



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



KAMILA DE FATIMA COSTA DA SILVA

**AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO
DUAL ETANOL-HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO**

Ouro Preto, 2025

KAMILA DE FATIMA COSTA DA SILVA

kamila.costa@aluno.ufop.ed.br

**AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO
DUAL ETANOL-HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Elisangela Martins Leal, DSc.

Coorientador: Claudio Vieira Peixoto, Eng.

Coorientador: Gabriel Carvalho Matoso, MSc.

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2025**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Kamila de Fatima Costa da.

Avaliação computacional de um sistema de injeção dual etanol-hidrogênio em motores de combustão interna de ignição por compressão. [manuscrito] / Kamila de Fatima Costa da Silva. - 2025. 75 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Elisangela Leal.

Coorientadores: Claudio Peixoto, Prof. Me. Gabriel Matoso.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Motores de combustão interna. 2. Automóveis - Motores - Sistemas de injeção eletrônica de combustível - Injeção dual. 3. Hidrogênio. 4. Simulação (Computadores). I. Leal, Elisangela. II. Matoso, Gabriel. III. Peixoto, Claudio. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Kamila de Fatima Costa da Silva

Avaliação computacional de um sistema de injeção dual etanol-hidrogênio em motores de combustão interna de ignição por compressão

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Mecânica

Aprovada em 02 de abril de 2025

Membros da banca

Profª Drª Elisângela Martins Leal - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. M.Sc. Gabriel Carvalho Matoso - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. Claudio Vieira Peixoto - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Claudio Marcio Santana - Universidade Federal de Ouro Preto

Elisângela Martins Leal, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Elisangela Martins Leal, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/04/2025, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0890473** e o código CRC **C8D18C77**.

*À minha mãe, Maria da Luz, que faz jus ao nome que carrega.
Sua luz sempre iluminou meus caminhos, mesmo nos momentos mais difíceis. Foi sua força, sua
sabedoria e seu amor incansável que me guiaram até aqui.
Cada conquista minha é, na verdade, um reflexo do que aprendi com você. Este trabalho é para
você, que nunca deixou de acreditar em mim.*

AGRADECIMENTOS

O caminho até a conclusão deste trabalho foi repleto de desafios, aprendizados e conquistas, e nada disso teria sido possível sem o apoio de pessoas especiais, às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Agradeço à minha família, que, mesmo distantes, sempre estiveram presentes em minha vida, me apoiando com carinho e constância. Aos meus irmãos, grandes companheiros e apoiadores em toda a minha trajetória, suas palavras de incentivo e força foram essenciais para que eu conseguisse trilhar minha caminhada.

Um agradecimento especial à minha mãe, cuja presença sempre foi luz no meu caminho. Mais do que me apoiar, ela me ensinou a acreditar nos meus sonhos e a persegui-los com coragem. Seu amor, sua força e sua confiança em mim fizeram com que eu nunca duvidasse do meu próprio potencial.

Às minhas amigas de infância, Beatriz e Keyla, que, apesar da distância, sempre estiveram ao meu lado. Seu companheirismo e amizade foram refúgio em momentos de solidão e fonte de alegria nos dias difíceis.

Sou grata também às amigas que construí ao longo dessa trajetória, que tornaram esse percurso mais leve. Em especial, à Isabella e à Karine, amigas inseparáveis que me fizeram sentir que Minas Gerais também poderia ser meu lar. Juntas, enfrentamos os desafios da graduação e da adaptação a um novo lugar, e não sei se teria concluído essa jornada sem vocês.

Aos professores que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e pessoal, minha sincera gratidão. Em especial, aos meus coorientadores Claudio e Gabriel e especialmente à Professora Elisângela, por sua orientação cuidadosa e por tantos conselhos valiosos que me guiaram não apenas na vida acadêmica, mas também na vida.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada, meu eterno reconhecimento e apreço.

