provavelmente devido a uma combinação otimizada entre a eficiência de combustão e o ciclo de operação do motor. Esses resultados suportam a viabilidade do uso de hidrogênio como uma solução complementar para mitigar as emissões de CO₂ em motores de combustão interna.

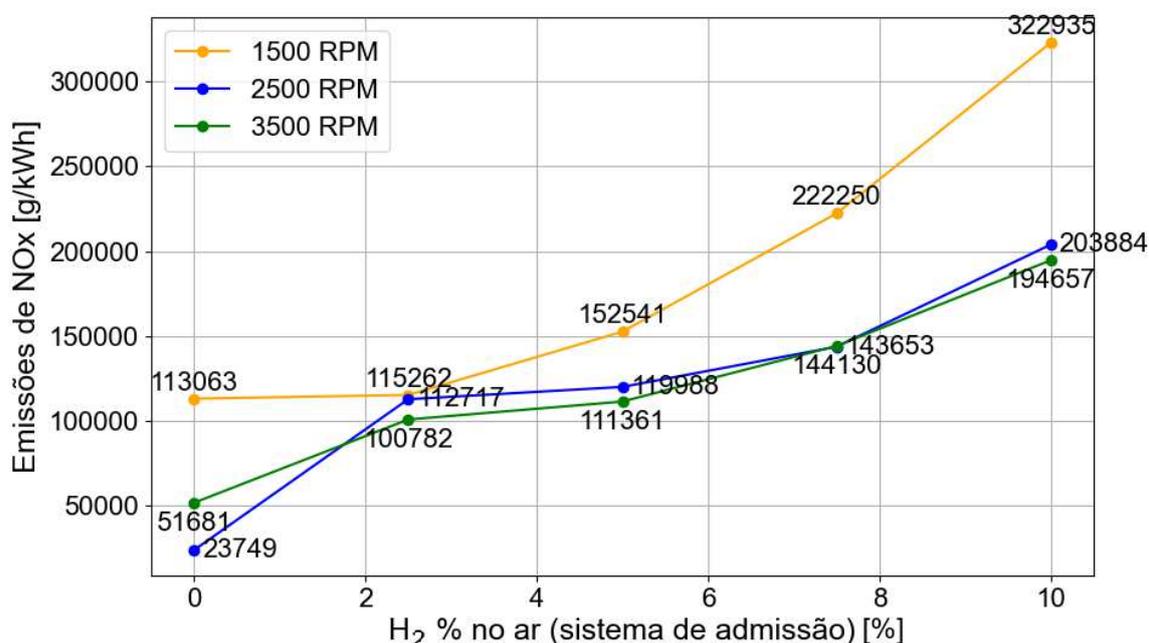
4.1.3.3 Emissões de NOx

A análise das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) em motores de combustão interna ciclo diesel, com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e a redução do diesel injetado, é fundamental para entender os impactos ambientais e a eficiência energética desses motores. Este estudo utiliza simulações numéricas para avaliar o comportamento das emissões de NOx em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM) e proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%). Os resultados fornecem uma visão detalhada sobre como essas variáveis influenciam as emissões de NOx, permitindo identificar estratégias para otimizar a eficiência dos motores e reduzir o impacto ambiental.

4.1.3.3.1 Resultados das simulações

A análise das emissões de NOx apresentadas na Figura 16 e na Tabela 12 revela o impacto significativo da adição de hidrogênio na mistura ar/combustível sobre as emissões de NOx em diferentes rotações do motor.

Figura 16 – Gráfico de emissões de NOx



Fonte: o autor

Tabela 12 – Valores de emissões de NOx e variação para diferentes rotações

H ₂ (%)	NOx (g/kWh) a 1500 RPM	Variação (%)	NOx (g/kWh) a 2500 RPM	Variação (%)	NOx (g/kWh) a 3500 RPM	Variação (%)
0,0	113062,68	0,00	23749,32	0,00	51681,36	0,00
2,5	115261,78	1,95	112717,40	374,61	100782,17	95,01
5,0	152541,11	34,92	119988,00	405,23	111361,27	115,48
7,5	222250,06	96,57	143652,80	504,87	144130,00	178,88
10,0	322935,19	185,62	203833,50	758,27	194657,43	276,65

Fonte: o autor

Para 1500 RPM, observa-se um aumento progressivo nas emissões de NOx com o aumento da proporção de hidrogênio. As emissões aumentam de 113062.68 g/kWh sem hidrogênio para 322935.19 g/kWh com 10% de hidrogênio, representando um incremento de 185.62%. Esse comportamento é esperado, uma vez que o hidrogênio contribui para temperaturas de combustão mais altas, favorecendo a formação de NOx.

A 2500 RPM, o aumento das emissões de NO_x é ainda mais acentuado. Com a adição de hidrogênio, as emissões passam de 23749.32 g/kWh (sem hidrogênio) para 203833.50 g/kWh com 10% de hidrogênio, resultando em um aumento expressivo de 758.27%. A elevação significativa nas emissões a esta rotação pode ser atribuída à maior eficiência de combustão combinada com temperaturas ainda mais elevadas na câmara de combustão, promovendo a formação de NO_x.

A 3500 RPM, embora o aumento das emissões de NO_x com a adição de hidrogênio também seja notável, é menos extremo em comparação com 2500 RPM. As emissões sobem de 51681.36 g/kWh para 194657.43 g/kWh, representando um incremento de 276.65%. Apesar de o aumento ser significativo, ele segue uma tendência mais controlada devido ao possível efeito de fatores como a diluição da mistura e o menor tempo de residência dos gases em altas rotações.

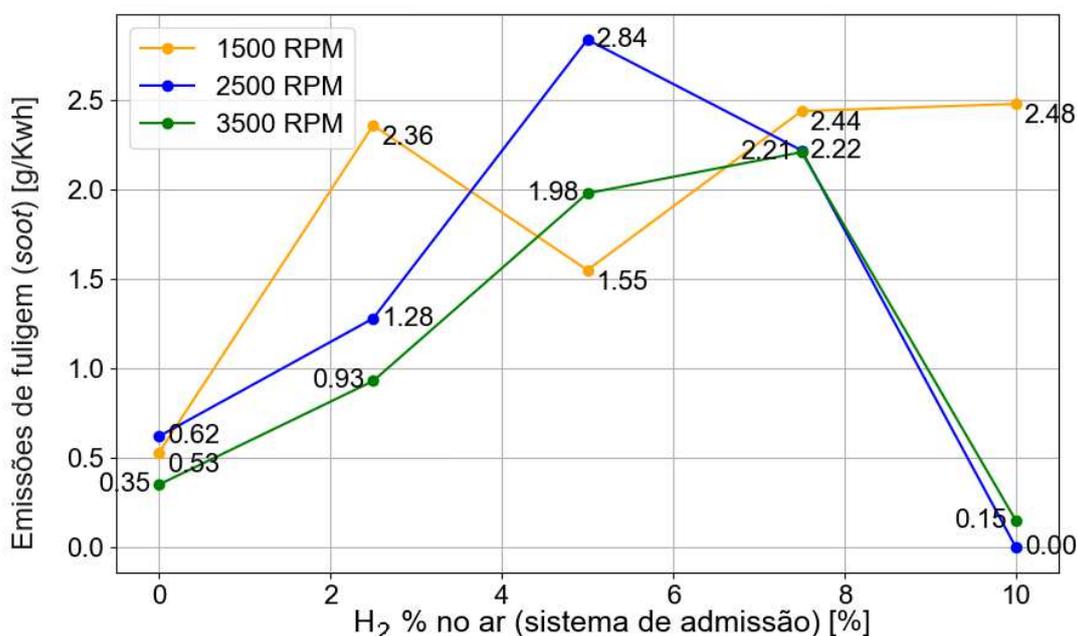
A análise mostra que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível resulta em um aumento pronunciado nas emissões de NO_x, especialmente em rotações intermediárias (2500 RPM). Esse comportamento destaca um desafio importante no uso de hidrogênio como combustível complementar em motores de combustão interna: a necessidade de controlar e mitigar as emissões de NO_x, possivelmente através de tecnologias de pós-tratamento ou ajustes nos parâmetros de operação do motor para balancear a eficiência da combustão com as emissões de poluentes.

4.1.3.4 Emissões de fuligem (*soot*)

A análise das emissões de fuligem (*soot*) em motores de combustão interna ciclo diesel, com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e a redução do diesel injetado, é fundamental para entender os impactos ambientais e a eficiência energética desses motores. Este estudo utiliza simulações numéricas para avaliar o comportamento das emissões de fuligem em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM) e proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%). Os resultados fornecem uma visão detalhada sobre como essas variáveis influenciam as emissões de fuligem, permitindo identificar estratégias para otimizar a eficiência dos motores e reduzir o impacto ambiental.

4.1.3.4.1 Resultados das simulações

A análise dos resultados de emissões de fuligem (*soot*) ao longo das diferentes rotações e com diferentes proporções de H₂ na mistura de admissão revela comportamentos distintos que dependem da rotação e da quantidade de hidrogênio adicionada conforme Figura 17 e Tabela 13.

Figura 17 – Gráfico de emissões de fuligem (*soot*)

Fonte: o autor

Tabela 13 – Valores de emissões de fuligem (*soot*) e variação para diferentes rotações

H ₂ (%)	<i>soot</i> (g/kWh) a 1500 RPM	Variação (%)	<i>soot</i> (g/kWh) a 2500 RPM	Variação (%)	<i>soot</i> (g/kWh) a 3500 RPM	Variação (%)
0,0	0,53	0,00	0,62	0,00	0,35	0,00
2,5	2,36	346,05	1,28	106,33	0,93	165,71
5,0	1,55	192,72	2,84	357,65	1,98	465,71
7,5	2,44	360,99	2,22	256,98	2,21	531,43
10,0	2,48	368,13	0,00	-100,00	0,15	-57,14

Fonte: o autor

Em 1500 RPM, observou-se um aumento significativo nas emissões de fuligem à medida que a proporção de hidrogênio na mistura de admissão aumentou. As emissões começaram em 0,53 g/kWh com 0% de H₂ e subiram para 2,48 g/kWh com 10% de H₂, representando um incremento de 368,13%. Esse aumento acentuado indica que, em baixas rotações, a combustão do hidrogênio pode não ser tão eficiente, possivelmente devido a uma temperatura de combustão insuficiente para queimar completamente o carbono, resultando em maior formação de fuligem.

Em 2500 RPM, as emissões de fuligem mostraram um comportamento variável. Começando em 0.62 g/kWh com 0% de H₂, as emissões aumentaram para um pico de 2.84 g/kWh com 5% de H₂, mas caíram drasticamente para 0.00 g/kWh com 10% de H₂. Este comportamento sugere que, em rotações intermediárias, o sistema de combustão pode atingir uma temperatura ideal para a queima completa do carbono, especialmente com 10% de H₂, eliminando completamente a fuligem.

Por outro lado, em 3500 RPM, as emissões de fuligem inicialmente aumentaram de 0.35 g/kWh para 2.21 g/kWh com 7.5% de H₂, mas com 10% de H₂ as emissões caíram drasticamente para 0.15 g/kWh, refletindo uma variação negativa de -57.14%. Isso indica que, em rotações mais altas, a combustão torna-se mais eficiente devido à maior temperatura e turbulência no cilindro, resultando em uma significativa redução nas emissões de fuligem quando uma maior quantidade de hidrogênio é adicionada.

Sendo assim, a adição de hidrogênio à mistura de admissão tem um impacto considerável nas emissões de fuligem, mas os efeitos variam com a rotação do motor. Em baixas rotações, o hidrogênio tende a aumentar as emissões de fuligem, enquanto em rotações mais altas, particularmente a 3500 RPM com 10% de H₂, ocorre uma combustão mais limpa, reduzindo significativamente as emissões de fuligem. Isso sugere que a eficiência de combustão e o controle de emissões podem ser otimizados ajustando a proporção de H₂ de acordo com a rotação do motor.

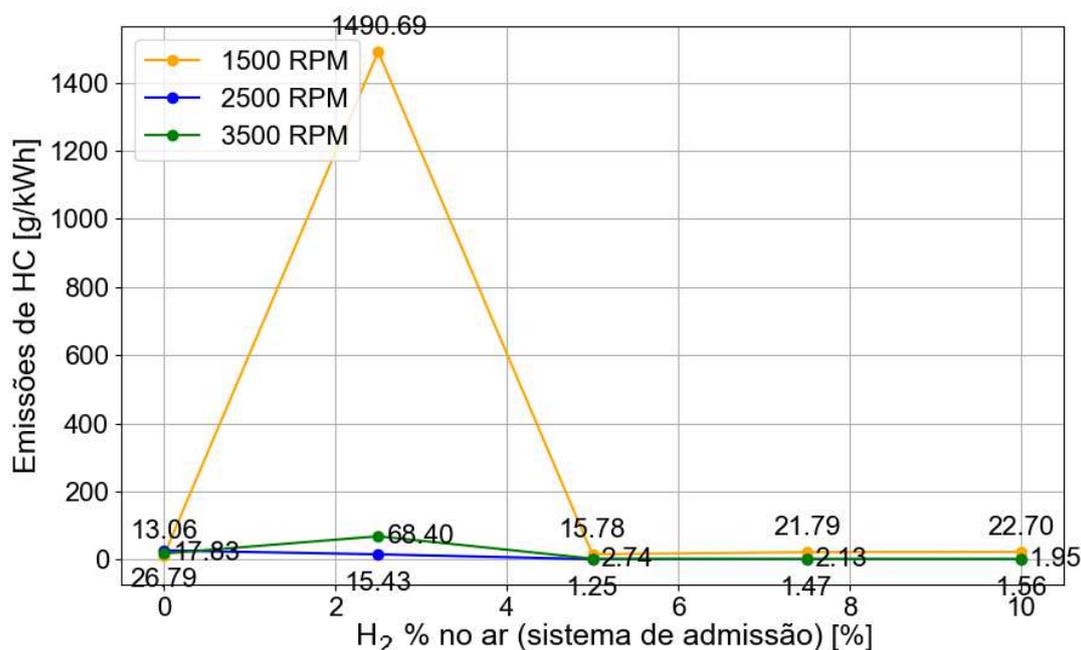
4.1.3.5 Emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC)

A análise das emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC) em motores de combustão interna ciclo diesel, com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e a redução do diesel injetado, é fundamental para entender os impactos ambientais e a eficiência energética desses motores. Este estudo utiliza simulações numéricas para avaliar o comportamento das emissões de HC em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM) e proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%). Os resultados fornecem uma visão detalhada sobre como essas variáveis influenciam as emissões de HC, permitindo identificar estratégias para otimizar a eficiência dos motores e reduzir o impacto ambiental.

4.1.3.5.1 Resultados das simulações

A análise das emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC) em função da adição de hidrogênio à mistura de admissão e da rotação do motor revela comportamentos distintos que refletem as complexidades do processo de combustão em motores de combustão interna. A seguir, são apresentados na Figura 18 e na Tabela 14 os resultados obtidos para cada rotação do motor.

Figura 18 – Gráfico de emissões de HC



Fonte: o autor

Tabela 14 – Valores de emissões de HC e variação para diferentes rotações

H ₂ (%)	HC (g/kWh) a 1500 RPM	Variação (%)	HC (g/kWh) a 2500 RPM	Variação (%)	HC (g/kWh) a 3500 RPM	Variação (%)
0,0	13,06	0,00	26,79	0,00	17,83	0,00
2,5	1490,69	11312,23	15,43	-42,41	68,40	283,43
5,0	15,78	20,86	1,25	-95,33	2,74	-84,61
7,5	21,79	66,82	1,47	-94,50	2,13	-88,06
10,0	22,70	73,80	1,56	-94,16	1,95	-89,06

Fonte: o autor

Para a rotação de 1500 RPM, as emissões de HC aumentaram drasticamente com a adição de 2,5% de H₂, atingindo um pico de 1490,69 g/kWh, o que sugere uma combustão ineficiente. À medida que a proporção de H₂ aumenta além desse ponto, as emissões caem significativamente, indicando uma queima mais completa.

Na rotação de 2500 RPM, as emissões de HC começaram altas sem H₂, mas diminuíram de forma consistente com o aumento da proporção de hidrogênio, alcan-

çando uma redução de 94,16% com 10% de H₂, mostrando uma eficiência de combustão maior nessa faixa.

A 3500 RPM, as emissões de HC também aumentaram inicialmente com 2,5% de H₂, chegando a 68,40 g/kWh, mas diminuíram significativamente à medida que mais hidrogênio foi adicionado, refletindo um comportamento semelhante ao observado a 1500 RPM.

Sendo assim, a adição de hidrogênio influencia as emissões de HC de maneira diferente dependendo da rotação do motor. Nas rotações mais baixas e mais altas, pequenas quantidades de H₂ podem aumentar as emissões inicialmente, mas doses maiores tendem a melhorar a combustão. Já na rotação de 2500 RPM, o hidrogênio reduz as emissões de HC de forma mais consistente, sugerindo que essa faixa de rotação é a mais adequada para a adição de hidrogênio em motores de combustão interna.

4.1.4 Consumo de combustível

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações realizadas para avaliar o consumo de combustível em um motor ciclo diesel, com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível. As simulações foram realizadas em três rotações diferentes do motor (1500, 2500 e 3500 RPM) e para diferentes proporções de hidrogênio (0%, 2.5%, 5%, 7.5% e 10%). Os dados coletados incluem o fluxo de energia do diesel, e os incrementos em porcentagem comparado com a condição sem hidrogênio.

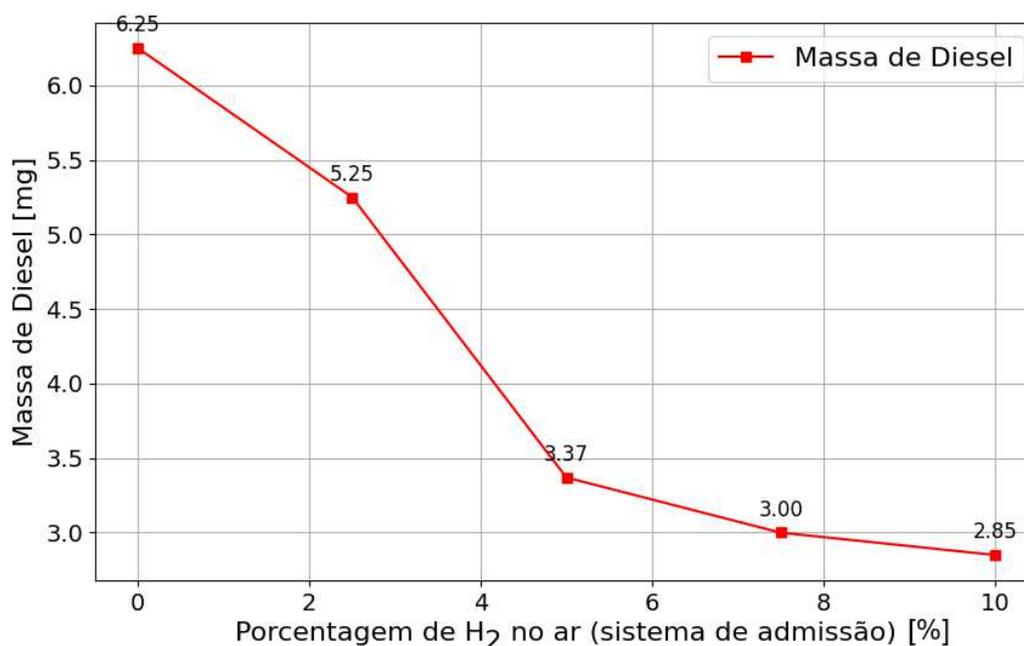
Os resultados apresentados a seguir mostram o impacto da adição de hidrogênio no consumo de diesel, destacando as reduções observadas para cada proporção de hidrogênio e rotação do motor.

4.1.4.1 Consumo de diesel

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas simulações do consumo de diesel com a adição de diferentes proporções de hidrogênio (H₂) à mistura ar/combustível em um motor de combustão interna ciclo diesel. Os resultados são analisados para três diferentes rotações do motor: 1500 RPM, 2500 RPM e 3500 RPM. Para cada rotação, são apresentadas tabelas detalhadas com as massas de diesel injetadas, a variação percentual em relação à condição sem hidrogênio, e gráficos ilustrando a redução no consumo de diesel.

4.1.4.1.1 Resultados das simulações para 1500 RPM

Figura 19 – Gráfico de massa de diesel injetado a 1500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 15 – Valores de massa de diesel injetado a 1500 RPM

Proporção de H ₂ (%)	Massa Injetor 1 (mg)	Massa Injetor 2 (mg)	Massa Total de Diesel (mg)	Varição (%)
0,0	0,50	5,75	6,25	0,00
2,5	0,50	4,75	5,25	-16,00
5,0	0,25	3,12	3,37	-46,08
7,5	0,25	2,75	3,00	-52,00
10,0	0,25	2,60	2,85	-54,40

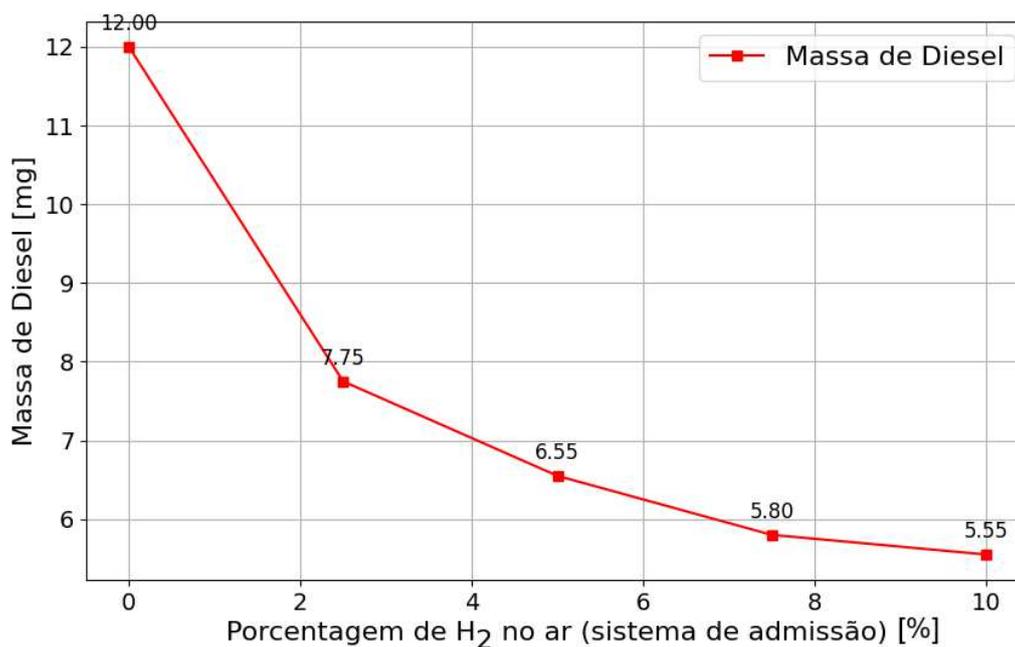
Fonte: o autor

A adição de hidrogênio à mistura ar/combustível em 1500 RPM resultou em uma redução significativa na massa total de diesel injetada. Com a proporção de 10% de H₂, houve uma diminuição de 54.40% na massa total de diesel. Essa redução é notável e indica uma melhoria potencial na eficiência do motor, visto que menos combustível é

necessário para manter o mesmo nível de desempenho. Resultados apresentados na Figura 19 e na Tabela 15.