"A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez." - (George B. Shaw)

RESUMO

Este trabalho investiga a influência da injeção dual de hidrogênio e etanol no desempenho de um motor de ignição por compressão. Desta forma, é adotada uma abordagem baseada em simulação computacional, utilizando três softwares distintos: Autodesk Inventor, Diesel RK e Ansys Fluent, permitindo uma análise detalhada da dinâmica dos fluidos na injeção e seus efeitos no motor. São analisadas diferentes proporções de hidrogênio no combustível, observando-se que a mistura com 30% de hidrogênio apresenta maior eficiência térmica. Os resultados indicam que a adição de hidrogênio ao etanol contribui para a melhora no desempenho do motor, com a melhora de 2% no torque, 2% na potência e 6% no consumo específico de combustível. A dinâmica da injeção foi avaliada via a dinâmica computacional de fluidos, utilizando o modelo de fase discreta Euleriano. Os resultados reforçam o potencial do hidrogênio para melhorar a eficiência do motor, bem como a redução de emissões de carbono devido ao menor consumo de combustível.

Palavras-chaves: Motores de combustão interna, injetor dual, hidrogênio, simulação computacional.

ABSTRACT

This study investigates the influence of dual hydrogen and ethanol injection on the performance of a compression ignition engine. A simulation-based approach is adopted, utilizing three different software tools: Autodesk Inventor, Diesel RK, and Ansys Fluent, enabling a detailed analysis of fluid dynamics in the injection process and its effects on the engine. Different hydrogen proportions in the fuel are analyzed, showing that the mixture with 30% hydrogen achieves the highest thermal efficiency. The results indicate that adding hydrogen to ethanol improves engine performance, with a 2% increase in torque, a 2% increase in power, and a 6% improvement in specific fuel consumption. The injection dynamics were evaluated through computational fluid dynamics using the Eulerian discrete phase model. These findings reinforce the potential of hydrogen to enhance engine efficiency and reduce carbon emissions due to lower fuel consumption.

Keywords: Internal combustion engines, dual injector, hydrogen, computational simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema fluxo de massa e energia Fonte: Brunetti (2012)	5
Figura 2 – Componentes de um motor MCI alternativo Fonte: Brunetti (2012)	6
Figura 3 – Nomenclaturas de acordo com a posição do pistão Fonte: Brunetti (2012)	8
Figura 4 – Injeção indireta (esquerda) e injeção direta (direita) Fonte: AutoEsporte (2019)	15
Figura 5 – Esquema da configuração de um jato injetor concêntrico de dupla injeção no plano transversal axial. O ângulo de injeção é definido como o ângulo entre o eixo do jato e o eixo horizontal neste plano - hidrogênio e diesel. Fonte: Adaptado de Trusca (2001).	15
Figura 6 – Dois injetores coaxiais, configurações de combustível duplo com orientação dos injetores Fonte: Adaptado de Yip et al. (2019).	17
Figura 7 – Tipos de pesquisa Fonte: Kumar (2018)	22
Figura 8 – Fluxograma das etapas do estudo. Fonte: Pesquisa direta (202).	25
Figura 9 – Montagem final do injetor. Fonte: Pesquisa direta (2025).	26
Figura 10 – Agulhas de injeção. Fonte: Pesquisa direta (2025).	27
Figura 11 – Agulha de injeção de H_2 com a primeira malha.	28
Figura 12 – Agulha de injeção de H_2 com a malha refinada. Fonte: Pesquisa direta (2025).	28
Figura 13 – Agulha de injeção de C_2H_5OH com a primeira malha.	29
Figura 14 – Agulha de injeção de C_2H_5OH com a malha refinada.	29
Figura 15 – Métrica de qualidade de malha <i>Skewness</i> para a agulha de Hidrogênio - Malha 1. Fonte: Pesquisa direta (2025).	30
Figura 16 – Métrica de qualidade de malha <i>Skewness</i> para a agulha de Hidrogênio - Malha 2. Fonte: Pesquisa direta (2025).	30
Figura 17 – Métrica de qualidade de malha <i>Skewness</i> para a agulha de Etanol - Malha 1. Fonte: Pesquisa direta (2025).	30
Figura 18 – Métrica de qualidade de malha <i>Skewness</i> para a agulha de Etanol - Malha 2. Fonte: Pesquisa direta (2025).	31
Figura 19 – Métrica de qualidade de malha <i>Orthogonal Quality</i> para a agulha de hidrogênio - Malha 1. Fonte: Pesquisa direta (2025).	32
Figura 20 – Métrica de qualidade de malha <i>Orthogonal Quality</i> para a agulha de hidrogênio - Malha 2. Fonte: Pesquisa direta (2025).	32
Figura 21 – Métrica de qualidade de malha <i>Orthogonal Quality</i> para a agulha de etanol - Malha 1. Fonte: Pesquisa direta (2025).	32
Figura 22 – Métrica de qualidade de malha <i>Orthogonal Quality</i> para a agulha de etanol - Malha 2. Fonte: Pesquisa direta (2025).	33
Figura 23 – Gráfico comparativo dos dados do fabricante com a curva de validação obtida no Diesel RK [®] . Fonte: Pesquisa direta (2025).	35

Figura 24 – Resultados da variação da relação de compressão no torque do motor usando etanol como combustível. Fonte:Pesquisa direta (2025).	40
Figura 25 – Resultados da variação da relação de compressão na potência do motor usando etanol como combustível. Fonte:Pesquisa direta (2025).	41
Figura 26 – Resultados da variação da relação de compressão no consumo específico de combustível do motor usando etanol como combustível. Fonte:Pesquisa direta (2025).	41
Figura 27 – Resultado da adição de hidrogênio no torque. Fonte: Pesquisa direta (2025).	42
Figura 28 – Resultado da adição de hidrogênio na potência. Fonte: Pesquisa direta (2025).	43
Figura 29 – Resultados da adição de hidrogênio no consumo específico de combustível. Fonte: Pesquisa direta (2025).	43
Figura 30 – Distribuição de temperatura ao longo das agulhas de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita). Fonte: Pesquisa direta (2025).	45
Figura 31 – Distribuição de pressão ao longo da agulha de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita). Fonte: Pesquisa direta (2025).	46
Figura 32 – Vetores de velocidade do fluido ao longo da agulha de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita). Fonte: Pesquisa direta (2025).	47
Figura 33 – Vetores de turbulência do fluxo ao longo da agulha de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita). Fonte: Pesquisa direta (2025).	48
Figura 34 – Análise física da convergência da temperatura na saída da agulha de injeção de hidrogênio - Primeira malha. Fonte: Pesquisa direta (2025).	58
Figura 35 – Análise física da convergência da temperatura na saída da agulha de injeção de etanol - Primeira malha. Fonte: Pesquisa direta (2025).	58
Figura 36 – Análise física da convergência da temperatura na saída da agulha de injeção de H_2 - Segunda malha. Fonte: Pesquisa direta (2025).	59
Figura 37 – Análise física da convergência da temperatura na saída da agulha de injeção de etanol- Segunda malha. Fonte: Pesquisa direta (2025).	59
Figura 38 – Convergência dos resíduos para a simulação do hidrogênio. - Primeira malha Fonte: Pesquisa direta (2025).	60
Figura 39 – Convergência dos resíduos para a simulação do etanol. - Primeira malha. Fonte: Pesquisa direta (2025).	60
Figura 40 – Convergência dos resíduos na saída de hidrogênio. - Segunda malha. Fonte: Pesquisa direta (2025).	61
Figura 41 – Convergência dos resíduos na saída do etanol. Fonte: Pesquisa direta (2025). - Segunda malha.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MCI	Motor de Combustão interna
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
HCCI	<i>Homogeneous Charge Compression-Ignition</i>
GNV	Gás Natural Veicular
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
DES	<i>Detached Eddy Simulation</i>
PMS	Ponto morto superior
PMI	Ponto morto inferior
DFC	Dinâmica de fluidos computacional