4.1.4.1.2 Resultados das simulações para 2500 RPM

Figura 20 – Gráfico de massa de diesel injetado a 2500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 16 – Valores de massa de diesel injetado a 2500 RPM

Proporção de H ₂ (%)	Massa Injetor 1 (mg)	Massa Injetor 2 (mg)	Massa Total de Diesel (mg)	Varição (%)
0,0	1,00	11,00	12,00	0,00
2,5	0,75	7,00	7,75	-35,42
5,0	0,75	5,80	6,55	-45,42
7,5	0,70	5,10	5,80	-51,67
10,0	0,70	4,85	5,55	-53,75

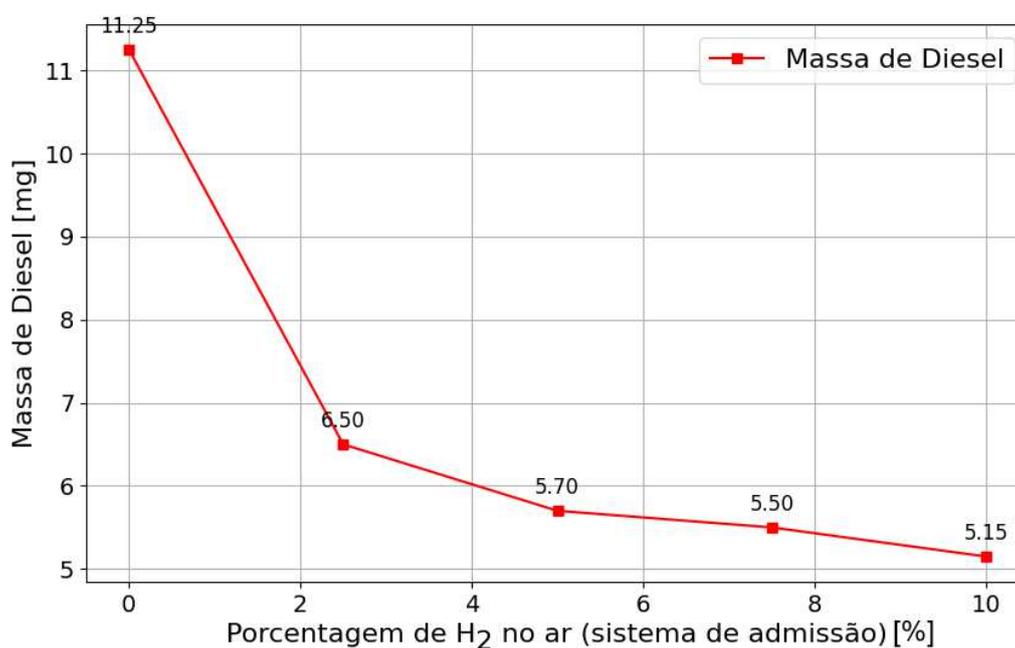
Fonte: o autor

Em 2500 RPM, a adição de hidrogênio também mostrou uma redução substancial na massa total de diesel. Com 10% de H₂, a redução na massa total de diesel

foi de 53.75%. Isso sugere que o hidrogênio pode desempenhar um papel significativo na melhoria da eficiência do motor, mesmo em rotações mais altas. Resultados apresentados na Figura 20 e na Tabela 16.

4.1.4.1.3 Resultados das simulações para 3500 RPM

Figura 21 – Gráfico de massa de diesel injetado a 3500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 17 – Valores de massa de diesel injetado a 3500 RPM

Proporção de H ₂ (%)	Massa Injetor 1 (mg)	Massa Injetor 2 (mg)	Massa Total de Diesel (mg)	Varição (%)
0,0	0,50	10,75	11,25	0,00
2,5	0,50	6,00	6,50	-42,22
5,0	0,50	5,20	5,70	-49,33
7,5	0,50	5,00	5,50	-51,11
10,0	0,50	4,65	5,15	-54,22

Fonte: o autor

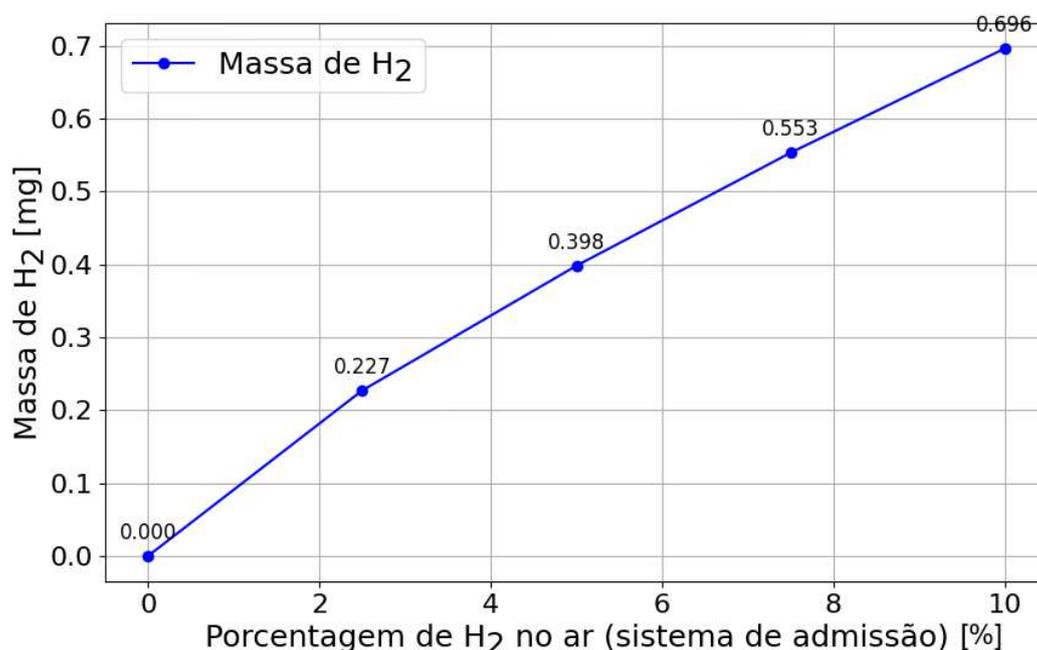
A 3500 RPM, a adição de hidrogênio continuou a mostrar benefícios claros. A redução na massa total de diesel chegou a 54.22% com 10% de H_2 . Isso demonstra que a adição de hidrogênio é eficaz na redução do consumo de diesel em diferentes faixas de rotação do motor. Resultados apresentados na Figura 21 e na Tabela 17.

4.1.4.2 Consumo de hidrogênio

Neste capítulo, será analisado o consumo de hidrogênio nos motores de combustão interna ciclo diesel, utilizando diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%) e em diversas rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM). A análise se baseia nos resultados das simulações numéricas realizadas com o software AVL-FIRE™ M versão 2023 R1, buscando entender o impacto do hidrogênio na eficiência do motor, consumo de combustível e emissões de poluentes.

4.1.4.2.1 Resultados das simulações para 1500 RPM

Figura 22 – Gráfico de massa de hidrogênio a 1500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 18 – Valores de massa de hidrogênio a 1500 RPM

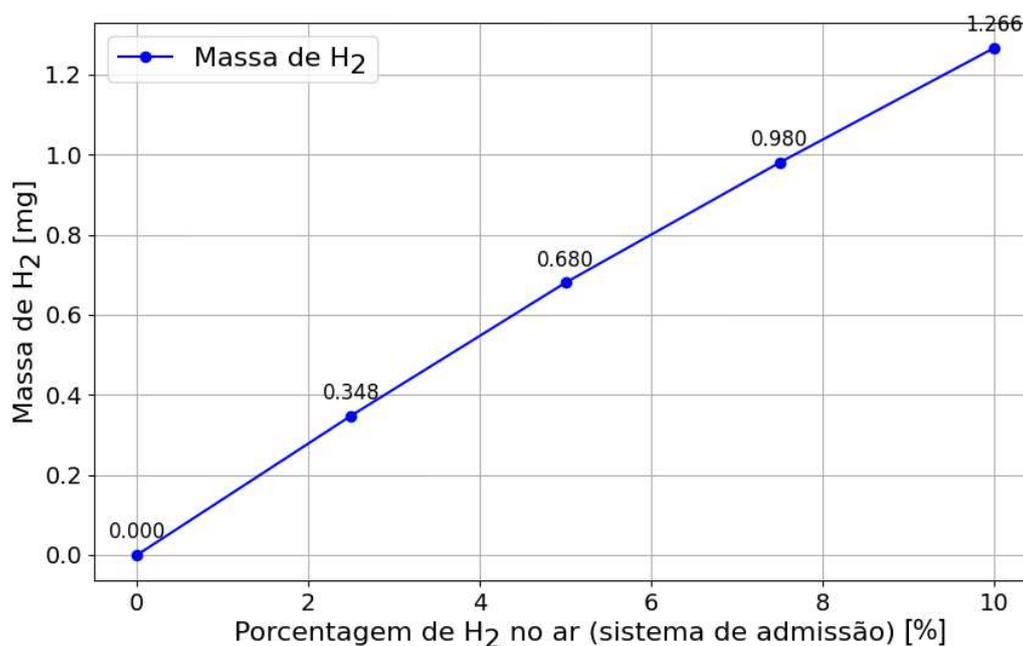
Proporção de H₂ (%)	Pressão (bar)	Fração molar de H₂	Fluxo de energia H₂ (MJ/h)	Massa de H₂ (mg)
0	2,25	1e-06	0,0	0,0
2,5	2,15	0,02505	0,25	0,227
5	1,89	0,05003	0,44	0,398
7,5	1,75	0,075	0,61	0,553
10	1,65	0,1005	0,77	0,696

Fonte: o autor

Os resultados das simulações a 1500 RPM mostraram que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível impacta significativamente o consumo específico de hidrogênio (iSFC). Observou-se que, com o aumento da proporção de hidrogênio, o consumo de hidrogênio aumentou de forma proporcional. Para a proporção de 2,5% de hidrogênio, o consumo específico foi de 0.227 mg, enquanto para 10% de hidrogênio, o consumo específico chegou a 0.696 mg. Esse aumento é esperado devido à maior quantidade de hidrogênio necessária para manter a potência do motor. Resultados apresentados na Figura 22 e na Tabela 18.

4.1.4.2.2 Resultados das simulações para 2500 RPM

Figura 23 – Gráfico de massa de hidrogênio a 2500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 19 – Valores de massa de hidrogênio a 2500 RPM

Proporção de H ₂ (%)	Pressão (bar)	Fração molar de H ₂	Fluxo de energia H ₂ (MJ/h)	Massa de H ₂ (mg)
0	3,575	1e-05	0,0	0,0
2,5	3,3	0,02505	0,64	0,348
5	3,225	0,05003	1,26	0,680
7,5	3,1	0,075	1,81	0,980
10	3	0,10005	2,34	1,266

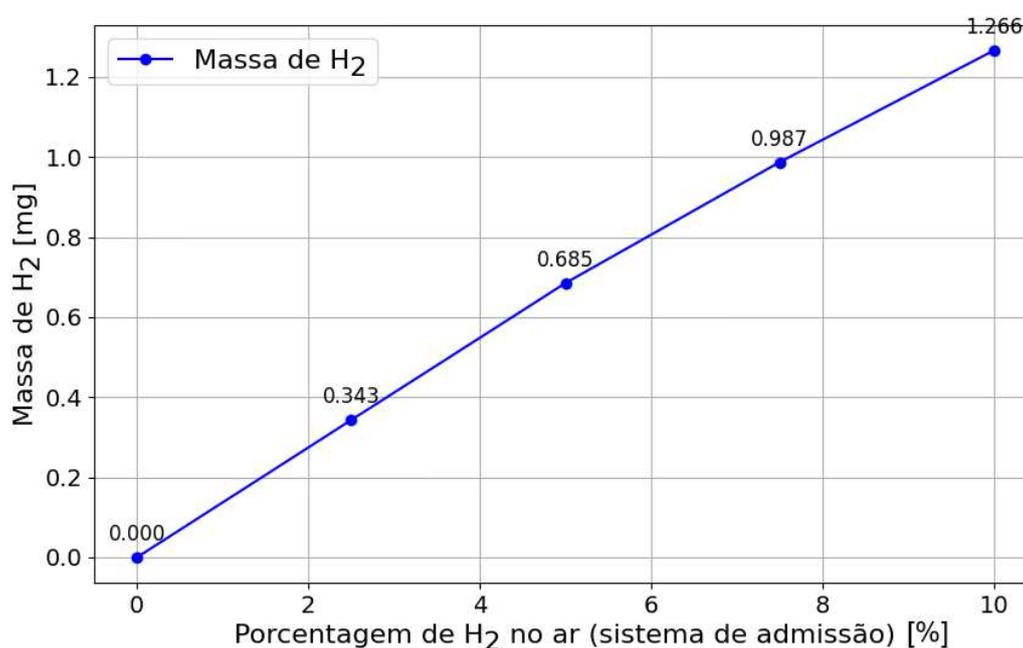
Fonte: o autor

Os resultados das simulações a 2500 RPM mostraram que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível impacta significativamente o consumo específico de hidrogênio (iSFC). Observou-se que, com o aumento da proporção de hidrogênio, o consumo de hidrogênio aumentou de forma proporcional. Para a proporção de 2,5% de

hidrogênio, o consumo específico foi de 0.348 mg, enquanto para 10% de hidrogênio, o consumo específico chegou a 1.266 mg. Esse aumento é esperado devido à maior quantidade de hidrogênio necessária para manter a potência do motor, especialmente em rotações intermediárias. Resultados apresentados na Figura 23 e na Tabela 19.

4.1.4.2.3 Resultados das simulações para 3500 RPM

Figura 24 – Gráfico de massa de hidrogênio a 3500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 20 – Valores de massa de hidrogênio a 3500 RPM

Proporção de H ₂ (%)	Pressão (bar)	Fração molar de H ₂	Fluxo de energia H ₂ (MJ/h)	Massa de H ₂ (mg)
0	3,575	1e-05	0,0	0,0
2,5	3,25	0,02505	0,89	0,343
5	3,25	0,05003	1,77	0,685
7,5	3,12	0,075	2,55	0,987
10	3	0,10005	3,27	1,266

Fonte: o autor

Os resultados das simulações a 3500 RPM mostraram que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível impacta significativamente o consumo específico de hidrogênio (iSFC). Observou-se que, com o aumento da proporção de hidrogênio, o consumo de hidrogênio aumentou de forma proporcional. Para a proporção de 2,5% de hidrogênio, o consumo específico foi de 0.343 mg, enquanto para 10% de hidrogênio, o consumo específico chegou a 1.266 mg. Esse aumento é esperado devido à maior quantidade de hidrogênio necessária para manter a potência do motor, especialmente em altas rotações. Esses dados indicam que, apesar do benefício de reduzir o consumo de diesel, a adição de hidrogênio exige um ajuste cuidadoso para otimizar a eficiência global do motor e garantir um balanço energético adequado. Resultados apresentados na Figura 24 e na Tabela 20.

O estudo do consumo de hidrogênio em motores de combustão interna ciclo diesel revelou que a adição de hidrogênio, variando de 0% a 10%, demonstra uma tendência clara de aumento no consumo de hidrogênio conforme a rotação do motor aumenta. A 1500 RPM, com uma pressão inicial de 2.25 bar, a adição de hidrogênio em proporções de até 10% resultou em uma massa de hidrogênio de até 0.696 mg. Em 2500 RPM, a pressão inicial é mais alta, 3.575 bar, e a massa de hidrogênio utilizada alcança 1.266 mg com 10% de H₂. Já a 3500 RPM, a pressão permanece em 3.575 bar, mas a massa de hidrogênio utilizada também atinge 1.266 mg para a mesma proporção de hidrogênio. Esses resultados indicam que, para manter a eficiência de combustão e atender às necessidades energéticas do motor em diferentes rotações, tanto a massa de hidrogênio utilizada quanto a pressão devem ser ajustadas adequadamente. A maior demanda de hidrogênio em rotações mais altas sugere a necessidade de um sistema de injeção de hidrogênio eficiente que possa fornecer o combustível de maneira controlada para otimizar o desempenho do motor e minimizar as emissões.

4.1.5 Relação ar/combustível (λ)

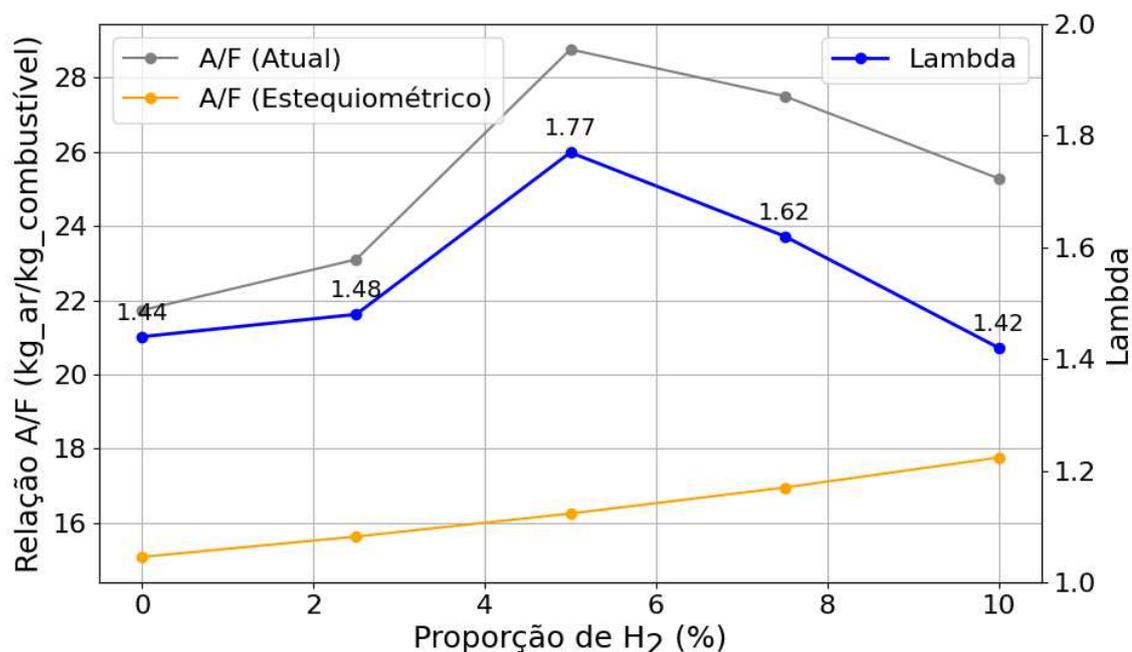
A relação ar/combustível (λ) é um parâmetro crucial para avaliar a eficiência de combustão e as emissões dos motores de combustão interna. Estes resultados foram obtidos considerando ajustes na pressão do ar de entrada entre outras variáveis, de modo que o λ resultante fosse maior que 1, compatível com motores diesel reais. A seguir, são apresentados os resultados das simulações para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível em diferentes rotações do motor (1500, 2500 e 3500 RPM).

4.1.5.1 Resultados de λ a 1500 RPM

A seguir, são apresentados os resultados da eficiência térmica para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível a 1500 RPM. Esses resultados

podem ser conferidos na Figura 25 e na Tabela 21.

Figura 25 – Gráfico da relação ar combustível (lambda) a 1500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 21 – Resultados de lambda a 1500 RPM

% H ₂	A/F (Atual) [kg_ar/kg_combustível]	A/F (Estequiométrico) [kg_ar/kg_combustível]	Lambda
0	21,73	15,08	1,44
2,5	23,10	15,63	1,48
5	28,76	16,25	1,77
7,5	27,50	16,95	1,62
10	25,28	17,76	1,42

Fonte: o autor

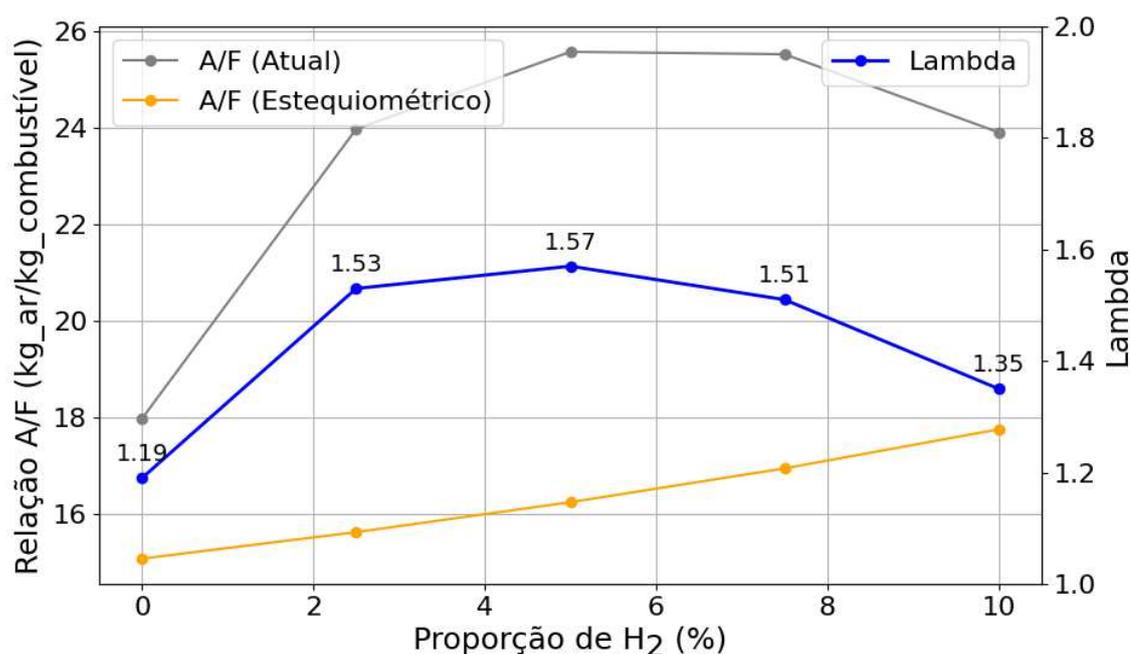
A Figura 25 apresenta o comportamento da relação ar/combustível (A/F) e do fator lambda em função da adição de hidrogênio (H₂) na mistura de combustível a 1500 RPM. Observa-se que a relação A/F (Atual), representada pela curva cinza, aumenta gradualmente até 5,0% de H₂, atingindo um valor máximo de 28,76 kg ar/kg combustível. Após esse ponto, a relação A/F começa a diminuir, indicando uma redução na quantidade de ar em relação ao combustível conforme a proporção de hidrogênio

continua a aumentar. O fator lambda, representado pela curva azul, alcança seu valor máximo de 1,77 em 5% de H_2 , refletindo uma mistura mais pobre (excesso de ar). A curva laranja, que representa a relação A/F estequiométrica, aumenta ligeiramente conforme a proporção de hidrogênio aumenta, mas permanece sempre abaixo da relação A/F atual. Esses resultados sugerem que a introdução de hidrogênio inicialmente favorece uma mistura mais pobre (mais ar), até uma concentração de 5%, quando a tendência se inverte.