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica do fluido
t	Tempo
\mathbf{v}	Vetor velocidade do fluido
∇	Nabla
P	Pressão estática
τ	Tensor das tensões viscosas
\mathbf{g}	Aceleração da gravidade
\mathbf{F}	Força externa aplicada ao fluido
E	Energia total
k	Condutividade térmica
T	Temperatura
Φ	Dissipação viscosa
P	Potência mecânica
\mathbf{T}	Torque
ω	Velocidade angular
π	Constante matemática

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	<i>Geral</i>	3
1.3.2	<i>Específicos</i>	3
1.4	Estrutura do trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Motores de combustão interna	5
2.2	Tipos de Ignição	9
2.3	Combustíveis	10
2.4	Injeção de combustíveis	13
2.5	Ferramentas de simulação	18
2.5.1	<i>Software Ansys Fluent[®]</i>	18
2.5.2	<i>Equações Governantes</i>	19
2.5.3	<i>Modelo de Turbulência k-omega SST</i>	20
2.5.4	<i>Software Diesel RK[®]</i>	20
2.5.5	<i>Software Autodesk Inventor</i>	21
3	METODOLOGIA	22
3.1	Tipo de pesquisa	22
3.2	Materiais e Métodos	24
3.3	Condições de Contorno	35
3.3.1	<i>Considerações sobre o uso do Diesel RK[®]</i>	36
3.4	Variáveis e Indicadores	37
3.5	Tabulação de Dados	39
3.6	Considerações Finais do Capítulo	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Desempenho do motor com o Etanol	40
4.2	Adição de hidrogênio	42
4.3	Pós processamento das malhas	44
5	CONCLUSÃO	50

REFERÊNCIAS	52
APÊNDICE A – MÉTRICAS DE ANÁLISE DE QUALIDADE DE MALHA	56
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE CONVERGÊNCIA DOS CÁLCULOS	58
APÊNDICE C – GRÁFICOS DE RESÍDUOS	60

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo mostrar a formulação do problema, os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do problema

Os motores são dispositivos fundamentais para a conversão de diversas formas de energia em energia mecânica, permitindo a realização de movimento ou trabalho. Conforme descrito pelo Novo dicionário da língua portuguesa (2010, p.319), um motor é "tudo que dá movimento a um maquinário. Que faz mover". Dependendo do tipo de motor, essa transformação de energia pode ocorrer de diferentes formas, dentre os quais tem-se o motor de combustão interna (MCI).

Segundo Otto (1876), um motor de combustão interna é caracterizado por operar em um ciclo de quatro tempos, no qual uma mistura de combustível e ar é comprimida dentro de um cilindro e inflamada por uma faísca para produzir trabalho mecânico. Ao passo que, de acordo com Diesel (1893), um motor de combustão interna funciona pelo princípio de ignição por compressão, onde o combustível é injetado em ar altamente comprimido, resultando em combustão espontânea e geração de trabalho mecânico.

O princípio de ignição por compressão, que é compreendida na categoria de motores de pistão, ocorre também em motores de êmbolos rotativos. Em seu livro "*Internal Combustion Engine Fundamentals*", Heywood (1988) fornece uma análise abrangente dos processos de ignição em motores de combustão interna, abordando tanto a ignição por faísca (como no ciclo Otto) quanto a ignição por compressão (como no motor Diesel). Heywood discute os fatores que influenciam a eficiência da ignição e os mecanismos de controle de combustão e emissões.

O avanço das tecnologias aplicadas aos motores de combustão interna (MCI) proporcionou diversos resultados significativos, como o aumento da potência específica, maior durabilidade do motor, redução do consumo específico de combustível, utilização de novos materiais, diminuição das emissões de poluentes, melhoria na dirigibilidade e aumento da eficiência na conversão de combustível.

No mesmo contexto, os avanços tecnológicos permitiram que os motores de combustão interna operassem com mais de um tipo de combustível, proporcionando aos usuários uma flexibilidade na escolha do combustível conforme suas necessidades específicas. Isso inclui opções que variam de menor custo, maior autonomia e melhor desempenho até combustíveis menos agressivos ao meio ambiente. Como destacado por Heywood (1988), a flexibilidade no uso de combustíveis alternativos não só aumenta a eficiência e a vida útil dos motores, mas também contribui significativamente para a redução das emissões de poluentes e para a sustentabilidade ambiental.

Assim, com o advento da flexibilização do uso de combustíveis, houve também a possibilidade da combinação de combustíveis para o melhor desempenho, maior economia e diminuição na emissão de gases nocivos a atmosfera. Da mesma forma que foi proposto por Schamel et al. (2013), que exploraram extensivamente o uso de injeção *dual* de gasolina e etanol, destacando como a sincronização da injeção e as propriedades dos combustíveis podem melhorar significativamente a eficiência e reduzir as emissões dos motores.

Com a necessidade de validar a tese sobre o melhor desempenho energético com a adição de combustíveis ou mudança nos equipamentos de MCI, surge também uma necessidade de que sejam realizadas análises de forma mais rápida, econômica e aproximada da realidade. Por conseguinte, tem-se as simulações computacionais como ferramentas principais, pois, de acordo com Smith (2020), cada vez mais os programas de simulação tornam-se essenciais para projetos de engenharia, pois permitem ao engenheiro prever e aperfeiçoar sistemas complexos de forma antecipada à construção de protótipos, gerando uma economia de recursos.

À vista disso, há uma gama de programas de simulação computacional disponíveis no mercado, dentre eles o Ansys Fluent[®] o qual segundo Smith (2020) têm revolucionado a engenharia ao permitir análises detalhadas e precisas de sistemas complexos, proporcionando entendimentos valiosos para o desenvolvimento de produtos inovadores. Nele é possível modelar e simular o comportamento de sistemas complexos antes da construção física, ajudando a otimizar projetos, reduzir custos e acelerar o desenvolvimento de produtos. A partir do que foi exposto, fica o questionamento:

Como avaliar computacionalmente um sistema de injeção *dual* etanol-hidrogênio, disponível para um motor de combustão interna de ignição por compressão?

1.2 Justificativa

Nos últimos anos, a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e diminuir a dependência dos combustíveis fósseis tem impulsionado significativos avanços na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para motores de combustão interna, além da necessidade ascendente de melhoria na eficiência energética. Nesse contexto, os sistemas de injeção *dual*, que combinam combustíveis renováveis como o etanol e o hidrogênio, emergem como uma oportunidade auspiciosa. A combinação desses combustíveis não apenas pode aumentar a eficiência energética dos motores de ignição por compressão, mas também oferece a vantagem de reduzir as emissões de poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio e partículas finas.

No mesmo sentido que Schamel et al. (2013), sendo um dos pioneiros no desenvolvimento e estudo detalhado desta tecnologia, tem-se destacado a importância da substituição de recursos fósseis, tal qual a gasolina, por recursos renováveis. De acordo com isso, a utilização do hidrogênio como vetor energético, produzido a partir de biomassas, biocombustíveis como o etanol, ou utilizando energia elétrica proveniente de fontes renováveis (hidráulica, eólica e

solar fotovoltaica), está sendo considerada uma das abordagens mais eficientes e ambientalmente vantajosas. Essa avaliação é especialmente relevante quando associada ao uso de células a combustível para a conversão do hidrogênio em eletricidade, transformando eletricidade em uma forma de energia transportável e armazenável. A aplicação energética do hidrogênio abrange diversos sistemas, em particular, a tecnologia de células a combustível para veículos apresenta vantagens significativas devido às maiores eficiências dos sistemas combinados de célula a combustível e motor elétrico, além de emissões locais praticamente inexistentes (CGEE, 2010).

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar computacionalmente um sistema de injeção *dual* etanol-hidrogênio, para uso em motores de combustão interna de ignição por compressão.