4.1.5.2 Resultados de lambda a 2500 RPM

A seguir, são apresentados os resultados da eficiência térmica para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível a 2500 RPM. Esses resultados podem ser conferidos na Figura 26 e na Tabela 22.

Figura 26 – Gráfico da relação ar combustível (lambda) a 2500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 22 – Resultados de lambda a 2500 RPM

% H ₂	A/F (Atual) [kg_ar/kg_combustível]	A/F (Estequiométrico) [kg_ar/kg_combustível]	Lambda
0	17,98	15,08	1,19
2,5	23,98	15,63	1,53
5	25,58	16,25	1,57
7,5	25,53	16,95	1,51
10	23,91	17,76	1,35

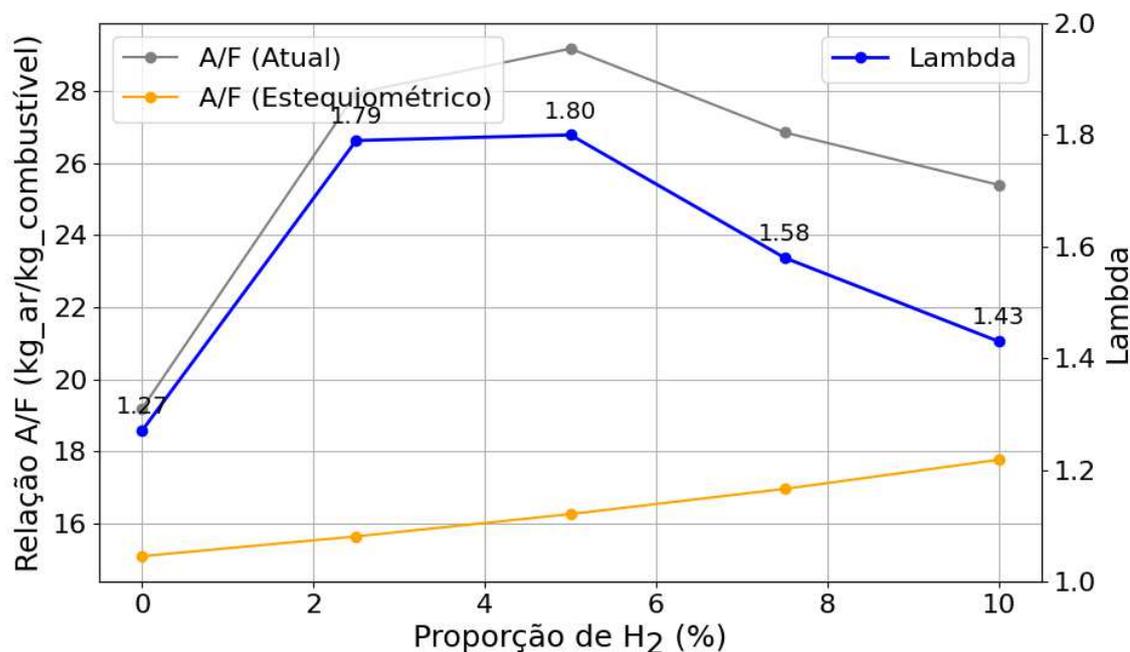
Fonte: o autor

A Figura 26 apresenta o comportamento da relação ar/combustível (A/F) e do fator lambda em função da adição de hidrogênio (H₂) na mistura de combustível a 2500 RPM. Observa-se que a relação A/F (Atual) aumenta gradualmente até 5,0% de H₂, atingindo um valor máximo de 25,58 kg ar/kg combustível. Após esse ponto, a relação A/F começa a diminuir, indicando uma redução na quantidade de ar em relação ao combustível conforme a proporção de hidrogênio continua a aumentar. O fator lambda alcança seu valor máximo de 1,57 em 5% de H₂, refletindo uma mistura mais pobre (excesso de ar). A relação A/F estequiométrica, aumenta ligeiramente conforme a proporção de hidrogênio aumenta, mas permanece sempre abaixo da relação A/F atual. Esses resultados sugerem que a introdução de hidrogênio inicialmente favorece uma mistura mais pobre (mais ar), até uma concentração de 5%, quando a tendência se inverte.

4.1.5.3 Resultados de lambda a 3500 RPM

A seguir, são apresentados os resultados da eficiência térmica para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível a 3500 RPM. Esses resultados podem ser conferidos na Figura 27 e na Tabela 23.

Figura 27 – Gráfico da relação ar combustível (lambda) a 3500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 23 – Resultados de lambda a 3500 RPM

% H ₂	A/F (Atual) [kg_ar/kg_combustível]	A/F (Estequiométrico) [kg_ar/kg_combustível]	Lambda
0	19,18	15,08	1,27
2,5	27,95	15,63	1,79
5	29,19	16,25	1,80
7,5	26,86	16,95	1,58
10	25,40	17,76	1,43

Fonte: o autor

A Figura 27 apresenta o comportamento da relação ar/combustível (A/F) e do fator lambda em função da adição de hidrogênio (H₂) na mistura de combustível a 3500 RPM. Observa-se que a relação A/F (Atual) aumenta gradualmente até 5,0% de H₂, atingindo um valor máximo de 29,19 kg ar/kg combustível. Após esse ponto, a relação A/F começa a diminuir, indicando uma redução na quantidade de ar em relação ao combustível conforme a proporção de hidrogênio continua a aumentar. O fator lambda alcança seu valor máximo de 1,80 em 5% de H₂, refletindo uma mistura mais pobre (excesso de ar). A relação A/F estequiométrica, aumenta ligeiramente conforme a

proporção de hidrogênio aumenta, mas permanece sempre abaixo da relação A/F atual. Esses resultados sugerem que a introdução de hidrogênio inicialmente favorece uma mistura mais pobre (mais ar), até uma concentração de 5%, quando a tendência se inverte.

Os resultados mostram que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível tende a aumentar o valor de lambda, indicando uma mistura mais rica em ar, o que é esperado, pois o hidrogênio tem um poder calorífico mais alto e requer mais ar para a combustão completa. No entanto, para proporções mais altas de hidrogênio (10%), há uma tendência de redução no valor de lambda, possivelmente devido ao ajuste da massa de diesel injetada para manter a potência semelhante.

Esses resultados são importantes para entender como a adição de hidrogênio afeta a combustão e as emissões dos motores diesel, e podem ajudar a otimizar a proporção de hidrogênio utilizada para melhorar a eficiência e reduzir as emissões. Além disso, manter o valor de lambda maior que 1 é compatível com as características operacionais de motores diesel reais, garantindo uma combustão eficiente e controle das emissões de poluentes.

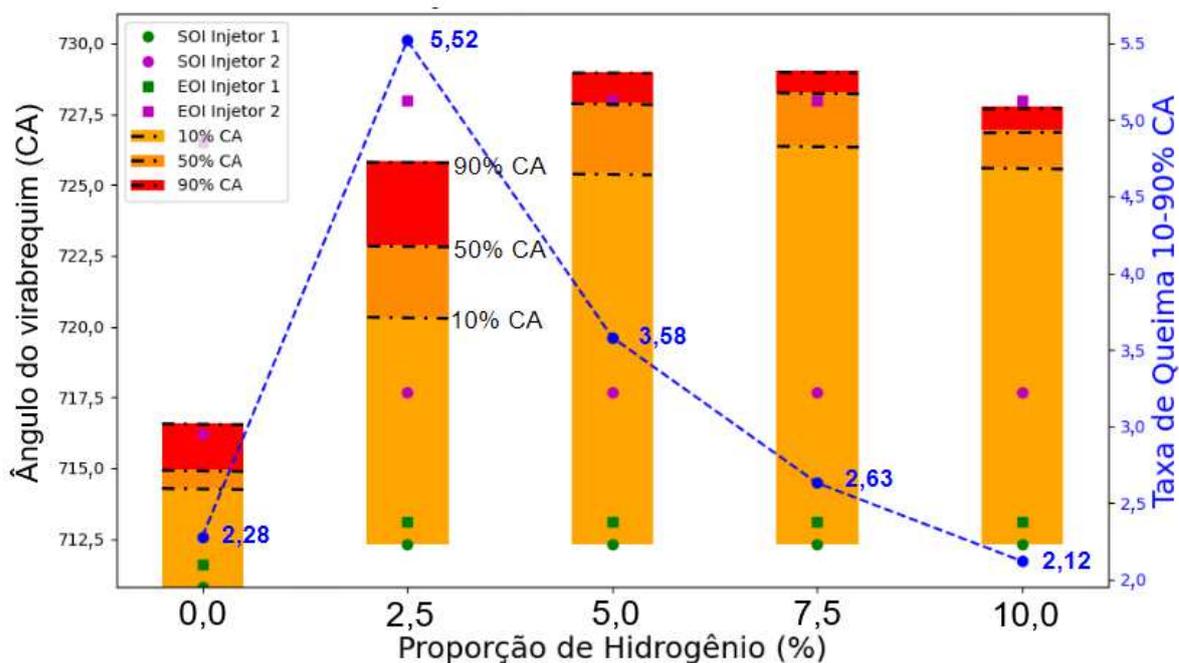
4.1.6 Caracterização da combustão

Nesta seção, apresentamos os resultados da caracterização da combustão obtidos a partir das simulações numéricas realizadas para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível. As análises focam nos parâmetros críticos de combustão, como frações de massa queimada e taxas de queima, para rotações de 1500, 2500 e 3500 RPM. Os dados foram extraídos dos arquivos de resultados CSV das simulações.

4.1.6.1 Caracterização da combustão a 1500 RPM

Para a rotação de 1500 RPM, os resultados são apresentados na Figura 28 e na Tabela 24 conforme as proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível:

Figura 28 – Gráfico da caracterização da combustão a 1500 RPM



Fonte: o autor

onde: SOI (CA) = *start of injection* (início da injeção) para o injetor 1 e 2, EOI (CA) = *end of injection* (fim da injeção) para o injetor 1 e 2. 10% CA, 50% CA e 90% CA são os pontos onde ocorrem 10%, 50% e 90% da queima do combustível.

Tabela 24 – Caracterização da combustão a 1500 RPM

Proporção Hidrogênio (%)	10% CA	50% CA	90% CA	Taxa de Queima 10-90% CA
0%	714,3	714,96	716,58	2,28
2,5%	720,31	722,86	725,83	5,52
5%	725,41	727,91	729,0	3,58
7,5%	726,4	728,27	729,03	2,63
10%	725,65	726,94	727,78	2,12

Fonte: o autor

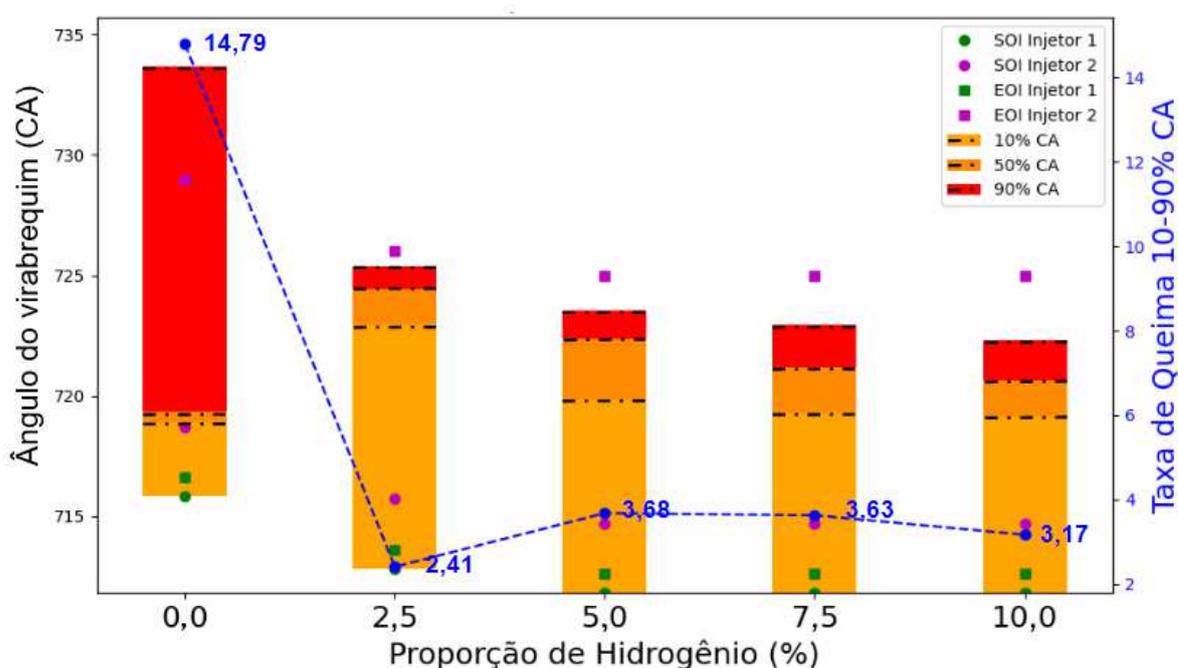
O gráfico apresentado na Figura 28 indica no ponto quadrado verde o início da injeção do combustível diesel do injetor 1 e no ponto círculo verde o final da injeção de combustível do injetor 1. O ponto quadrado lilás indica o início da injeção do combustível diesel do injetor 2 e no ponto círculo lilás o final da injeção de combustível do injetor 2 para cada proporção de H₂. A linha traço e ponto amarela refere-se ao ponto

em que 10% da massa do combustível foi queimado. Este parâmetro indica o início da combustão. A linha traço e ponto laranja representa o ponto em que 50% da massa do combustível foi queimada. O momento em que isso ocorre é crucial para a eficiência do motor. Uma combustão que atinge MFB50 muito cedo ou tarde pode resultar em menor eficiência térmica. Em geral, o ideal é que o MFB50 ocorra próximo do ponto morto superior (PMS) para maximizar a eficiência da conversão de energia. A linha traço e ponto vermelha indica o ponto em que 90% da massa do combustível foi queimado, representando o fim da combustão ativa. Adicionalmente a linha tracejada em azul indica a taxa de queima de 10-90% do combustível, é um parâmetro importante para descrever o tempo que a combustão leva para progredir entre os momentos em que 10% e 90% da massa total de combustível foi queimada. Representa a duração da combustão principal e fornece uma ideia da rapidez com que a mistura de ar/combustível queima no motor. Para a rotação de 1500 RPM as simulações indicam uma elevação da taxa de queima na proporção de 2,5% de H₂ diminuindo gradativamente conforme a proporção de H₂ aumenta até atingir a menor taxa com 10% de H₂.

4.1.6.2 Caracterização da combustão a 2500 RPM

Para a rotação de 1500 RPM, os resultados são apresentados na Figura 29 e na Tabela 25 conforme as proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível:

Figura 29 – Gráfico da caracterização da combustão a 2500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 25 – Caracterização da combustão a 2500 RPM

Proporção Hidrogênio (%)	10% CA	50% CA	90% CA	Taxa de Queima 10-90% CA
0%	718,9	719,31	733,7	14,79
2,5%	722,97	724,45	725,38	2,41
5%	719,85	722,33	723,54	3,68
7,5%	719,3	721,15	722,93	3,63
10%	719,13	720,63	722,3	3,17

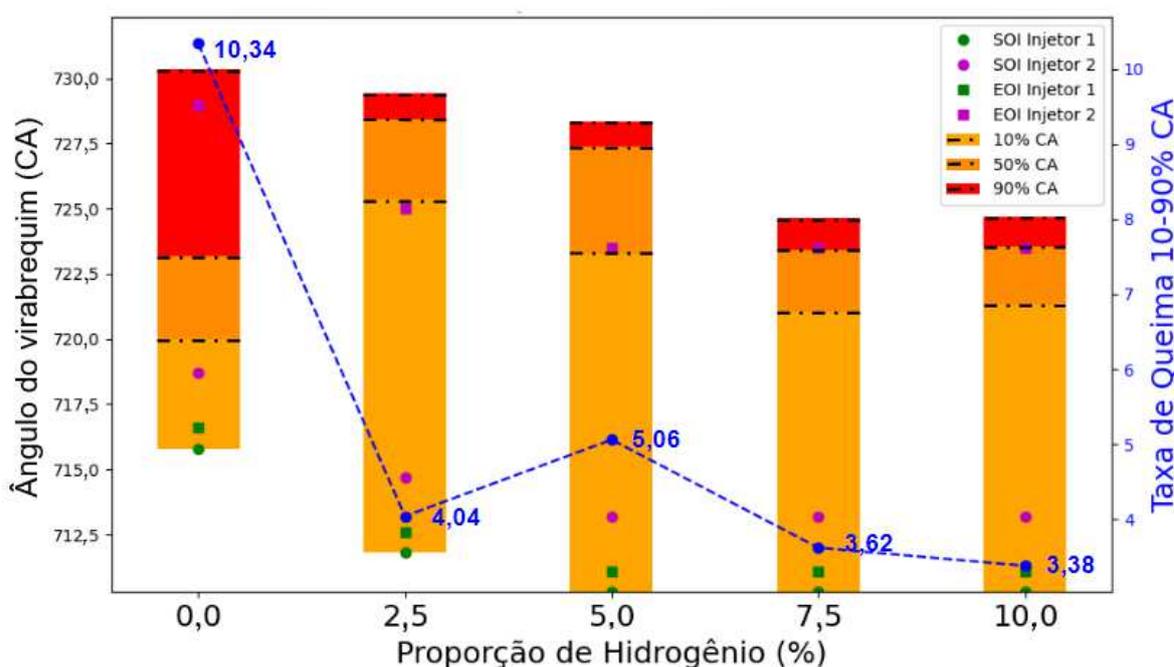
Fonte: o autor

Para a rotação de 2500 RPM as simulações indicam uma redução significativa da taxa de queima na proporção de 2,5% de H₂ saindo de 14,79 CA com 0,0% de H₂ para 2,5 CA. Com a proporção de 5% de H₂ a taxa de queima aumenta para 3,68 CA e depois vai reduzindo novamente com o aumento da proporção de H₂.

4.1.6.3 Caracterização da combustão a 3500 RPM

Para a rotação de 1500 RPM, os resultados são apresentados na Figura 30 e na Tabela 26 conforme as proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível:

Figura 30 – Gráfico da caracterização da combustão a 3500 RPM



Fonte: o autor

Tabela 26 – Caracterização da combustão a 3500 RPM

Proporção Hidrogênio (%)	10% CA	50% CA	90% CA	Taxa de Queima 10-90% CA
0%	720,0	723,2	730,34	10,34
2,5%	725,37	728,43	729,42	4,04
5%	723,28	727,38	728,33	5,06
7,5%	721,04	723,43	724,66	3,62
10%	721,29	723,56	724,67	3,38

Fonte: o autor

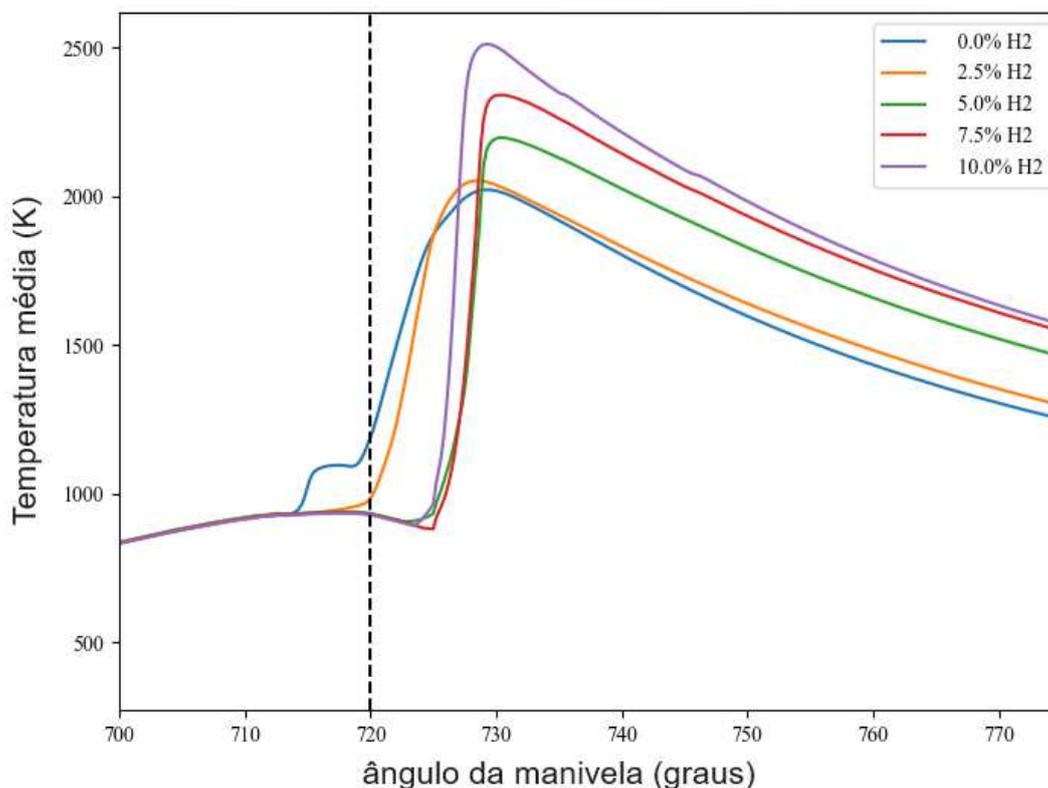
Para a rotação de 3500 RPM as simulações indicam uma redução significativa da taxa de queima na proporção de 2,5% de H₂ saindo de 10,34 CA com 0,0% de H₂ para 4,04 CA. Com a proporção de 5% de H₂ a taxa de queima aumenta para 5,06 CA e depois vai reduzindo novamente com o aumento da proporção de H₂ atingindo a menor taxa de queima de 3,38 Ca na proporção de 10% de H₂.

Os resultados indicam que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível afeta significativamente os parâmetros de combustão em todas as rotações analisadas. Observou-se que, com o aumento da proporção de hidrogênio, a fração de massa queimada em 10%, 50% e 90% ocorrem mais cedo no ciclo de combustão. Além disso, a taxa de queima de 10% a 90% diminui, indicando uma combustão mais rápida e eficiente.

4.1.7 Temperatura média (*Mean Temperature*)

4.1.7.1 Temperatura média para 1500 RPM

Figura 31 – Gráfico de temperatura média a 1500 RPM

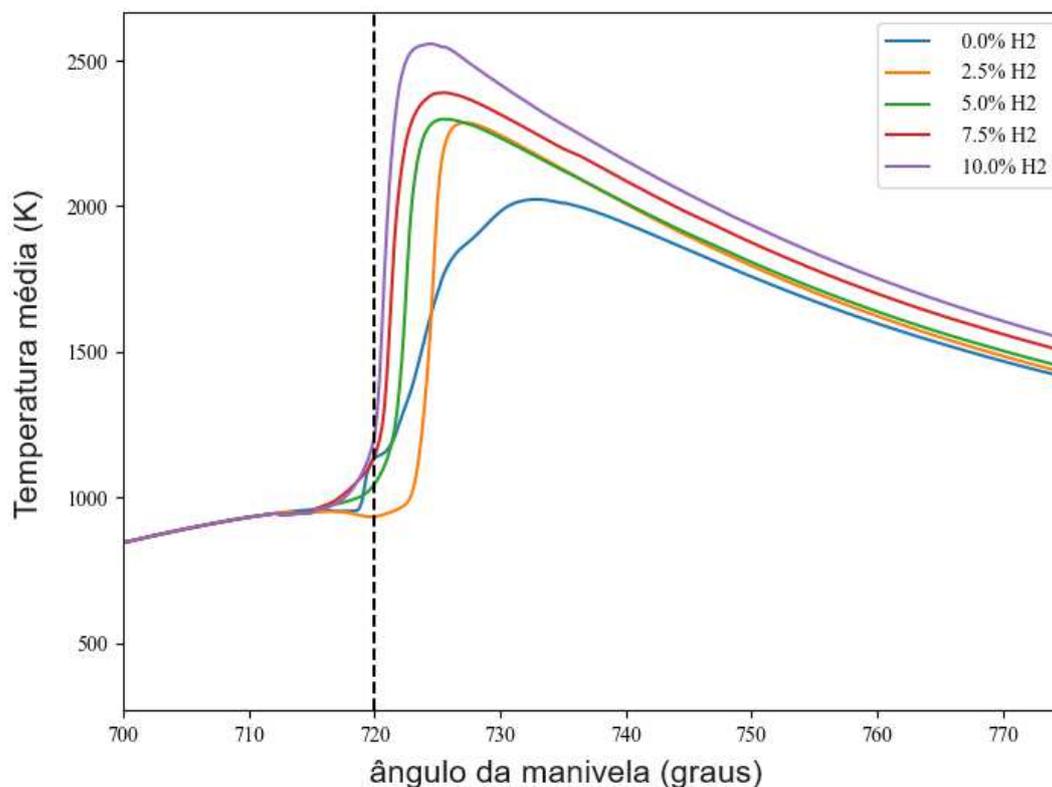


Fonte: (CANCINO, 2024)

A temperatura média do processo de combustão aumenta significativamente com a adição de hidrogênio. Com 10% de hidrogênio, a temperatura média atinge picos de aproximadamente 2500 K, enquanto sem hidrogênio a temperatura é consideravelmente menor. Os resultados são observados no gráfico da Figura 31.

4.1.7.2 Temperatura média para 2500 RPM

Figura 32 – Gráfico de temperatura média a 2500 RPM

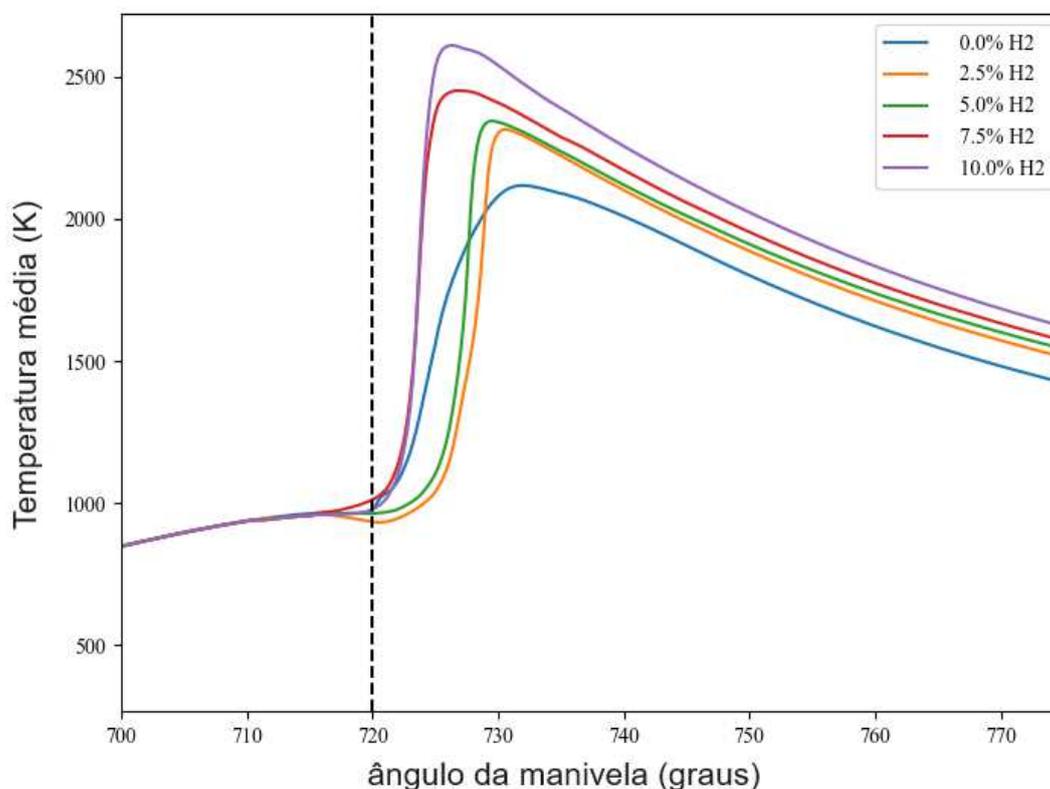


Fonte: (CANCINO, 2024)

A temperatura média do processo de combustão aumenta significativamente com a adição de hidrogênio. Com 10% de hidrogênio, a temperatura média atinge picos de aproximadamente 2500 K, enquanto sem hidrogênio a temperatura é consideravelmente menor. Esta alta temperatura de combustão contribui para a eficiência do motor, pois facilita uma combustão mais completa e eficiente. No entanto, deve-se considerar que as altas temperaturas também podem resultar em maiores emissões de NOx, o que pode requerer estratégias de mitigação para controlar essas emissões. Os resultados são observados no gráfico da Figura 32.

4.1.7.3 temperatura média para 3500 RPM

Figura 33 – Gráfico de temperatura média a 3500 RPM



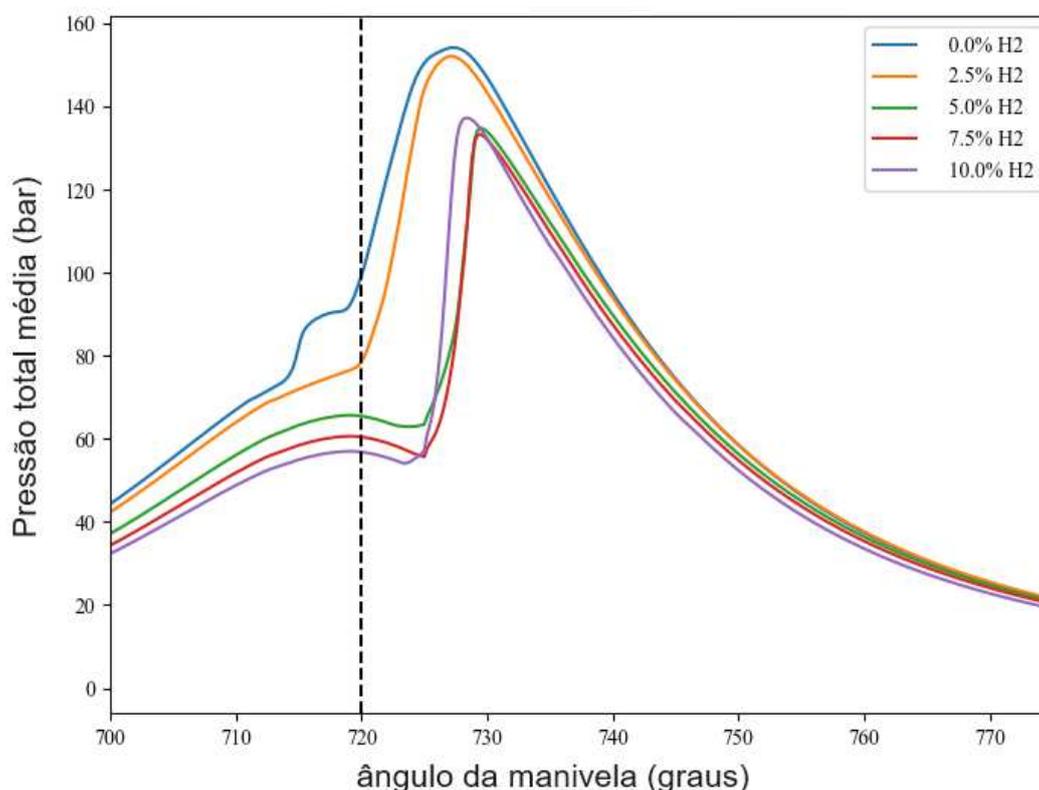
Fonte: (CANCINO, 2024)

A temperatura média do processo de combustão aumenta significativamente com a adição de hidrogênio. Com 10% de hidrogênio, a temperatura média atinge picos de aproximadamente 2500 K, enquanto sem hidrogênio a temperatura é consideravelmente menor. Esta alta temperatura de combustão contribui para a eficiência do motor, pois facilita uma combustão mais completa e eficiente. No entanto, deve-se considerar que as altas temperaturas também podem resultar em maiores emissões de NOx, o que pode requerer estratégias de mitigação para controlar essas emissões. Os resultados são observados no gráfico da Figura 33.

4.1.8 Pressão total média (*Mean total pressure*)

4.1.8.1 Pressão total média para 1500 RPM

Figura 34 – Gráfico de pressão total média a 1500 RPM

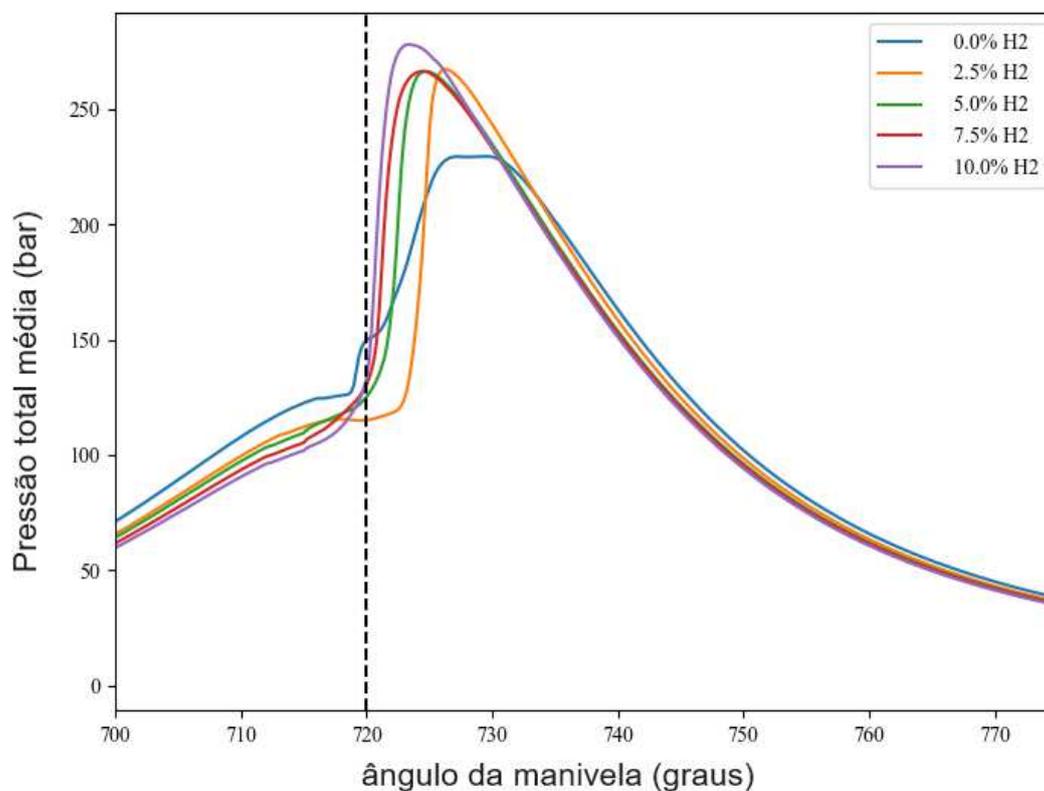


Fonte: (CANCINO, 2024)

A pressão média total observada foi impactada pela adição de hidrogênio à mistura, porém, o comportamento registrado nos gráficos reflete não apenas esse fator, mas também uma série de ajustes nas variáveis do motor que foram necessários para manter a potência semelhante à do motor de referência em cada rotação. Esses ajustes, que incluíram a redução da massa de diesel injetada, alterações no ângulo de injeção, ajustes no *swirl* e na pressão de entrada do ar, resultaram em uma diminuição da pressão média total à medida que o teor de hidrogênio aumentava. Embora a adição de hidrogênio normalmente sugira um aumento na pressão devido à sua alta reatividade, a combinação dessas modificações conduziu a uma combustão mais controlada e a uma menor pressão de pico. Esses resultados indicam que, apesar da complexidade introduzida pelos ajustes, foi possível manter a potência desejada, embora com uma dinâmica de pressão diferente, conforme observado no gráfico da Figura 34.

4.1.8.2 Pressão total média para 2500 RPM

Figura 35 – Gráfico de pressão total média a 2500 RPM

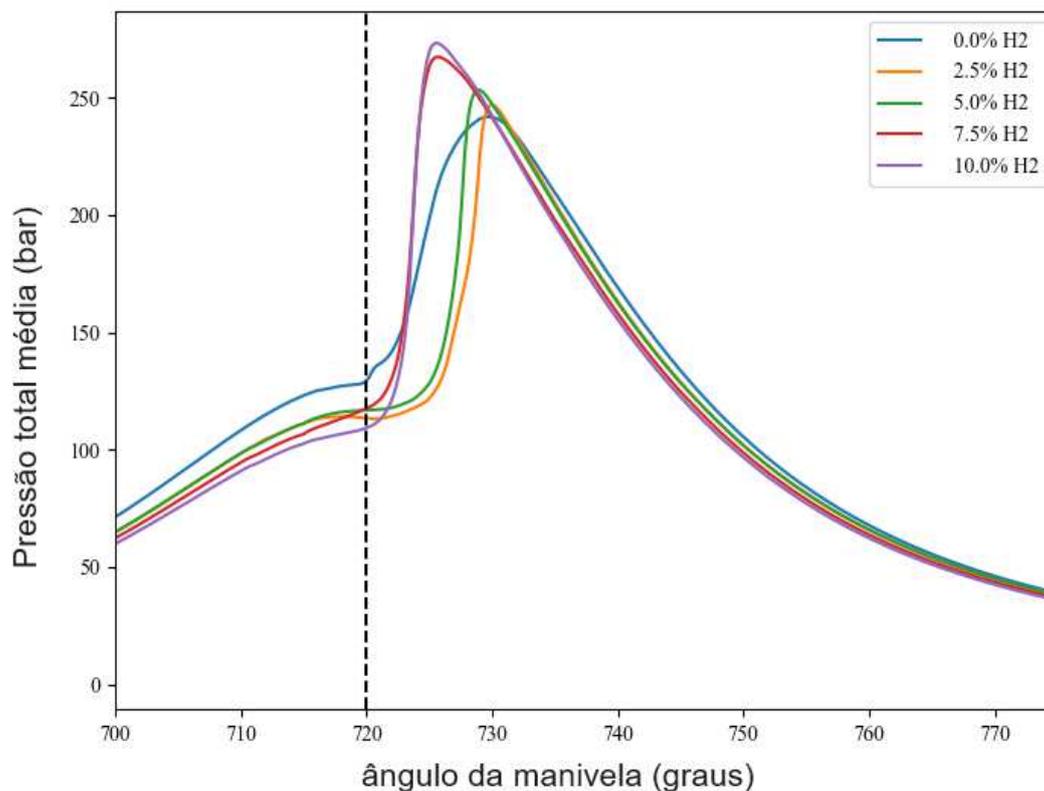


Fonte: (CANCINO, 2024)

A pressão média total a 2500 RPM, conforme ilustrado no gráfico da Figura 35, aumenta progressivamente com o incremento do teor de hidrogênio na mistura. O gráfico mostra que o pico de pressão ocorre com 10% de hidrogênio, atingindo aproximadamente 270 bar, indicando que a adição de hidrogênio, juntamente com os ajustes realizados nas variáveis do motor, como a redução da massa de diesel injetada, o ângulo de injeção, o *swirl* e a pressão de entrada do ar, levou a uma combustão mais intensa e eficiente. Este aumento na pressão de pico sugere uma maior liberação de energia na câmara de combustão, contribuindo para a manutenção da potência do motor em níveis comparáveis ao motor de referência. Esses resultados confirmam que o hidrogênio pode aumentar significativamente a pressão de combustão, e os ajustes realizados foram essenciais para otimizar a eficiência e o desempenho do motor.

4.1.8.3 Pressão total média para 3500 RPM

Figura 36 – Gráfico de pressão total média a 3500 RPM



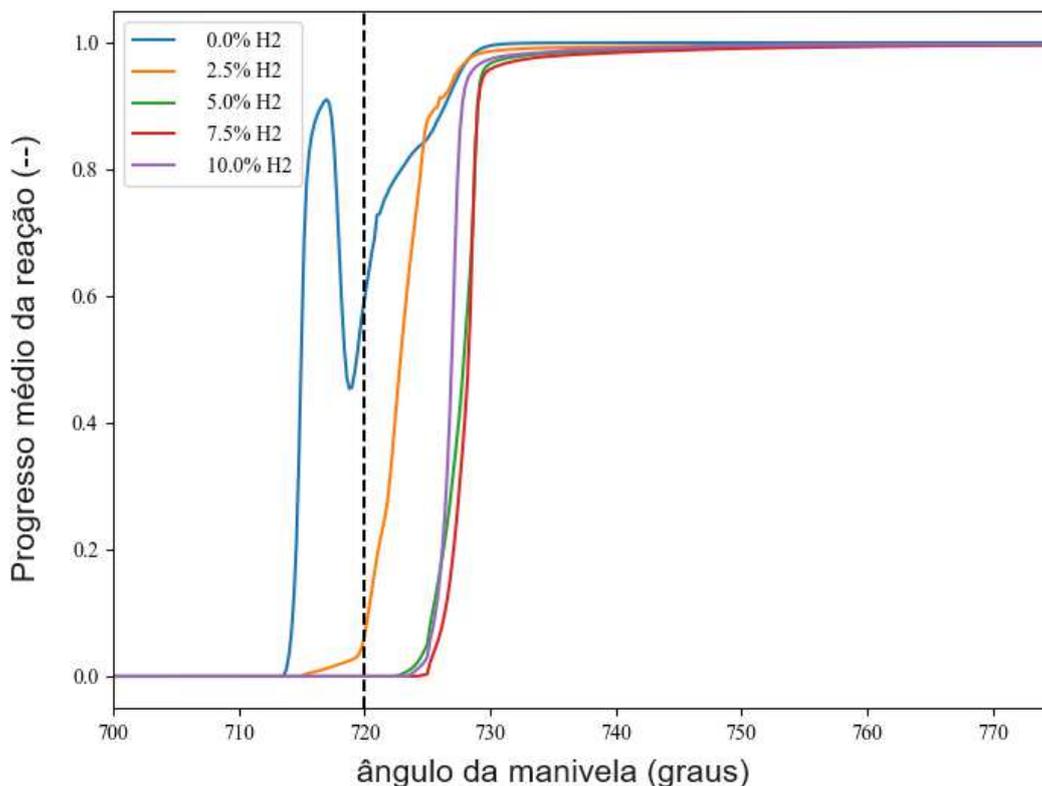
Fonte: (CANCINO, 2024)

A pressão média total a 3500 RPM, como ilustrado no gráfico da Figura 36, apresenta um aumento significativo conforme a proporção de hidrogênio na mistura aumenta. O gráfico evidencia que o pico de pressão ocorre novamente com 10% de hidrogênio, alcançando aproximadamente 275 bar. Este comportamento indica que a adição de hidrogênio, associada aos ajustes nas variáveis do motor, como a redução da massa de diesel injetada, o ângulo de injeção, o *swirl* e a pressão de entrada do ar, resultou em uma combustão mais intensa em rotações mais altas. A maior pressão de pico observada com 10% de hidrogênio sugere uma liberação de energia ainda mais pronunciada na câmara de combustão, contribuindo para alcançar uma potência similar à do motor de referência, mesmo em rotações elevadas. Estes resultados demonstram que a adição de hidrogênio pode efetivamente intensificar a combustão, especialmente em regimes de alta rotação.

4.1.9 Progresso médio da reação (*Mean reaction progress*)

4.1.9.1 Progresso médio da reação para 1500 RPM

Figura 37 – Gráfico de progresso médio da reação a 1500 RPM

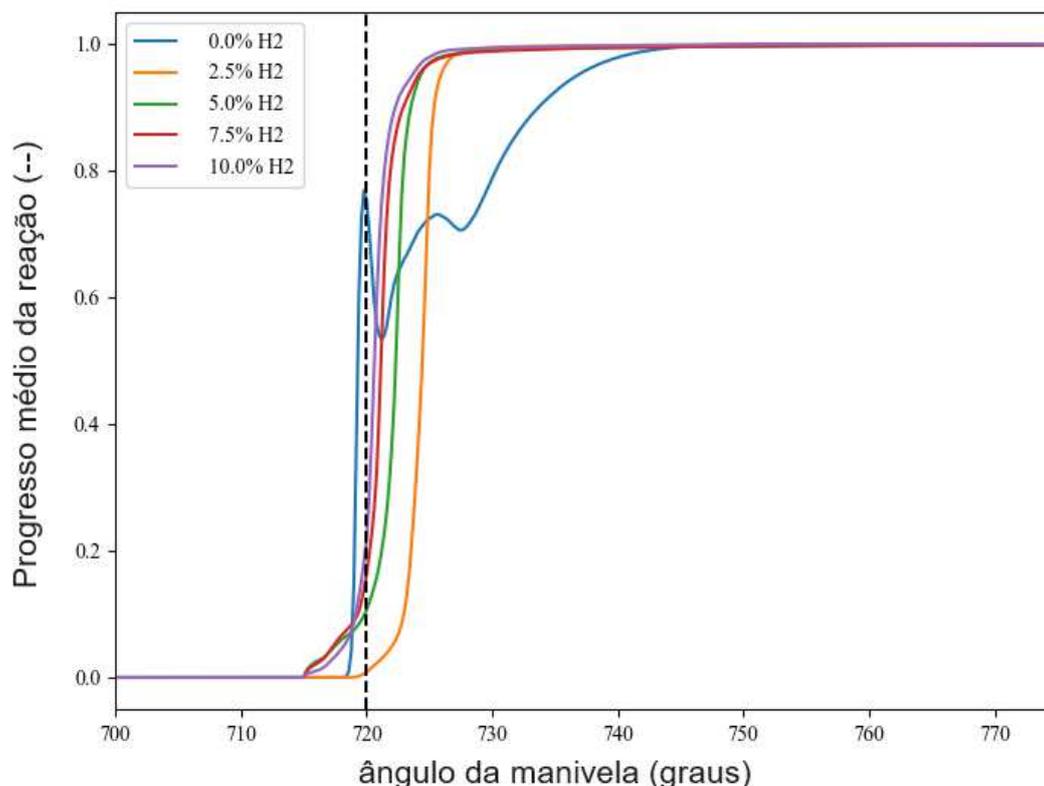


Fonte: (CANCINO, 2024)

O gráfico da Figura 37 ilustra o progresso médio da reação a 1500 RPM para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível. Observa-se que o progresso da reação é significativamente influenciado pela adição de hidrogênio. À medida que o teor de hidrogênio aumenta, a curva de progresso da reação se desloca para ângulos de manivela mais avançados, indicando que a combustão inicia e progride mais rapidamente em relação à mistura sem hidrogênio. Com 10% de hidrogênio, o progresso da reação atinge rapidamente o valor máximo, sugerindo uma queima mais eficiente e completa em comparação com as proporções menores de hidrogênio ou sem hidrogênio. Esses resultados confirmam que o hidrogênio acelera a combustão, o que pode ser vantajoso para otimizar o desempenho do motor, especialmente em termos de eficiência térmica, mesmo em baixas rotações. A rápida progressão da reação também pode contribuir para uma melhor conversão de energia e uma redução nas emissões de poluentes.

4.1.9.2 Progresso médio da reação para 2500 RPM

Figura 38 – Gráfico de progresso médio da reação a 2500 RPM

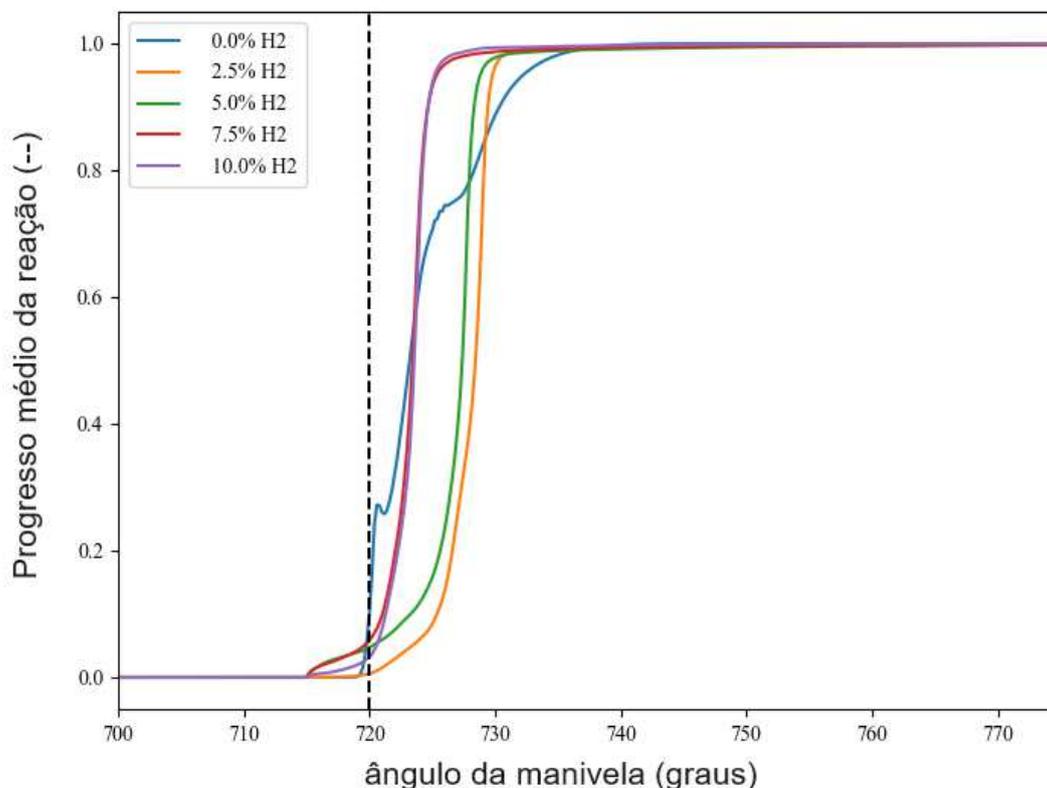


Fonte: (CANCINO, 2024)

O gráfico da Figura 38 ilustra o progresso médio da reação a 2500 RPM para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível. Observa-se que o progresso da reação é significativamente influenciado pela adição de hidrogênio. A curva correspondente a 2,5% de hidrogênio se desloca para ângulos de manivela mais avançados, indicando que a combustão inicia mais tarde em comparação com as outras proporções de hidrogênio e com a mistura sem hidrogênio. Conforme o teor de hidrogênio aumenta para 5%, 7,5% e 10%, a curva de progresso da reação se desloca para ângulos de manivela menos avançados, sugerindo que a combustão ocorre mais cedo e progride mais rapidamente. Com 10% de hidrogênio, o progresso da reação atinge rapidamente o valor máximo, indicando uma queima mais eficiente e completa em comparação com as proporções menores de hidrogênio. Esses resultados confirmam que, a 2500 RPM, a adição de hidrogênio pode acelerar a combustão, especialmente em concentrações acima de 2,5%, otimizando o desempenho do motor em termos de eficiência térmica.

4.1.9.3 Progresso médio da reação para 3500 RPM

Figura 39 – Gráfico de progresso médio da reação a 3500 RPM



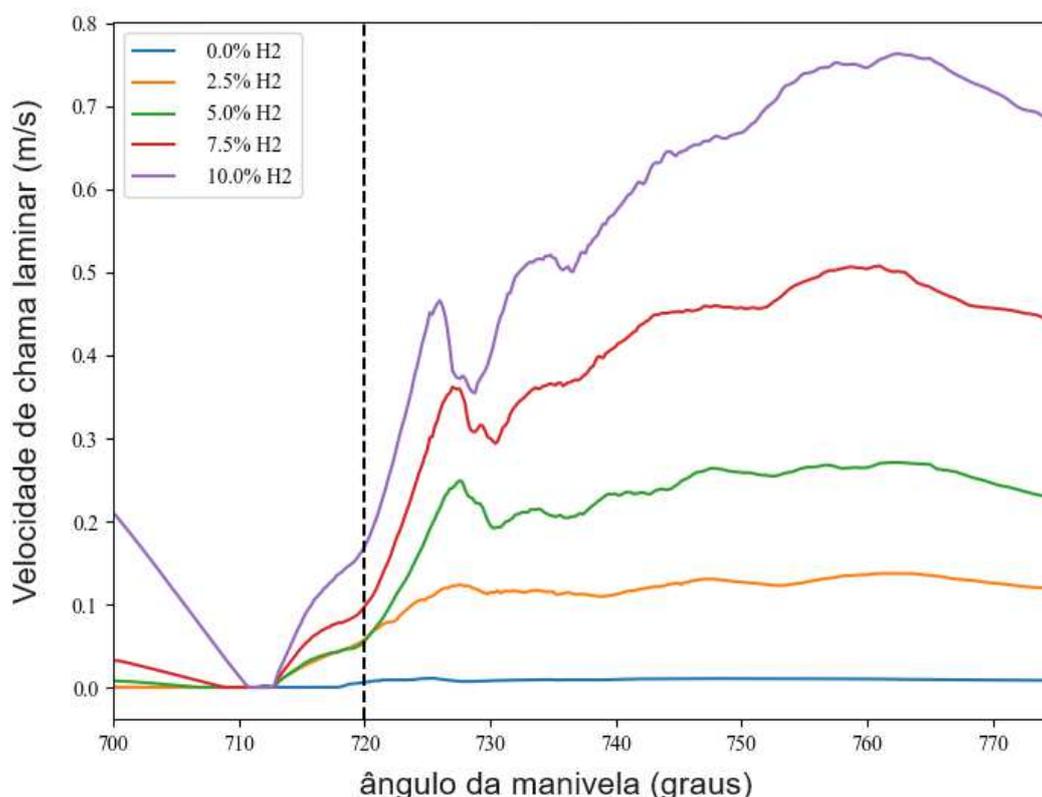
Fonte: (CANCINO, 2024)

O gráfico da Figura 39 ilustra o progresso médio da reação a 3500 RPM para diferentes proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível. Observa-se que o progresso da reação é significativamente influenciado pela adição de hidrogênio. A curva para 0% de hidrogênio mostra que a combustão ocorre relativamente mais tarde. Com a adição de 2,5% de hidrogênio, a curva se desloca para ângulos de manivela mais avançados, indicando que a combustão inicia um pouco mais tarde em comparação com a mistura sem hidrogênio. No entanto, ao aumentar o teor de hidrogênio para 5%, 7,5%, e 10%, as curvas se deslocam para ângulos de manivela menos avançados, com a curva de 10% de hidrogênio indicando o início mais rápido da combustão e uma progressão rápida até atingir o valor máximo. Isso sugere que, a 3500 RPM, o hidrogênio acelera significativamente a combustão, especialmente em maiores concentrações, resultando em uma queima mais eficiente e completa. Esses resultados indicam que a adição de hidrogênio pode ser particularmente vantajosa para otimizar o desempenho do motor em regimes de alta rotação, melhorando a eficiência térmica e reduzindo o tempo de combustão.

4.1.10 Resultados velocidade de chama laminar (*Laminar Flame Speed*)

4.1.10.1 Velocidade de chama laminar para 1500 RPM

Figura 40 – Gráfico de velocidade de chama laminar a 1500 RPM

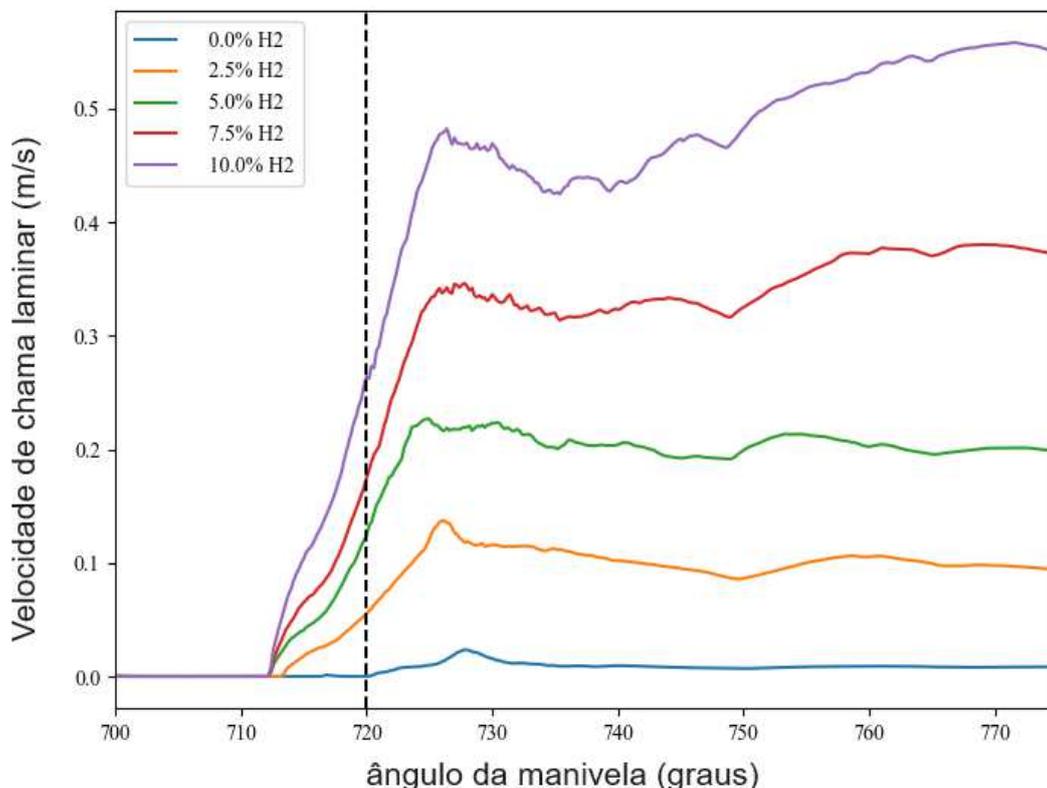


Fonte: (CANCINO, 2024)

O gráfico da Figura 40 ilustra como a adição de hidrogênio influencia a velocidade de chama laminar a 1500 RPM. Observa-se que a velocidade de chama laminar aumenta significativamente com o aumento da proporção de hidrogênio na mistura ar/combustível. A curva para 0% de hidrogênio mostra uma velocidade baixa e uma progressão lenta. Com 2,5% de hidrogênio, a velocidade aumenta, mas é com 5%, 7,5%, e especialmente 10% de hidrogênio que a velocidade de chama laminar atinge valores muito mais altos, refletindo uma combustão mais rápida e eficiente. A curva de 10% de hidrogênio se destaca por seu pico elevado, sugerindo que o hidrogênio, devido à sua alta reatividade, acelera substancialmente a propagação da chama, o que pode otimizar o desempenho do motor em baixas rotações.

4.1.10.2 Velocidade de chama laminar para 2500 RPM

Figura 41 – Gráfico de velocidade de chama laminar a 2500 RPM



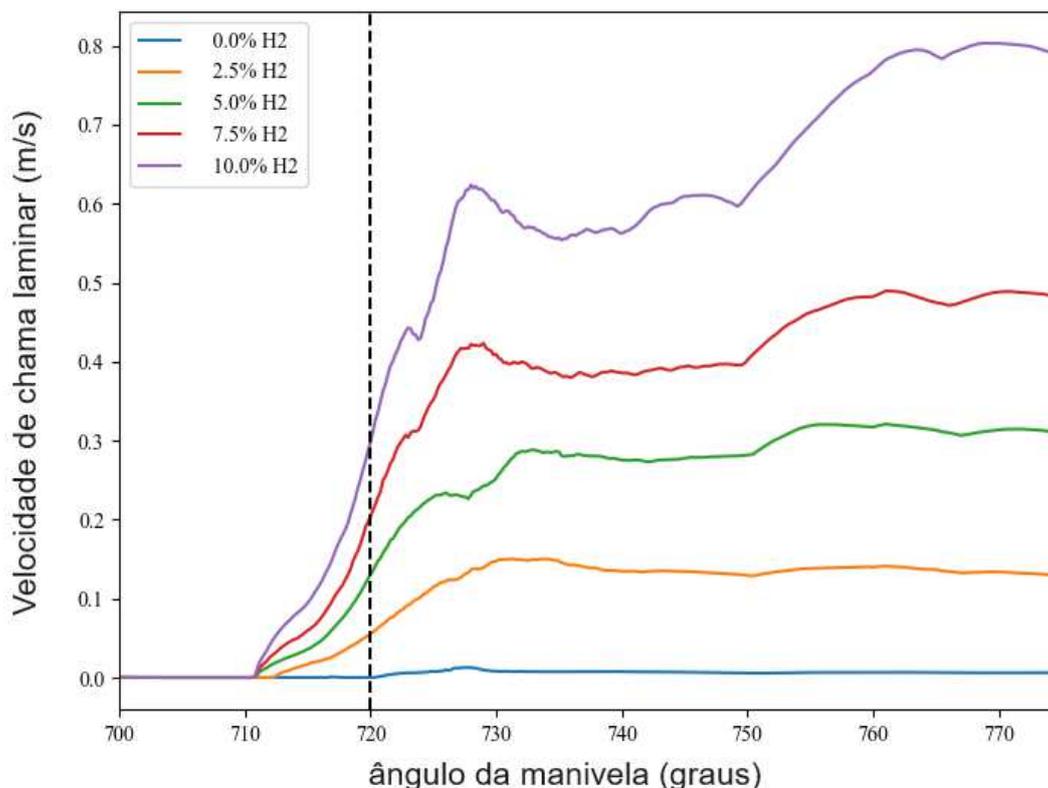
Fonte: (CANCINO, 2024)

O gráfico da Figura 41 demonstra que, à medida que a proporção de hidrogênio na mistura ar/combustível aumenta a 2500 RPM, a velocidade de chama laminar também cresce. A curva para 0% de hidrogênio permanece praticamente plana, indicando uma velocidade de chama muito baixa. Com 2,5% de hidrogênio, há um aumento modesto, enquanto as proporções de 5%, 7,5%, e, especialmente, 10% de hidrogênio, mostram um aumento significativo. A curva para 10% de hidrogênio atinge o valor mais alto, destacando como o hidrogênio acelera a propagação da chama. Isso sugere que o hidrogênio pode melhorar substancialmente a eficiência da combustão a 2500 RPM, promovendo uma combustão mais rápida e eficiente, o que é vantajoso para o desempenho do motor.

4.1.10.3

Velocidade de chama laminar para 3500 RPM

Figura 42 – Gráfico de velocidade de chama laminar a 3500 RPM



Fonte: (CANCINO, 2024)

O gráfico da Figura 42 mostra que, a 3500 RPM, a velocidade de chama laminar aumenta com a adição de hidrogênio na mistura ar/combustível. A curva correspondente a 0% de hidrogênio apresenta uma velocidade de chama baixa e uma progressão lenta. Com 2,5% de hidrogênio, há um aumento modesto na velocidade de chama laminar, que se torna mais pronunciado à medida que a concentração de hidrogênio aumenta para 5%, 7,5% e, especialmente, 10%. A curva de 10% de hidrogênio atinge o pico mais elevado, indicando uma combustão significativamente mais rápida. Esse comportamento destaca como o hidrogênio, devido à sua alta reatividade, acelera a propagação da chama, tornando a combustão mais eficiente em altas rotações, o que é benéfico para o desempenho do motor.

4.2 COMPARAÇÃO COM DADOS DE MOTORES DIESEL CONVENCIONAIS

Neste capítulo, analisamos os resultados obtidos nas simulações realizadas com a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível em um motor de combustão interna ciclo Diesel, comparando-os com os dados de um motor diesel convencional, especificamente o motor de referência VW EA288. O objetivo principal das simulações

foi manter a potência do motor alinhada com a do motor de referência, evitando qualquer aumento ou diminuição, enquanto se busca melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões.

4.2.1 Potência, eficiência e consumo de combustível

As simulações iniciais com 0% de hidrogênio foram ajustadas para que a potência do motor fosse similar à do motor de referência em todas as rotações. Durante essas simulações, diversas variáveis cruciais foram ajustadas para garantir que o motor funcionasse de forma eficiente e mantivesse a potência desejada, alinhando-se com o comportamento esperado de um motor real. Entre essas variáveis estavam:

- Pressão do ar de alimentação (ou Sobrealimentação): A pressão do ar foi regulada para garantir que a quantidade adequada de oxigênio estivesse disponível para a combustão, essencial para manter a potência do motor. É importante notar que o ar utilizado nas simulações foi manipulado e continha apenas N_2 , O_2 , e H_2 nas simulações com hidrogênio. Com a adição do hidrogênio, as proporções de O_2 e N_2 foram reduzidas proporcionalmente.
- *Swirl*: O movimento rotacional do ar dentro da câmara de combustão foi otimizado para melhorar a mistura ar/combustível, garantindo uma combustão mais eficiente e estável.
- Massas de diesel dos injetores: As massas de diesel injetadas foram cuidadosamente calibradas para equilibrar a relação de combustível e ar, crucial para manter o motor funcionando de forma eficiente e dentro dos parâmetros de potência desejados.
- Ângulos de injeção: Os ângulos de injeção foram ajustados para otimizar o início e a progressão da combustão, melhorando a eficiência térmica e controlando as emissões.

Durante esse processo, um dos desafios encontrados foi manter o valor de lambda (relação ar/combustível) dentro dos parâmetros normais. Em algumas simulações, foram observados valores de lambda inferiores a 1, indicando uma mistura rica, o que exigiu ajustes adicionais para equilibrar a combustão e as emissões.

Os resultados das simulações foram os seguintes:

- 1500 RPM: A potência do motor referência, o VW EA288, foi ajustada para 35.5 hp. Com 0% de hidrogênio, a simulação atingiu 33.0 hp. Quando o hidrogênio foi adicionado, a potência se aproximou do valor de referência,

com 7.5% de H₂ resultando em 34.6 hp, uma variação de 4.85%, mantendo-se próxima do objetivo inicial.

- 2500 RPM: A potência de referência estabelecida foi de 106.25 hp. Com 0% de hidrogênio, a simulação foi ajustada para atingir 101.91 hp. A adição de hidrogênio permitiu que a potência se mantivesse estável, com 10.00% de H₂ resultando em 102.57 hp, uma variação mínima de +0.64%, alinhada com o objetivo de manter a potência similar à do motor de referência.
- 3500 RPM: Na rotação mais alta, a potência de referência foi ajustada para 150.00 hp. A simulação com 0% de hidrogênio atingiu 148.73 hp, e com 5.00% de H₂, a potência resultante foi de 150.61 hp, uma variação mínima de +0.41%, demonstrando que o hidrogênio conseguiu manter a potência desejada sem desvio significativo.

Os resultados são observados nas tabelas 27, 28 e 29.

Tabela 27 – Comparação potência e consumo com motor referência a 1500 RPM

Proporção de H₂ (%)	Potência (hp)	Variação (%)	iSFC (g/kWh)
Motor Ref.	35.5	–	210.0
0,00%	33,0	0,00	182,91
2,50%	34,13	+3,42	154,97
5,00%	34,02	+3,09	106,99
7,50%	34,21	+3,67	100,3
10,00%	33,30	+0,91	102,85

Fonte: o autor

Tabela 28 – Comparação potência e consumo com motor referência a 2500 RPM

Proporção de H₂ (%)	Potência (hp)	Variação (%)	iSFC (g/kWh)
Motor Ref.	106.25	–	–
0,00%	101,91	0,00	189,51
2,50%	102,21	+0,29	127,53
5,00%	100,86	-1,03	115,38
7,50%	102,41	+0,49	106,57
10,00%	102,56	+0,64	106,97

Fonte: o autor

Tabela 29 – Comparação potência e consumo com motor referência a 3500 RPM

Proporção de H ₂ (%)	Potência (hp)	Variação (%)	iSFC (g/kWh)
Motor Ref.	150,00	–	–
0,00%	148,73	0,00	170,43
2,50%	148,55	-0,12	103,8
5,00%	150,59	+1,25	95,55
7,50%	150,38	+1,11	97,2
10,00%	149,20	+0,32	96,9

Fonte: o autor

A eficiência do motor, medida pelo consumo específico de combustível indicado (iSFC), melhorou consideravelmente com a adição de hidrogênio. Em 1500 RPM, por exemplo, o iSFC foi reduzido de 182.91 g/kWh (com 0% de hidrogênio) para 100.3 g/kWh com 7.5% de hidrogênio. Esses dados corroboram com a teoria de que o hidrogênio, devido ao seu alto poder calorífico, pode melhorar a eficiência da combustão. O mesmo padrão foi observado nas rotações de 2500 RPM e 3500 RPM, onde a eficiência melhorou substancialmente sem comprometer a potência do motor.

Além disso, o consumo de combustível apresentou variações significativas. Em rotações mais baixas, a adição de hidrogênio resultou em uma maior economia de combustível, refletida nos valores reduzidos de iSFC. Em rotações mais altas, a eficiência melhorada também contribuiu para uma redução no consumo de diesel, mesmo com as proporções elevadas de hidrogênio. Esses resultados sugerem que o hidrogênio pode ser uma estratégia eficaz para reduzir o consumo de combustível em motores diesel, especialmente em aplicações que operam em uma ampla faixa de rotações.

4.2.2 Emissões de poluentes

A adição de hidrogênio na mistura ar/combustível resultou em variações significativas nas emissões de diferentes poluentes. Enquanto as emissões de CO₂ foram reduzidas devido à menor quantidade de diesel injetado, as emissões de NO_x aumentaram, o que é consistente com a literatura existente. Este aumento pode ser atribuído às temperaturas mais altas de combustão causadas pelo hidrogênio, o que favorece a formação de NO_x. Além disso, foi observada uma variação nas emissões de outros poluentes, como CO, HC e fuligem (*soot*):

- CO (Monóxido de carbono): As emissões de CO, que resultam da combustão incompleta do combustível, mostraram uma tendência de redução com a

adição de hidrogênio, devido à combustão mais completa proporcionada pelo hidrogênio.

- HC (Hidrocarbonetos não queimados): As emissões de hidrocarbonetos não queimados também apresentaram uma redução com a adição de hidrogênio, uma vez que a combustão mais rápida e eficiente do hidrogênio reduz a quantidade de HC não oxidado na exaustão.
- Fuligem (*soot*): As emissões de fuligem apresentaram um comportamento variável. Em algumas condições de operação, as emissões de fuligem diminuíram com a adição de hidrogênio, especialmente em rotações mais altas e com maiores proporções de hidrogênio. No entanto, em outras condições, especialmente em rotações mais baixas ou com menores proporções de hidrogênio, foi observada uma tendência de aumento nas emissões de fuligem. Isso indica que a otimização das condições de combustão é essencial para controlar a emissão de fuligem ao utilizar hidrogênio como combustível suplementar.

Essa relação entre a eficiência térmica e as emissões de NO_x, CO, HC e *soot* representa um dos principais desafios na integração do hidrogênio em motores diesel. Tecnologias de mitigação, como EGR (Recirculação de Gases de Escape) e SCR (Redução Catalítica Seletiva), podem ser exploradas para lidar com essas emissões adicionais.

Os resultados são observados nas Tabelas 30, 31 e 32.

Tabela 30 – Comparação emissões com motor referência a 1500 RPM

Proporção de H₂ (%)	sCO₂ (g/kWh)	sCO (g/kWh)	sNO (g/kWh)	ssoot (g/kWh)	sHC (C7H16) (g/kWh)
Motor Ref.	2000,00 - 2400,00	500,00 - 700,00	3000,00 - 3400,00	1,00 - 1,40	10,00 - 14,00
0,00%	3950759,59	4071,85	113062,6	0,53	13,06
2,50%	269488,51	6939,7	115261,7	2,36	1490,7
5,00%	253677,39	40,86	152541,1	1,55	15,79
7,50%	2307997,4	40,35	222250,0	2,44	21,79
10,00%	2211121,2	42,48	322935,1	2,48	22,7

Fonte: o autor

Tabela 31 – Comparação emissões com motor referência a 2500 RPM

Proporção de H₂ (%)	sCO₂ (g/kWh)	sCO (g/kWh)	sNO (g/kWh)	ssoot (g/kWh)	sHC (C7H16) (g/kWh)
Motor Ref.	2000,00 - 2400,00	500,00 - 700,00	3000,00 - 3400,00	1,00 - 1,40	10,00 - 14,00
0,00%	2552789,3	3022,34	23749,32	0,62	26,79
2,50%	1681600,7	39,19	112717,4	1,28	15,43
5,00%	1411605,0	6,69	119988,0	2,84	1,25
7,50%	1137229,0	4,05	143652,8	2,22	1,47
10,00%	1026502,6	3,91	203833,5	0,0	1,57

Fonte: o autor

Tabela 32 – Comparação emissões com motor referência a 3500 RPM

Proporção de H₂ (%)	sCO₂ (g/kWh)	sCO (g/kWh)	sNO (g/kWh)	ssoot (g/kWh)	sHC (C7H16) (g/kWh)
Motor Ref.	2000,00 - 2400,00	500,00 - 700,00	3000,00 - 3400,00	1,00 - 1,40	10,00 - 14,00
0,00%	2306265,0	1154,5	51681,36	0,35	17,84
2,50%	1522684,6	186,09	100782,1	0,93	68,4
5,00%	1332949,0	19,66	111361,2	1,98	2,75
7,50%	1343064,0	8,81	144130,0	2,21	2,14
10,00%	1348749,6	9,24	194657,4	0,15	1,95

Fonte: o autor

4.2.3 Comparação com o motor de referência e desafios na implementação

A escolha do motor VW EA288 como referência é justificada pela sua relevância no mercado e conformidade com as normas Euro 6 de emissões. O motor é amplamente reconhecido por sua eficiência e baixas emissões, tornando-o uma excelente base para comparar os resultados das simulações. A comparação revela que, apesar das modificações na mistura de combustível, o motor modificado consegue manter a potência desejada enquanto apresenta melhorias em eficiência, consumo de combustível, e uma redução das emissões de CO₂, CO, HC e fuligem, com desafios relacionados ao aumento de NOx.

Apesar dos benefícios evidentes, a implementação do hidrogênio como combustível suplementar em motores diesel apresenta desafios técnicos, como o aumento das emissões de NOx e a necessidade de modificações no sistema de injeção de

combustível e na infraestrutura de abastecimento. Esses desafios devem ser considerados e abordados em futuras pesquisas para maximizar os benefícios do hidrogênio, garantindo que a tecnologia seja viável e sustentável a longo prazo.

Desta forma, a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível em motores de combustão interna ciclo Diesel foi eficaz em manter a potência do motor alinhada com a do motor de referência VW EA288, em todas as rotações estudadas. Além disso, a eficiência do motor melhorou significativamente, conforme evidenciado pela redução do consumo específico de combustível e pelas melhorias nas emissões de CO, CO₂, HC e fuligem. No entanto, o aumento das emissões de NO_x destaca a necessidade de estratégias de mitigação, como a aplicação de tecnologias EGR e SCR, para viabilizar o uso de hidrogênio como aditivo em motores diesel de forma sustentável.

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM A LITERATURA

Esta seção tem como objetivo comparar os resultados das simulações realizadas com os dados apresentados na literatura existente. A adição de hidrogênio em motores diesel vem sendo estudada extensivamente, e diversos estudos destacam os impactos sobre eficiência térmica, emissões e consumo de combustível. Neste contexto, serão analisados os principais aspectos das variáveis estudadas, como a metodologia de adição de hidrogênio, as condições operacionais e as emissões resultantes, correlacionando com os dados obtidos nas simulações realizadas.

4.3.1 Metodologia de adição de hidrogênio

No presente estudo, o hidrogênio foi adicionado diretamente na mistura ar/combustível antes da entrada no cilindro, simulando um sistema em que o hidrogênio é introduzido junto com o ar na câmara de combustão. Essa abordagem é semelhante à utilizada por Koten (2018), que também analisou a adição de hidrogênio no sistema de admissão, observando que variáveis como a pressão de alimentação e o ângulo de injeção desempenham um papel crucial na estabilidade da combustão e nas emissões de poluentes. Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com as observações de Koten (2018), mostrando que a adição de hidrogênio, quando controlada adequadamente, pode melhorar a eficiência do motor sem comprometer significativamente a estabilidade da combustão.

Outros estudos, como o de Saravanan *et al.* (2007), que também empregaram a adição de hidrogênio na admissão, observaram que essa técnica resultou em uma melhoria na eficiência térmica e uma redução nas emissões de poluentes. A similaridade na metodologia permite uma comparação direta entre os resultados obtidos.

BAYRAMOGLU e YILMAZ (2020), no entanto, exploraram a injeção direta de hidrogênio no cilindro, uma técnica que difere da abordagem adotada neste estudo. A

injeção direta pode oferecer maior controle sobre a quantidade de hidrogênio introduzida, resultando em uma mistura mais homogênea e uma combustão mais eficiente, mas também pode complicar o gerenciamento das emissões de NOx.

4.3.2 Eficiência térmica e consumo de combustível

Os resultados das simulações indicam um aumento significativo na eficiência térmica com a adição de hidrogênio, especialmente em condições de alta carga. Esse comportamento é corroborado por estudos como o de BAYRAMOGLU e YILMAZ (2020), onde a eficiência térmica aumentou de 43,4% para 58,8% conforme a proporção de hidrogênio foi elevada de 5% para 15%. De forma semelhante, Koten (2018) observou que a adição de hidrogênio resultou em um aumento máximo de 3% na eficiência térmica, refletindo na redução do consumo específico de combustível (BSFC).

O estudo de Zhou *et al.* (2016) apresentou resultados contrastantes, onde a eficiência térmica teve variações menos acentuadas, com quedas observadas em baixas cargas. Isso sugere que as condições de operação e a estratégia de injeção de hidrogênio são cruciais para otimizar o desempenho.

Em termos de consumo de combustível, os resultados deste estudo mostram uma tendência de redução, consistente com os achados de Saravanan *et al.* (2007), que também relataram uma redução significativa no consumo específico de combustível com a adição de hidrogênio. Essa redução pode ser atribuída ao aumento da eficiência de combustão proporcionado pelo hidrogênio, que tem um maior poder calorífico e permite uma combustão mais completa, reduzindo a quantidade de combustível necessário para produzir a mesma quantidade de energia.

4.3.3 Emissões

As emissões de NOx apresentaram um aumento nas simulações com a adição de hidrogênio, alinhando-se com os resultados de Zhou *et al.* (2016) e Koten (2018), que observaram aumentos consideráveis nas emissões de NOx devido ao aumento da temperatura de combustão associada ao uso de hidrogênio. Esse aumento é um reflexo direto das altas temperaturas atingidas durante a combustão do hidrogênio, que favorecem a formação de NOx, um dos principais desafios no uso de hidrogênio como combustível em motores de combustão interna.

As emissões de CO, CO₂ e fuligem apresentaram uma redução, comportamento também identificado em estudos como o de Saravanan *et al.* (2007), onde a adição de hidrogênio resultou em uma redução significativa dessas emissões, especialmente em condições de alta carga. A redução das emissões de CO e CO₂ pode ser explicada pela combustão mais completa proporcionada pelo hidrogênio, que gera menos subprodutos de combustão incompleta. Além disso, a redução da fuligem está associ-

ada à menor quantidade de carbono presente na mistura combustível, uma vez que o hidrogênio não contém carbono.

Os resultados das simulações realizadas neste estudo mostraram uma tendência similar, onde as emissões de CO e CO₂ foram reduzidas significativamente com o aumento da proporção de hidrogênio. A redução de fuligem também foi observada, embora com algumas variações dependendo das condições operacionais, como a pressão de admissão e o ângulo de injeção. Esses resultados estão alinhados com os achados de BAYRAMOGLU e YILMAZ (2020), que também relataram reduções em CO e fuligem, mas um aumento nas emissões de NO_x, sugerindo que a otimização da adição de hidrogênio deve considerar não apenas a eficiência térmica, mas também as estratégias de controle de emissões.

4.3.4 Discussão sobre as variáveis operacionais

Neste estudo, diversas variáveis operacionais foram ajustadas para otimizar o desempenho e as emissões do motor ao adicionar hidrogênio na mistura ar/combustível. Entre essas variáveis estão:

- Pressão do ar de sobrealimentação: Nas simulações, a pressão do ar de sobrealimentação foi ajustada para otimizar a mistura ar/hidrogênio. Essa variável é crucial, pois influencia a densidade do ar na câmara de combustão e, conseqüentemente, a eficiência da combustão e as emissões. Estudos como o de Saravanan *et al.* (2007) destacam que uma pressão de admissão otimizada pode melhorar a eficiência térmica e reduzir as emissões de poluentes.
- *Swirl*: O *swirl* foi utilizado nas simulações para melhorar a mistura do ar com o hidrogênio e o diesel. A intensidade do *swirl* pode influenciar a homogeneidade da mistura ar/combustível e a taxa de combustão. No entanto, nenhum dos artigos revisados menciona diretamente o uso ou o impacto do *swirl* nas condições estudadas. Portanto, os efeitos observados nesta dissertação em relação ao *swirl* podem indicar um campo promissor para estudos futuros.
- Número de bicos injetores: O uso de dois bicos injetores de diesel permitiu um controle mais refinado da quantidade de combustível injetada em cada ciclo, melhorando a combustão e reduzindo as emissões. Estudos anteriores, como os de BAYRAMOGLU e YILMAZ (2020), usaram configurações diferentes de injeção, mas observaram que a adição de bicos adicionais pode ajudar a melhorar a mistura e a eficiência da combustão.
- Composição do ar de entrada: O ar utilizado nas simulações foi manipulado para conter apenas O₂ e N₂, com a adição de H₂ nas simulações com

hidrogênio. Essa abordagem difere de estudos que utilizaram ar atmosférico padrão, impactando significativamente a eficiência de combustão e as emissões. A composição do ar é uma variável fundamental, pois altera a quantidade de oxigênio disponível para a combustão e pode influenciar a formação de NO_x, como observado nos resultados deste estudo.

- **Ângulo de injeção:** O ângulo de injeção foi cuidadosamente ajustado nas simulações para otimizar a combustão e minimizar as emissões de NO_x. Estudos como o de Koten (2018) confirmam que o ângulo de injeção pode ter um impacto significativo na eficiência térmica e nas emissões, especialmente no que diz respeito à formação de poluentes como NO_x.
- **Massa de diesel:** A quantidade de diesel injetada foi ajustada para manter a potência do motor enquanto se adicionava hidrogênio à mistura. Isso garantiu que a eficiência do motor fosse mantida sem um aumento significativo no consumo de combustível. Estudos como o de Saravanan *et al.* (2007) mostram que o controle preciso da massa de diesel é essencial para otimizar o desempenho do motor em modos de combustão dual-fuel.
- **Porcentagens de hidrogênio:** As simulações consideraram várias proporções de hidrogênio na mistura, variando de 0% a 10%. Estudos como o de BAYRAMOGLU e YILMAZ (2020) também exploraram diferentes proporções de hidrogênio, destacando que aumentos graduais na proporção de hidrogênio podem levar a melhorias na eficiência térmica, mas também podem aumentar as emissões de NO_x se não forem acompanhados de ajustes adequados em outras variáveis operacionais.

A comparação dos resultados das simulações realizadas neste estudo com os dados da literatura confirma que a adição de hidrogênio em motores diesel pode melhorar significativamente a eficiência térmica e reduzir as emissões de CO, CO₂ e fuligem, embora o aumento das emissões de NO_x continue sendo um desafio. As variáveis operacionais, como método de adição de hidrogênio, ângulo de injeção e composição do ar de entrada, têm um impacto substancial nos resultados, e sua otimização é essencial para alcançar um equilíbrio entre eficiência e emissões.

Estudos futuros devem focar na otimização dessas variáveis e na implementação de tecnologias de controle de NO_x, como sistemas de recirculação de gases de escape (EGR) e catalisadores de redução seletiva (SCR), para maximizar os benefícios do uso de hidrogênio em motores diesel.

4.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO E REDUÇÃO DO DIESEL INJETADO

A adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e a redução do diesel injetado em motores de combustão interna ciclo Diesel têm sido exploradas como estratégias promissoras para melhorar a eficiência térmica e reduzir as emissões de poluentes. Este capítulo discute as vantagens e desvantagens observadas a partir das simulações realizadas neste estudo, considerando as condições operacionais e os impactos sobre a eficiência do motor e as emissões de poluentes.

4.4.1 Vantagens da adição de hidrogênio e redução do diesel injetado

As simulações realizadas mostram que a adição de hidrogênio resulta em melhorias significativas na eficiência térmica do motor, especialmente em condições de alta carga. Com a proporção de hidrogênio variando de 2,5% a 10%, observou-se uma redução no consumo específico de combustível, refletindo diretamente em uma maior eficiência do sistema. Por exemplo, em uma das simulações realizadas a 2500 RPM, com 7,5% de hidrogênio, o consumo específico de combustível (iSFC) caiu de 189,51 g/kWh (sem hidrogênio) para 106,57 g/kWh, representando uma melhoria significativa.

Além disso, as emissões de CO e CO₂ foram reduzidas de maneira consistente com o aumento da proporção de hidrogênio na mistura. Esta redução é atribuída à combustão mais completa proporcionada pelo hidrogênio, que, com seu alto poder calorífico, facilita a oxidação dos compostos de carbono, diminuindo assim a formação de CO e CO₂. A redução nas emissões de fuligem também foi observada, especialmente em cenários com alta proporção de hidrogênio, devido à menor quantidade de carbono presente na mistura ar/combustível.

Outro ponto positivo é a manutenção da potência do motor, mesmo com a redução do diesel injetado. Ao ajustar variáveis como a pressão de sobrealimentação e o ângulo de injeção, foi possível atingir potências próximas ao motor de referência, indicando que a adição de hidrogênio não comprometeu o desempenho do motor.

4.4.2 Desvantagens e desafios

Apesar das vantagens mencionadas, a adição de hidrogênio também apresentou desafios significativos. O mais notável foi o aumento nas emissões de NO_x, observado em todas as simulações com hidrogênio. Este aumento é diretamente relacionado à elevação das temperaturas de combustão, uma vez que o hidrogênio queima a temperaturas mais altas do que o diesel convencional. Por exemplo, em simulações com 10% de hidrogênio, as emissões de NO_x aumentaram significativamente, atingindo valores que podem ser considerados preocupantes em termos de regulamentações ambientais.

Outro desafio observado foi a dificuldade em controlar a estabilidade da combustão em certas condições operacionais, especialmente em baixas rotações e com alta proporção de hidrogênio. Embora o ajuste do ângulo de injeção e do *swirl* tenha ajudado a mitigar esses efeitos, ainda houve variações na eficiência térmica e na formação de poluentes, sugerindo a necessidade de um controle mais preciso das variáveis operacionais.

Além disso, a manipulação da composição do ar de entrada (contendo apenas O_2 , N_2 e H_2) nas simulações, enquanto necessário para isolar os efeitos do hidrogênio, representa uma simplificação que pode não capturar completamente os comportamentos em um cenário real, onde o ar contém uma variedade de outros componentes. Essa simplificação pode ter levado a uma subestimação ou superestimação de certos efeitos, como a formação de NO_x .

4.4.3 Considerações finais

As simulações realizadas neste estudo demonstram que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível, juntamente com a redução do diesel injetado, pode proporcionar melhorias significativas na eficiência térmica do motor e na redução de emissões de CO , CO_2 e fuligem. No entanto, o aumento das emissões de NO_x e os desafios relacionados à estabilidade da combustão indicam que ainda há barreiras significativas a serem superadas para que essa tecnologia seja viável em larga escala.

Os resultados sugerem que futuras pesquisas devem se concentrar na otimização das variáveis operacionais, como a pressão de sobrealimentação, o ângulo de injeção e o controle de *swirl*, bem como na implementação de tecnologias avançadas de controle de NO_x , como a recirculação de gases de escape (EGR) e os catalisadores de redução seletiva (SCR). Além disso, estudos experimentais são necessários para validar os resultados das simulações e explorar a viabilidade prática da adição de hidrogênio em motores diesel.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões gerais obtidas a partir das simulações numéricas CRFD realizadas ao longo deste estudo. As conclusões focam nos principais achados relacionados aos efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e da redução do diesel injetado em um motor de combustão interna ciclo Diesel. Serão discutidos aspectos como o desempenho do motor em termos de eficiência, emissões e manutenção de potência, bem como as implicações desses resultados para o uso de hidrogênio em motores diesel e são fornecidas recomendações para futuras pesquisas.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

O principal objetivo deste estudo foi analisar, por meio de simulação numérica CRFD, os efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível e da redução do diesel injetado em um motor de combustão interna ciclo Diesel, garantindo que os valores de potência fossem mantidos e que as emissões de poluentes fossem reduzidas.

As simulações realizadas mostraram que a adição de hidrogênio, até a proporção de 7,5%, melhorou significativamente a eficiência térmica do motor, permitindo uma redução na quantidade de diesel injetado sem comprometer a potência. A potência do motor simulado foi ajustada para se alinhar à curva de potência do motor de referência em três pontos principais (1500, 2500 e 3500 RPM). Após esse alinhamento inicial, as simulações com adição de hidrogênio foram realizadas, mantendo a potência dentro dos níveis esperados, similar ao motor de referência, o que confirma que a substituição parcial do diesel por hidrogênio pode ser realizada sem perda de desempenho.

Em termos de emissões, houve uma redução substancial de CO₂, CO e fuligem com a adição de hidrogênio, refletindo uma combustão mais limpa e eficiente. Contudo, foi observado um aumento nas emissões de NO_x, evidenciando a necessidade de implementar tecnologias adicionais de controle de emissões para mitigar esse efeito adverso.

5.1.1 Avaliação das proporções de hidrogênio na mistura ar/combustível

As simulações realizadas com diferentes proporções de hidrogênio (0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%) na mistura ar/combustível mostraram que a adição de hidrogênio altera significativamente o funcionamento do motor de combustão interna ciclo Diesel. Observou-se que, até a proporção de 7,5%, a eficiência térmica do motor aumentou de forma consistente, resultando em uma combustão mais completa e eficiente. Crucial-

mente, a potência do motor simulado, que foi ajustada para replicar a curva de potência do motor de referência em três rotações (1500, 2500 e 3500 RPM), foi mantida dentro desses níveis durante as simulações com diferentes proporções de hidrogênio, mesmo com a redução do diesel injetado. Isso foi possível graças a ajustes em variáveis operacionais, como a pressão de sobrealimentação, o ângulo de injeção e o *swirl*, que otimizaram a mistura e garantiram o desempenho adequado.

Além da eficiência térmica e da potência, a adição de hidrogênio impactou a dinâmica de combustão e a estabilidade do motor. À medida que a proporção de hidrogênio aumentava, a combustão tornou-se mais rápida e completa, o que melhorou a eficiência, mas também trouxe desafios em termos de estabilidade, especialmente em baixas rotações. Esses desafios foram mais pronunciados em proporções mais altas de hidrogênio, onde se tornou essencial um controle preciso das variáveis operacionais para evitar instabilidades na combustão.

No que diz respeito às emissões, a adição de hidrogênio teve um efeito significativo. As emissões de CO₂, CO e fuligem diminuíram com o aumento da proporção de hidrogênio, especialmente até 7,5%. Contudo, as emissões de NO_x aumentaram substancialmente com proporções de hidrogênio acima de 7,5%, devido às temperaturas de combustão mais altas associadas ao hidrogênio. Isso sugere que, embora a adição de hidrogênio ofereça vantagens em termos de eficiência e redução de alguns poluentes, ela também introduz novos desafios que precisam ser gerenciados.

Esses resultados indicam que a proporção de hidrogênio na mistura ar/combustível deve ser cuidadosamente otimizada. Enquanto 7,5% parece ser a proporção ideal para maximizar a eficiência e manter a potência, ao mesmo tempo que reduz as emissões de poluentes, o aumento das emissões de NO_x destaca a necessidade de estratégias adicionais de controle de emissões.

5.1.2 Impacto da adição de hidrogênio e da redução do diesel injetado

As simulações realizadas para avaliar o impacto da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível, juntamente com a redução do diesel injetado, demonstraram que essa combinação pode influenciar de maneira significativa a eficiência do motor ciclo Diesel e o seu perfil de emissões. A adição de hidrogênio permitiu a redução da quantidade de diesel injetado, contribuindo para o processo de descarbonização do motor, sem comprometer a eficiência térmica ou a potência do motor.

Com a redução do diesel injetado, observou-se uma diminuição nas emissões de CO₂ e CO, o que indica uma combustão mais limpa e eficiente. Essa redução é particularmente importante no contexto da descarbonização, pois menos diesel injetado significa menos carbono queimado, o que reduz diretamente as emissões de CO₂, o principal gás de efeito estufa associado à combustão de hidrocarbonetos. Além disso, a combustão mais eficiente proporcionada pela presença de hidrogênio reduziu as

emissões de CO, um indicativo de que o processo de combustão foi mais completo, minimizando a formação de poluentes resultantes da queima incompleta do combustível.

No entanto, a redução do diesel injetado também apresentou desafios, especialmente no que diz respeito à estabilidade da combustão e à formação de NOx. A adição de hidrogênio, enquanto contribui para uma combustão mais rápida e completa, também resultou em temperaturas mais altas na câmara de combustão. Essas temperaturas elevadas favoreceram a formação de NOx, que aumentou significativamente à medida que o diesel foi substituído por hidrogênio. Isso sugere que, embora a descarbonização por meio da redução de diesel seja benéfica para certos aspectos da eficiência e das emissões, ela também exige atenção especial ao controle de emissões de NOx.

Esses resultados confirmam que a combinação de hidrogênio com a redução de diesel injetado pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a eficiência e reduzir as emissões de CO₂ e CO, contribuindo para a descarbonização do motor. No entanto, é necessário desenvolver e implementar técnicas adicionais de controle de NOx para garantir que os benefícios dessa abordagem sejam plenamente realizados sem comprometer a viabilidade ambiental.

5.1.3 Avaliação das emissões de CO₂, CO, Fuligem e NOx

As simulações indicaram que a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível resultou em uma redução significativa nas emissões de CO₂. Essa diminuição foi observada de forma mais acentuada até a proporção de 7,5% de hidrogênio, o que se deve à menor quantidade de carbono disponível na mistura para combustão. Como o hidrogênio não contém carbono, ele substitui parcialmente o diesel, reduzindo a formação de CO₂ como subproduto da combustão. Portanto, a redução do diesel injetado contribuiu diretamente para o processo de descarbonização do motor.

As emissões de CO também apresentaram uma redução com o aumento da proporção de hidrogênio na mistura. O CO, que é um indicativo de combustão incompleta, foi menos presente à medida que a proporção de hidrogênio aumentava, especialmente até 7,5%. Isso sugere que o hidrogênio promove uma combustão mais completa, resultando em menores quantidades de CO liberado.

Por outro lado, as emissões de fuligem (*soot*) tiveram um comportamento mais complexo. Em rotações mais baixas, como 1500 e 2500 RPM, as emissões de fuligem inicialmente aumentaram com a adição de hidrogênio, atingindo picos em proporções intermediárias de hidrogênio. No entanto, em rotações mais altas, como 3500 RPM, as emissões de fuligem começaram a diminuir significativamente em proporções mais altas de hidrogênio, atingindo níveis quase nulos a 10%. Esse comportamento sugere que o hidrogênio pode contribuir para uma redução efetiva da fuligem em condições de operação mais severas, como em altas rotações.

Por fim, as emissões de NOx mostraram um aumento significativo à medida que a proporção de hidrogênio na mistura aumentava. Esse aumento está relacionado às altas temperaturas de combustão geradas pela presença de hidrogênio, que favorecem a formação de NOx. As emissões de NOx aumentaram substancialmente em proporções de hidrogênio superiores a 7,5%, indicando que, apesar dos benefícios do hidrogênio em termos de redução de CO₂, CO e fuligem, há um desafio significativo em controlar as emissões de NOx.

Consideração Importante: É essencial destacar que os resultados das simulações foram obtidos diretamente do coletor de descarga, sem considerar o pós-tratamento dos gases de escape. Em motores reais, as emissões são tipicamente tratadas por sistemas de pós-tratamento, como filtros de partículas e catalisadores de redução de NOx, o que pode reduzir significativamente as emissões observadas. Além disso, o modelo de simulação considerou o ar de entrada composto apenas de nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂), sem outros componentes como vapor de água e CO₂, que podem influenciar os resultados. Essas diferenças devem ser levadas em conta ao comparar as simulações com dados de motores em condições reais.

5.1.4 Ajuste das variáveis de operação para manutenção da potência

As simulações demonstraram que, para manter a potência do motor em níveis semelhantes ao motor de referência, foram necessários ajustes cuidadosos em diversas variáveis operacionais. A redução do diesel injetado e a adição de hidrogênio à mistura ar/combustível exigiram uma reavaliação das condições operacionais para garantir que o motor continuasse a fornecer a potência esperada sem comprometer a eficiência ou aumentar significativamente as emissões de poluentes.

Durante as simulações, observou-se que o valor de lambda, que representa a relação ar/combustível no motor, apresentou variações significativas, especialmente com o aumento da proporção de hidrogênio. Em algumas condições, o valor de lambda caiu abaixo de 1, o que não é característico de motores Diesel, pois indica uma mistura rica (mais combustível do que ar), o que é inadequado para o funcionamento típico desses motores. Para corrigir essa situação e garantir que o lambda se mantivesse dentro dos valores adequados para um motor Diesel, foi necessário realizar ajustes em várias variáveis operacionais.

Uma das variáveis críticas ajustadas foi a massa de diesel injetado, que precisou ser cuidadosamente regulada para evitar uma mistura excessivamente rica, que levaria o lambda a valores abaixo do ideal. O ângulo de injeção do diesel também foi otimizado para garantir uma combustão eficiente, especialmente na presença de hidrogênio, o que ajudou a manter o valor de lambda acima de 1,2, um valor mais típico para motores Diesel.

A pressão de sobrealimentação foi outra variável ajustada, garantindo que o

motor recebesse a quantidade correta de ar para uma combustão eficiente, mesmo com a adição de hidrogênio. Esse ajuste foi fundamental para manter a densidade da mistura ar/combustível em níveis que garantissem uma combustão adequada e evitar que o valor de λ caísse para níveis inadequados.

Além disso, o controle do *swirl*, que influencia a mistura do ar com o combustível dentro da câmara de combustão, foi ajustado para melhorar a homogeneidade da mistura ar/combustível. Sem um controle preciso do *swirl*, a mistura poderia se tornar menos homogênea, especialmente em baixas rotações e em condições com maior proporção de hidrogênio, o que resultaria em variações na eficiência da combustão e na potência do motor.

Esses ajustes nas variáveis operacionais foram fundamentais para compensar a redução do diesel injetado e garantir que a potência do motor simulado, que foi calibrado para replicar a curva de potência do motor de referência (VW EA288) em três rotações específicas, fosse mantida dentro dos parâmetros desejados. Contudo, à medida que a proporção de hidrogênio aumentou, foi necessário um controle mais rigoroso dessas variáveis para evitar que o λ caísse para valores inadequados e para garantir a estabilidade e eficiência da combustão.

Esses resultados sublinham a importância de um ajuste fino das variáveis operacionais ao integrar hidrogênio como combustível suplementar em motores Diesel. Embora seja possível manter a potência do motor semelhante à do motor de referência, isso requer uma abordagem cuidadosa e precisa para equilibrar a eficiência, as emissões e a estabilidade operacional, especialmente em condições onde o valor de λ precisa ser mantido dentro de parâmetros típicos para motores Diesel.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, diversas áreas surgem como potenciais para aprofundamento em futuras pesquisas. As recomendações a seguir visam orientar trabalhos futuros que possam contribuir para a otimização do uso de hidrogênio em motores ciclo Diesel, abordando tanto os desafios observados quanto as oportunidades identificadas.

Uma das principais áreas de foco é a otimização das variáveis operacionais, como a massa de diesel injetado, o ângulo de injeção, a pressão de sobrealimentação e o *swirl*. Essas variáveis foram fundamentais para manter a eficiência do motor, a estabilidade da combustão e garantir que o valor de λ se mantivesse dentro dos parâmetros característicos de motores Diesel. Futuros estudos devem explorar diferentes configurações dessas variáveis para maximizar a eficiência térmica e minimizar as emissões de poluentes, especialmente NOx.

Outra área crítica a ser explorada é a simulação com ar real. No presente estudo, o modelo de simulação considerou o ar de entrada composto apenas por nitrogênio

(N₂) e oxigênio (O₂). Em condições reais, o ar contém outros componentes, como vapor de água, dióxido de carbono (CO₂), argônio e outros gases em pequenas concentrações, que podem influenciar significativamente os resultados. Recomenda-se que futuras simulações incorporem a composição real do ar para obter uma modelagem mais precisa das condições de operação do motor, permitindo uma melhor correlação com dados experimentais e uma avaliação mais realista dos impactos da adição de hidrogênio.

Além disso, é essencial considerar a durabilidade dos componentes do motor ao longo do tempo. O uso contínuo de hidrogênio como combustível suplementar pode ter efeitos adversos sobre os materiais e componentes do motor, como aumento de desgaste ou corrosão. Pesquisas futuras devem avaliar como diferentes proporções de hidrogênio e condições operacionais afetam a durabilidade, garantindo que a tecnologia seja sustentável a longo prazo.

Em relação às emissões, recomenda-se um foco especial na eficácia dos sistemas de pós-tratamento de gases, como a recirculação de gases de escape (EGR) e os catalisadores de redução seletiva (SCR), ao utilizar hidrogênio. Considerando o aumento nas emissões de NO_x com a adição de hidrogênio, estudos futuros devem explorar como esses sistemas podem ser ajustados ou otimizados para mitigar os efeitos negativos, garantindo que os benefícios do hidrogênio em termos de eficiência e redução de CO₂ e CO não sejam comprometidos.

Por fim, é crucial que os resultados das simulações sejam validados por meio de estudos experimentais. Embora as simulações tenham fornecido uma compreensão detalhada dos processos internos do motor, testes em condições reais de operação são necessários para verificar a viabilidade prática das estratégias de adição de hidrogênio e redução do diesel injetado. A comparação dos resultados de simulações com dados experimentais de testes de bancada ajudará a confirmar a precisão dos modelos numéricos utilizados, aumentando a credibilidade e a aplicabilidade prática dos achados desta dissertação.

Essas recomendações têm como objetivo não apenas enfrentar os desafios observados neste estudo, mas também abrir novas oportunidades para a otimização do uso de hidrogênio em motores Diesel, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias de transporte mais limpas e eficientes.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma análise detalhada dos efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível em motores ciclo Diesel, utilizando simulações numéricas CRFD. Os resultados indicaram que a introdução de hidrogênio, aliada à redução do diesel injetado, pode trazer benefícios significativos em termos de eficiência térmica e redução de emissões de CO₂, CO e fuligem. Essa combinação não apenas promove

a descarbonização do motor, mas também mantém a eficiência e a potência do motor simulado alinhadas com os níveis estabelecidos pela curva de potência do motor de referência, dentro das rotações de 1500, 2500 e 3500 RPM, desde que as variáveis operacionais sejam cuidadosamente ajustadas.

No entanto, um dos principais desafios identificados foi o aumento das emissões de NO_x, decorrente das elevadas temperaturas de combustão associadas ao uso de hidrogênio. Esse problema destaca a necessidade de desenvolver e implementar estratégias de controle de emissões, como a recirculação de gases de escape (EGR) e catalisadores de redução seletiva (SCR), para mitigar os impactos ambientais adversos e assegurar que os benefícios do hidrogênio sejam plenamente realizados.

A estabilidade da combustão também se mostrou uma área crítica que requer atenção especial. A introdução de hidrogênio altera significativamente a dinâmica de combustão, exigindo ajustes finos em variáveis operacionais como a pressão de sobrealimentação, o ângulo de injeção, a massa de diesel injetado e o *swirl*. Esses ajustes são essenciais para garantir que o motor opere de maneira eficiente e estável, evitando problemas como a combustão instável e a perda de potência.

Adicionalmente, é importante considerar que as simulações realizadas neste estudo utilizaram um modelo de ar de entrada composto apenas por nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂). Em condições reais, o ar de entrada contém outros componentes, como vapor de água e dióxido de carbono (CO₂), que podem influenciar significativamente os resultados. Portanto, recomenda-se que futuras pesquisas incluam a composição real do ar nas simulações para obter uma modelagem mais precisa e realista das condições de operação do motor.

Embora as simulações tenham oferecido insights valiosos sobre o comportamento do motor, a validação experimental desses resultados é fundamental. Testes em condições reais de operação são necessários para verificar a viabilidade prática das estratégias propostas e para ajustar os modelos numéricos de modo a refletir mais fielmente o comportamento do motor em cenários reais. Essas validações contribuirão para a implementação de tecnologias de propulsão mais eficientes e sustentáveis, alinhadas com as exigências ambientais e de desempenho atuais.

As recomendações feitas neste capítulo visam orientar futuras pesquisas, ajudando a superar os desafios identificados e a expandir o conhecimento sobre o uso de hidrogênio em motores Diesel. Com a continuidade dos estudos e a implementação das sugestões propostas, espera-se que a tecnologia possa evoluir para aplicações práticas, contribuindo para a transição para um transporte mais limpo e eficiente.

REFERÊNCIAS

AMOROSO DA SILVA, Inara. Hidrogênio: Combustível do Futuro. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 20, n. 2, p. 122–126, 2016. Acesso em: 29 jul. 2024.

ASTRAL DIESEL. **Bico injetor Bosch Volkswagen 9-170 Delivery 2017 até 2020**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 7 ago. 2024. Disponível em: <https://astraldiesel.store/produtos/bico-injetor-bosch-volkswagen-9-170-delivery-2017-ate-2020-0445120297-remanufaturado/>.

AVL. **AVL FIRE M User Guide**. [S.l.], 2023.

AVL. **Release 2023 R1: Powertrain – Performance and Thermal**. [S.l.], 2023. Disponível em: [AVL%20FIRE%E2%84%A2%20M%20Documentation](https://www.avl.com/Products/Powertrain/Documentation).

AVL. **Zonas no modelo ECFM-3Z**. [S.l.: s.n.], 2024. Acesso em: 7 ago. 2024. Disponível em: https://resbox.app.avl.com/doc/R2023.1/FIRE_M/FIRE_M_UserGuide/topics/FIRE_M_Combustion_Coherent_Flame_Model.html.

BASARA, H. et al. Advanced modeling techniques for combustion and emission prediction in diesel engines. **International Journal of Engine Research**, v. 24, n. 1, p. 45–60, 2023.

BAYRAMOGLU, K.; YILMAZ, I. A study on the effects of hydrogen addition on the combustion characteristics and emissions of a diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 1, p. 751–760, 2020.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna: volume 1**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012.

CANCINO, L. R. **AVL FIRE M data post-processing**. [S.l.: s.n.], jun. 2024. <https://labmci.ufsc.br/>. Python script for internal combustion engine simulation and data analysis.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.; KANOĞLU, Mehmet. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 9. ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2019. ISBN 9781259822674.

DIESEL TECHNOLOGY FORUM. **Funcionamento Injetor Diesel**. [S.l.: s.n.], 2010.

Acesso em: 7 ago. 2024. Disponível em:

https://www.youtube.com/watch?v=01XcD5DH2_w.

GIRAMONDI, M. et al. Study on the optimization of diesel combustion using CFD simulations. **Journal of Combustion Science and Technology**, v. 30, n. 2, p. 233–245, 2021.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2018.

HOSSEINI, Seyyed Hassan; TSOLAKIS, Athanasios; ALAGUMALAI, Avinash; MAHIAN, Omid; LAM, Su Shiung; PAN, Junting; PENG, Wanxi; TABATABAEI, Meisam; AGHBASHLO, Mortaza. Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 98, p. 101100, 2023. ISSN 0360-1285.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE)**. Brasília, 2011. Disponível em:

<https://www.ibama.gov.br>. Acesso em: 30 jul. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2019**. Paris, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 30 jul. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Power Generation Costs in 2019**. Abu Dhabi, 2020. Disponível em:

<https://www.irena.org>. Acesso em: 30 jul. 2024.

JAMROZIK, Arkadiusz; GRAB-ROGALIŃSKI, Karol; TUTAK, Wojciech. Hydrogen effects on combustion stability, performance and emission of diesel engine.

International Journal of Hydrogen Energy, v. 45, n. 38, p. 19936–19947, 2020. ISSN 0360-3199.

KOTEN, H. Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions.

International Journal of Hydrogen Energy, v. 43, n. 22, p. 10511–10519, 2018. ISSN 0360-3199.

M, AVL FIRE™. **Documentation**. Versão Version R2023.1. [S.l.], 2023.

MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**. 5. ed. Porto: Engebook, 2016.

MECÂNICA ONLINE. **Motor a gasolina contra motor a diesel**. [S.l.: s.n.], 2023.

Acesso em: 7 ago. 2024. Disponível em:

<https://youtu.be/2lQE4SYPX5g?si=RYV-JUv201h7CtPA>.

ÖZER, Salih; VURAL, Erdinç. The effect of the addition of H₂, H₂+HHO and H₂+HHO+O₂ from the intake manifold on exhaust emissions in a diesel generator using diesel/toluene/diethyl ether as pilot fuel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 52, p. 1247–1260, 2024. ISSN 0360-3199.

PETROBRAS. **Diesel e seus usos**. [S.l.], 2023.

RIBAS, S. et al. Tecnologias para Redução de Emissões em Motores Diesel. **Revista de Engenharia Automotiva**, 2016.

SÁNCHEZ, Yesid Ortiz. **Modelagem e análise numérica da combustão de óleo vegetal in-natura em motores a combustão interna de ignição por compressão**. 2017. F. 242. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico.

SARAVANAN, N.; NAGARAJAN, G.; DHANASEKARAN, C.; KALAISELVAN, K.M. Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 16, p. 4071–4080, 2007. TMS06: Symposium on Materials in Clean Power Systems. ISSN 0360-3199.

TAP F.; SCHAPOTSCHNIKOW, P. **Efficient Combustion Modeling Based on Tabkin® CFD Look-up Tables: A Case Study of a Lifted Diesel Spray Flame**. [S.l.], 2012.

TEIXEIRA R.; CALIA, L. Impactos ambientais dos motores diesel. **Revista de Sustentabilidade**, 2013.

VOLKSWAGEN AG. **Service Training Self Study Program 820433: The EA288 Diesel Engine Family Design and Function**. Wolfsburg, Germany, 2013. Manual técnico.

ZAREEI, Javad; ROHANI, Abbas; NUÑEZ ALVAREZ, José Ricardo. The effect of EGR and hydrogen addition to natural gas on performance and exhaust emissions in a diesel engine by AVL fire multi-domain simulation, GPR model, and multi-objective genetic algorithm. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 50, p. 21565–21581, 2022. ISSN 0360-3199.

ZHOU, J.H.; CHEUNG, C.S.; ZHAO, W.Z.; LEUNG, C.W. Diesel–hydrogen dual-fuel combustion and its impact on unregulated gaseous emissions and particulate emissions under different engine loads and engine speeds. **Energy**, v. 94, p. 110–123, 2016. ISSN 0360-5442.

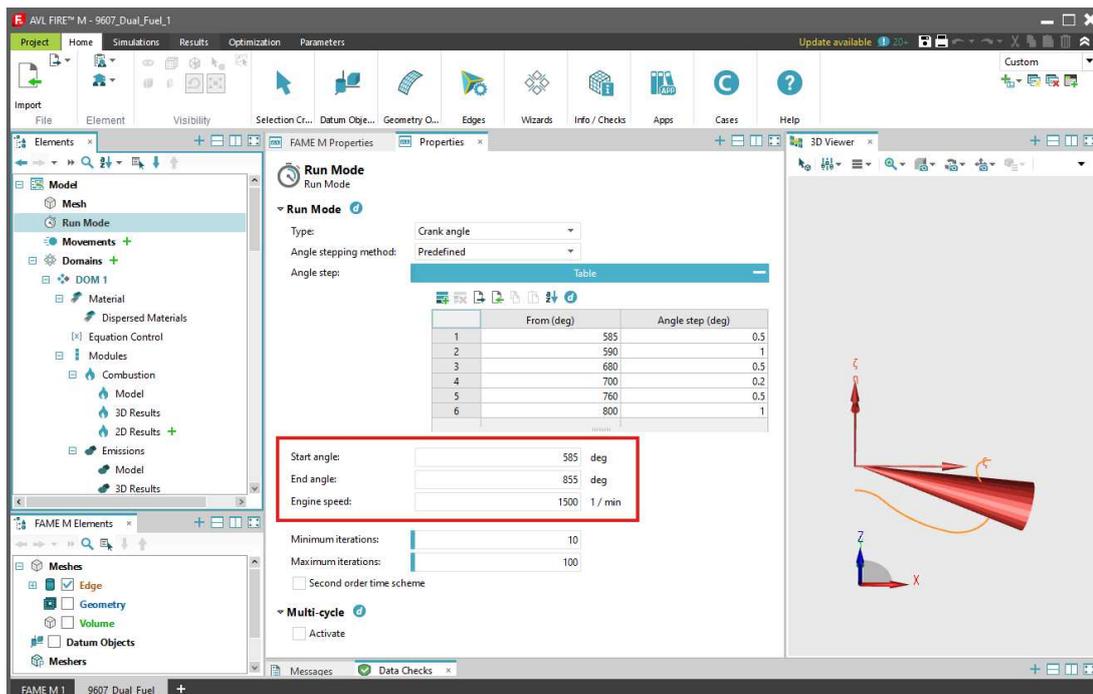
ANEXO A – ROTEIRO DAS SIMULAÇÕES (ROAD MAP)

Neste estudo, foram realizadas simulações numéricas utilizando o software AVL FIRE™ M, versão 2023 R1, com o objetivo de avaliar o impacto da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível em um motor de combustão interna ciclo Diesel. As simulações foram planejadas de modo a capturar o comportamento do motor sob diferentes condições operacionais e proporções de hidrogênio, permitindo uma análise abrangente de sua eficiência e das emissões de poluentes.

O roteiro apresentado a seguir exemplifica e demonstra os parâmetros adotados nas simulações, incluindo as variáveis de controle, como a pressão de alimentação do ar e do hidrogênio, o ângulo de injeção e as rotações do motor, etc.

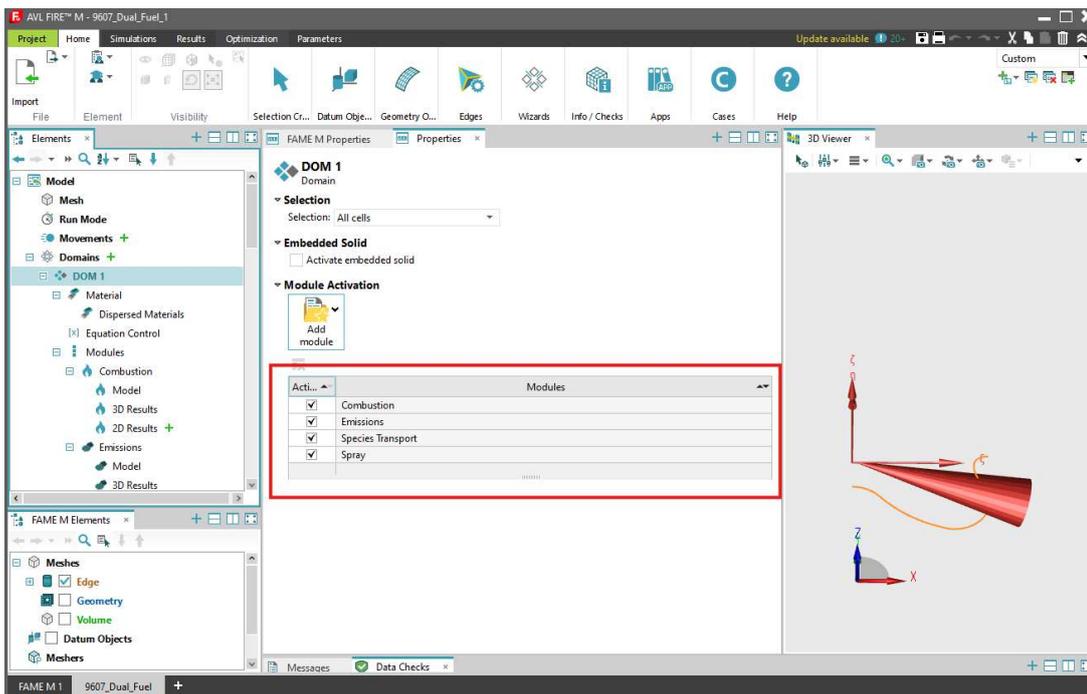
As figuras incluídas no *Road Map* exemplificam e ilustram as configurações utilizadas nas simulações realizadas.

Figura 43 – Intervalo das simulações e RPM



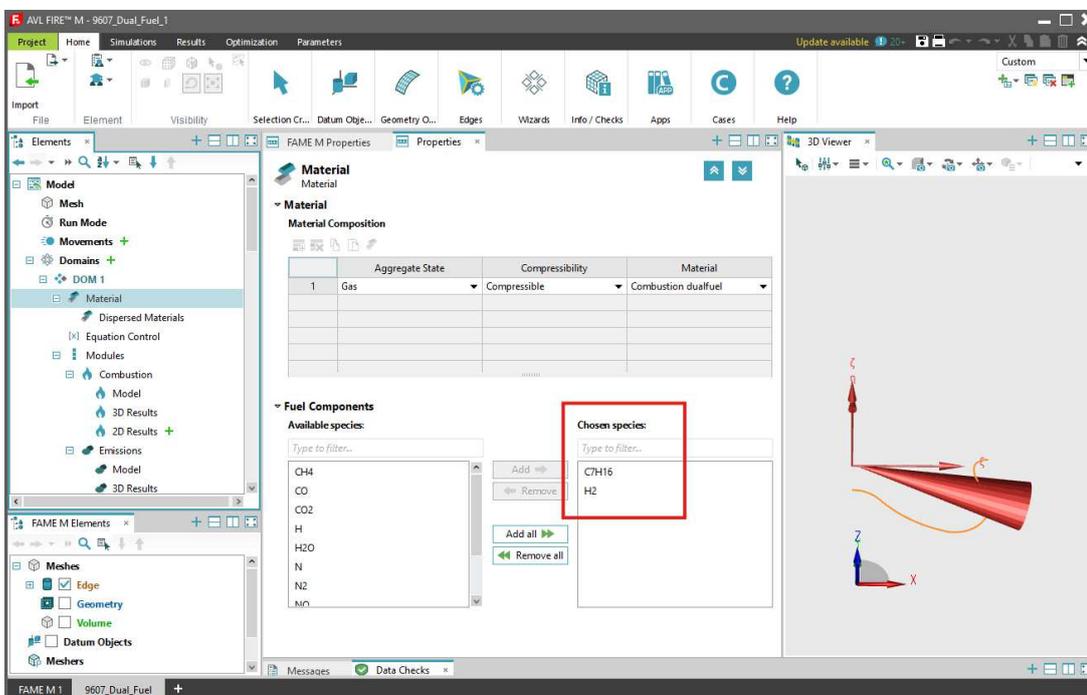
Fonte: o autor

Figura 44 – Módulos



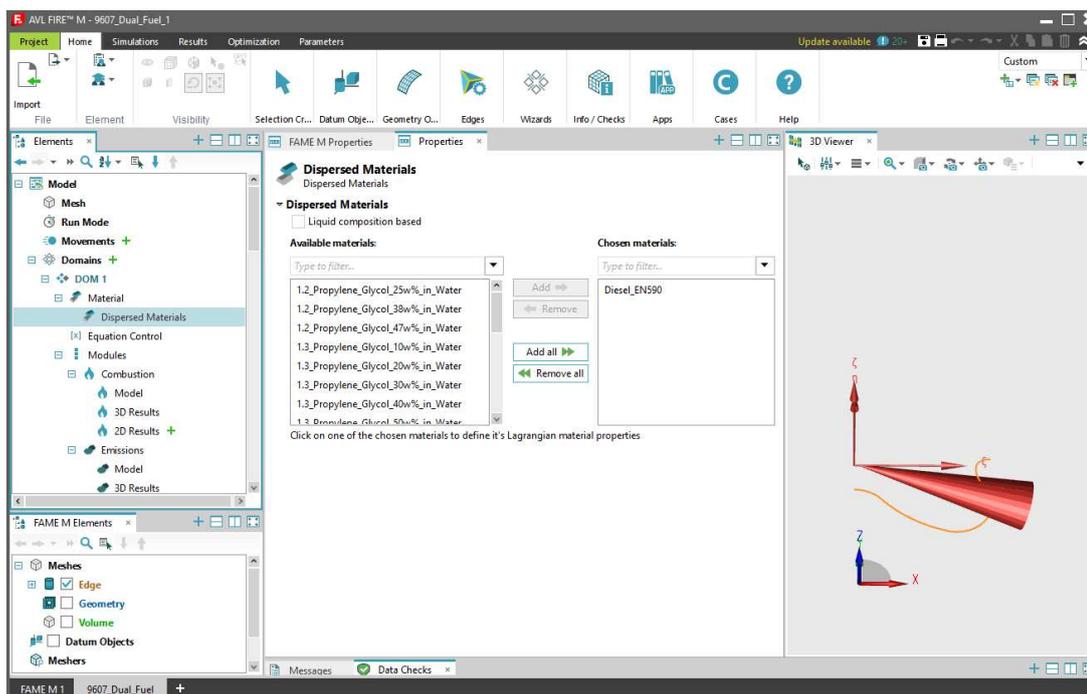
Fonte: o autor

Figura 45 – Materiais



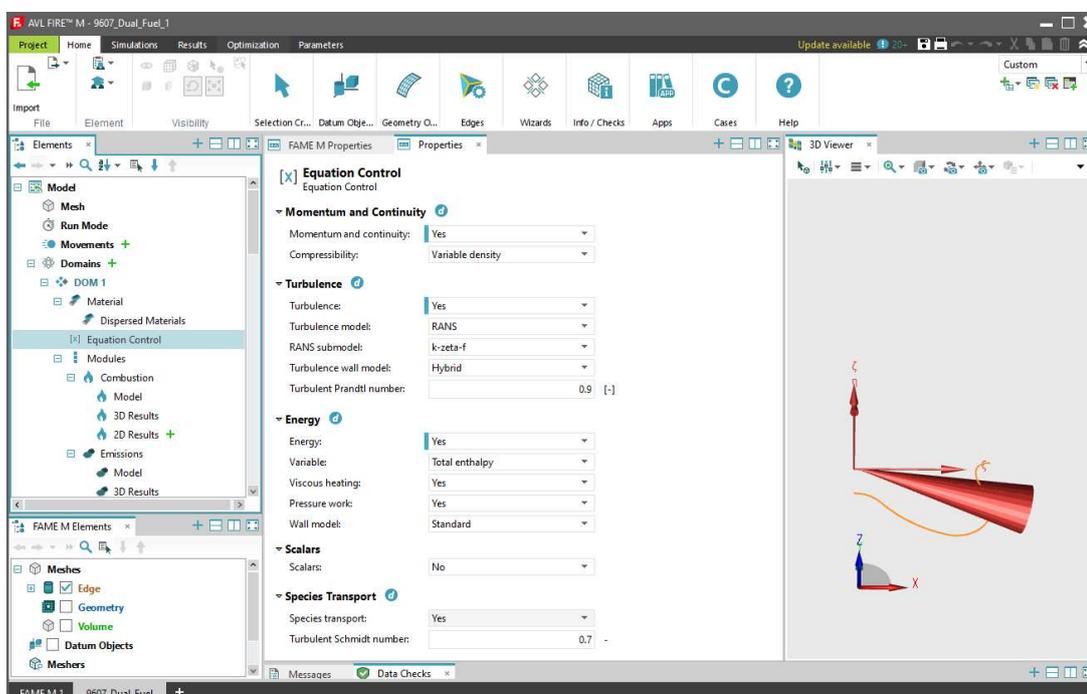
Fonte: o autor

Figura 46 – Materiais dispersos



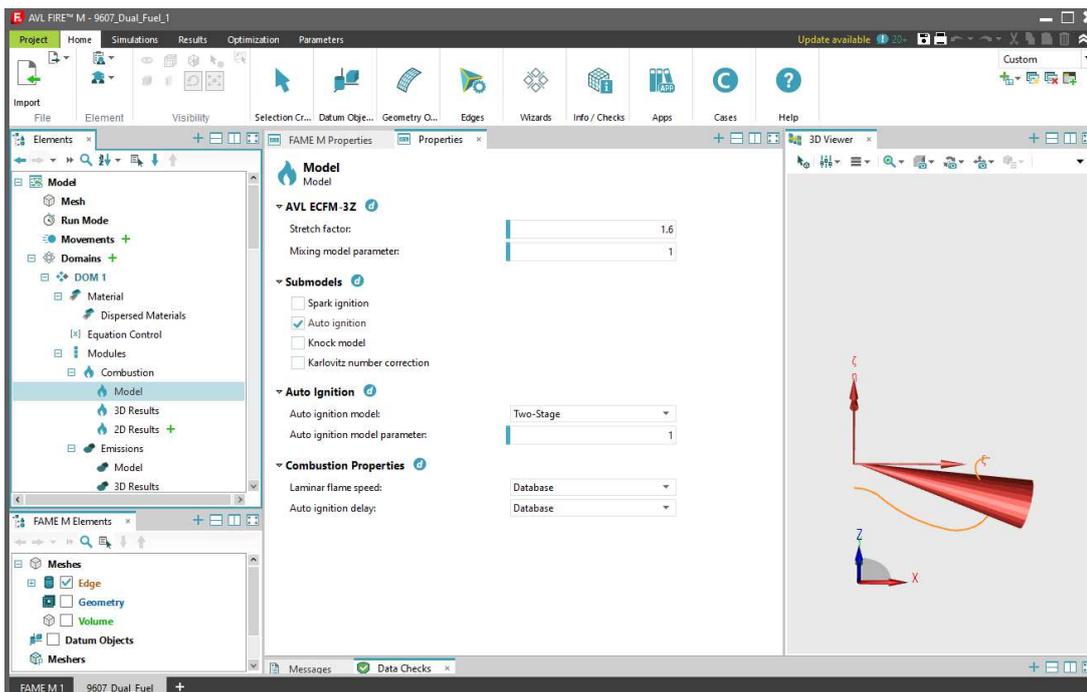
Fonte: o autor

Figura 47 – Equações de controle



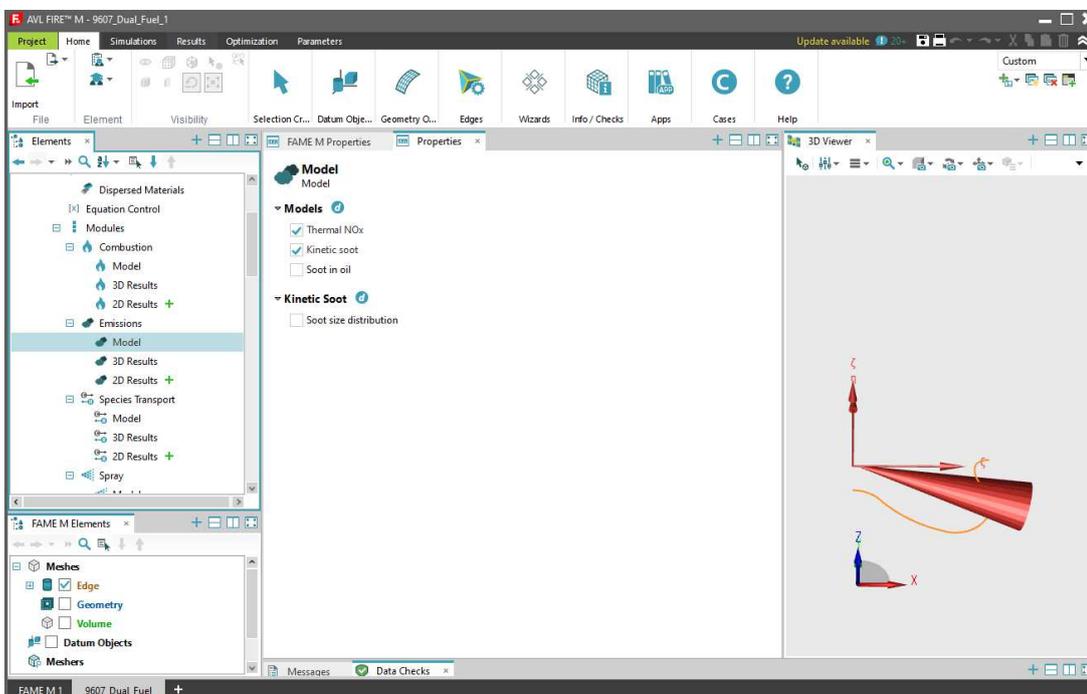
Fonte: o autor

Figura 48 – Modelo de combustão



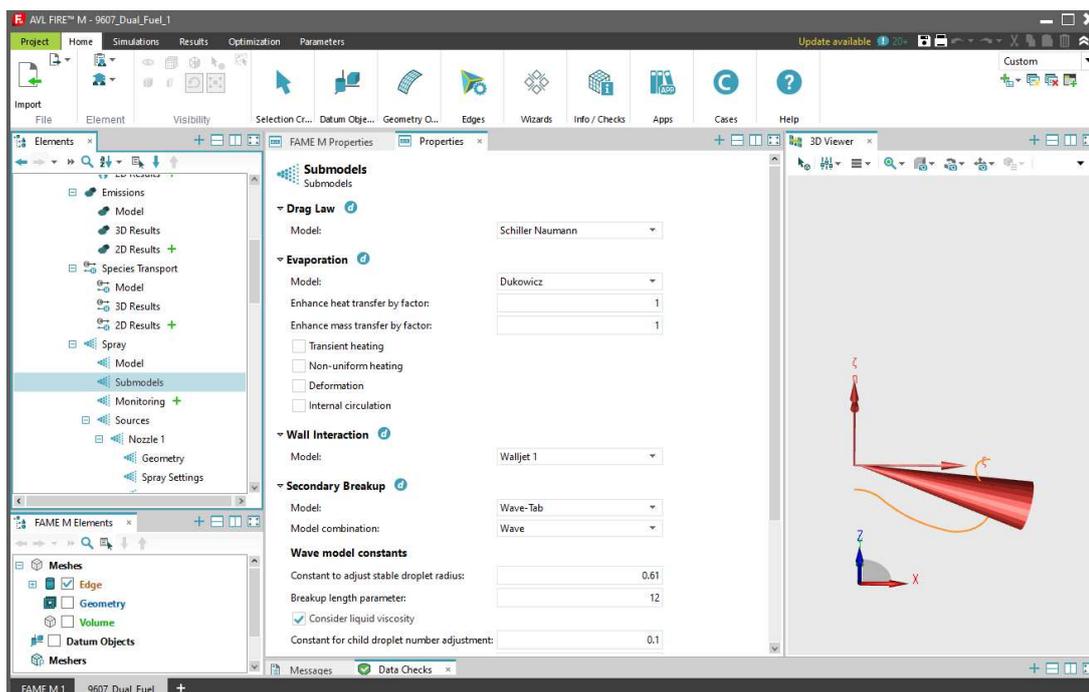
Fonte: o autor

Figura 49 – Modelo de emissões



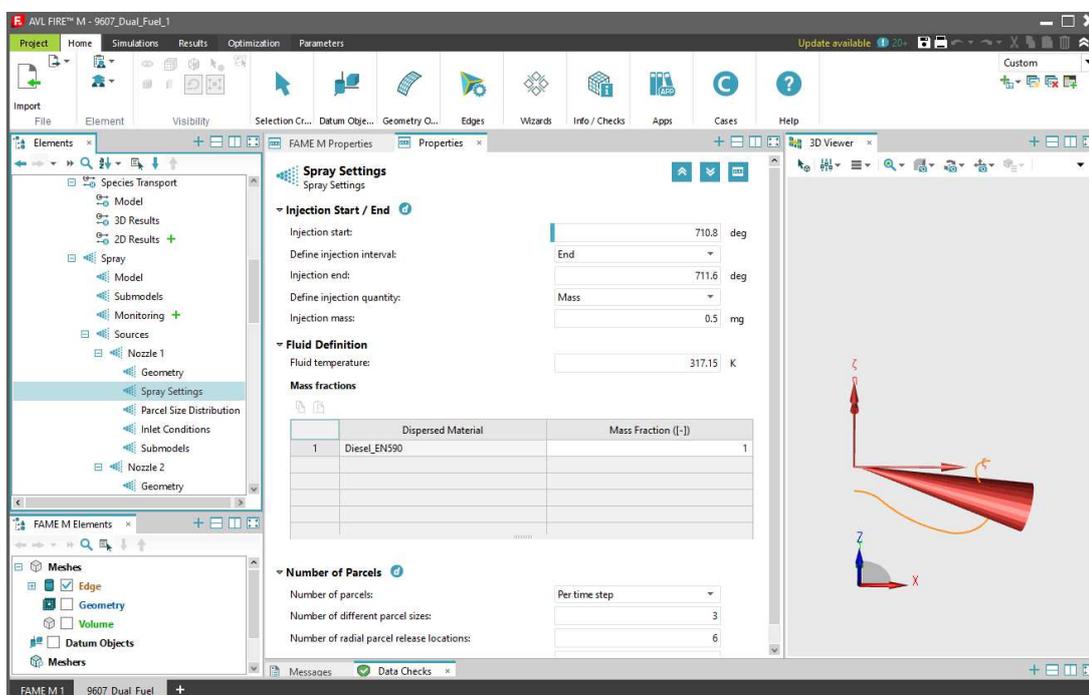
Fonte: o autor

Figura 50 – Modelo de spray



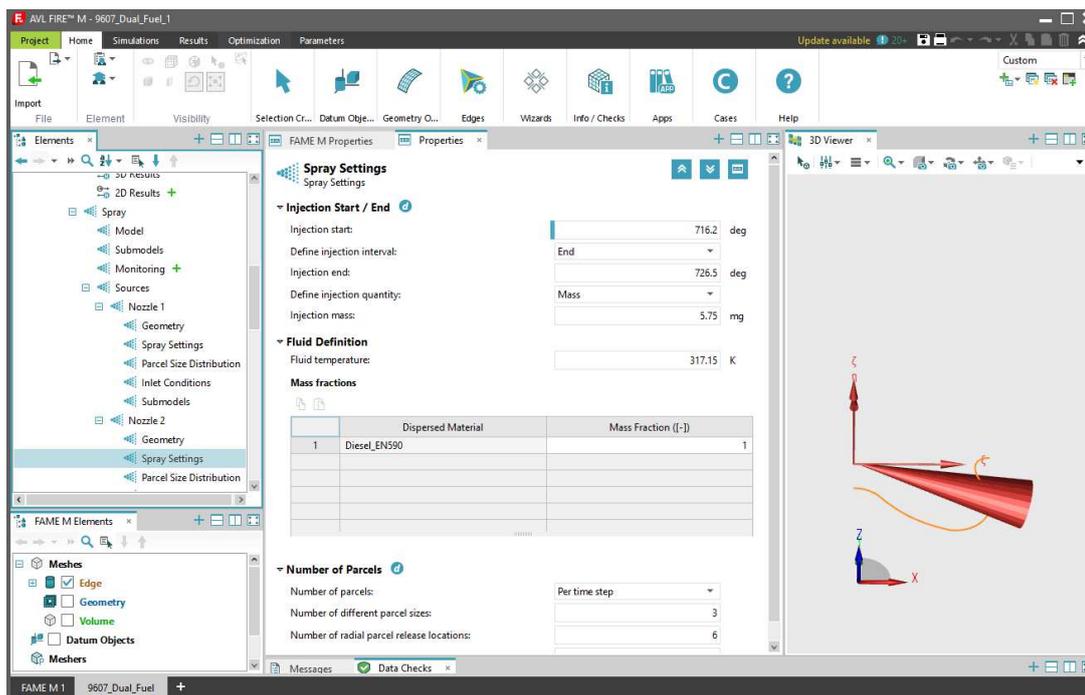
Fonte: o autor

Figura 51 – Ângulos e massa de diesel injetor 01



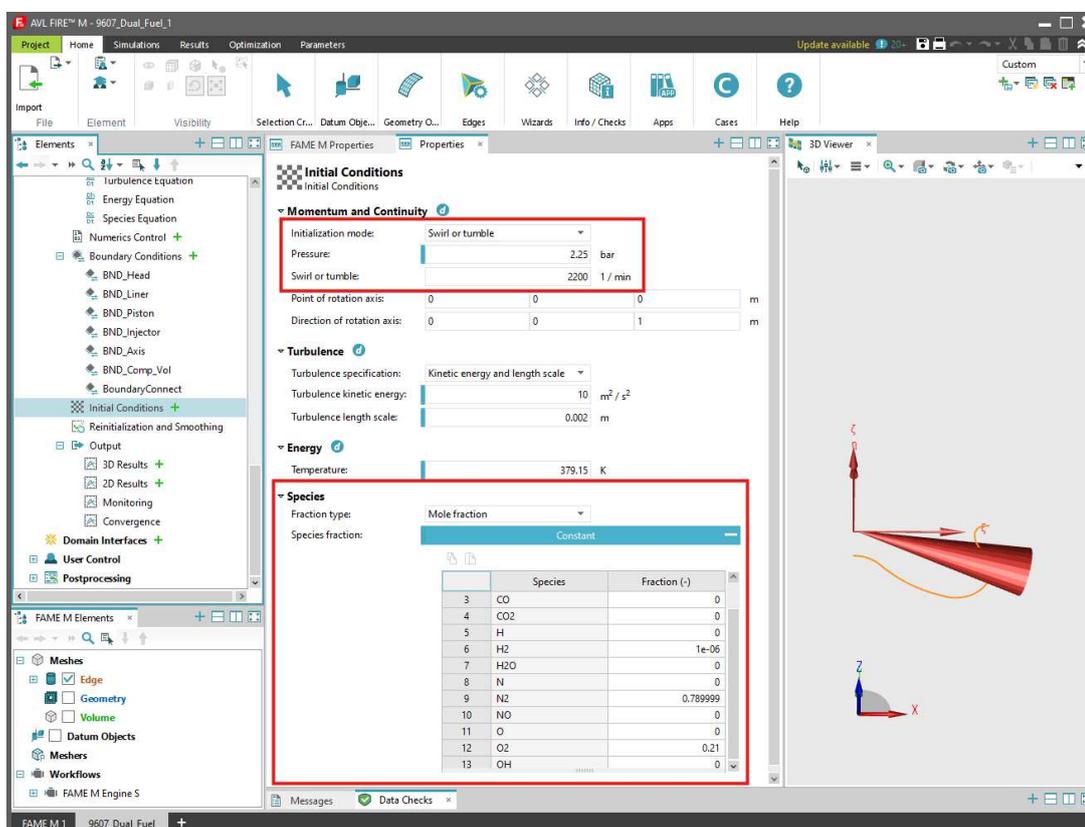
Fonte: o autor

Figura 52 – Ângulos e massa de diesel injetor 02



Fonte: o autor

Figura 53 – Varáveis pressão, swirl e composição do ar de entrada



Fonte: o autor