1.3.2 Específicos

- Realizar a revisão bibliográfica sobre motores de combustão interna, etanol e hidrogênio, a tecnologia de injeção *dual*, a ferramenta de simulação computacional, os impactos ambientais e a eficiência energética com o uso do hidrogênio e etanol combinados;
- Discorrer sobre a metodologia adotada, com todas as variáveis relevantes;
- Avaliar os resultados da tecnologia de injeção *dual* etanol-hidrogênio, por meio de *softwares* adequados;
- Concluir e recomendar trabalhos futuros.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema abordado, detalhando a formulação do problema, a pergunta de pesquisa, a justificativa do estudo, bem como os objetivos geral e específicos.

No segundo capítulo, o intuito é fornecer a fundamentação teórica necessária para o aprofundamento do tema, através de uma revisão bibliográfica.

No terceiro capítulo, a metodologia empregada na pesquisa é descrita detalhadamente, mostrando como os resultados são obtidos por meio de simulações de um MCI utilizando o *software* Ansys Fluent®.

O quarto capítulo apresenta os resultados da pesquisa, acompanhados de uma discussão, justificando a relevância dos resultados para o estudo em questão.

Finalmente, o quinto capítulo oferece as conclusões do trabalho, destacando os pontos mais significativos que influenciam a injeção *dual* de combustível e o desempenho do MCI, utilizando etanol e hidrogênio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, são exploradas as principais teorias, estudos e avanços recentes relacionados ao tema central deste trabalho. São abordados conceitos fundamentais, de forma a oferecer uma base sólida para o desenvolvimento das análises e discussões subsequentes.

2.1 Motores de combustão interna

Consoante com Heywood (1988), os motores de combustão interna (MCI) datam de 1876, quando Otto desenvolveu o motor de ignição por centelha, e de 1892, quando Diesel inventou o motor de ignição por compressão. Desde então, esses motores evoluíram à medida que o entendimento dos processos do motor aumentou, novas tecnologias surgiram, a demanda por novos tipos de motor apareceram e as restrições ambientais ao uso dos motores mudaram.

Constatado por Brunetti (2012), o propósito dos motores de combustão interna é a produção de potência mecânica a partir da energia química contida no combustível. Entretanto, uma máquina térmica pode ter outras formas que permitem transformar calor em trabalho. O calor pode ser obtido de diferentes fontes: combustão, energia elétrica, energia atômica, etc. Em MCI, diferentemente de motores de combustão externa, essa energia é liberada pela queima ou oxidação do combustível dentro do motor, assim como é evidenciado no esquema da Figura 1. O trabalho ocasionado por essa série de reações se dá por meio de uma substância que será denominada por Brunetti (2012) de “fluido ativo – FA”.

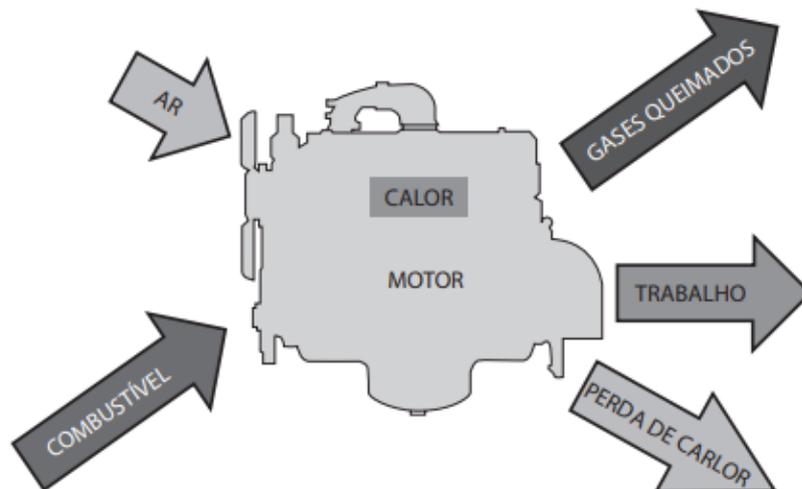
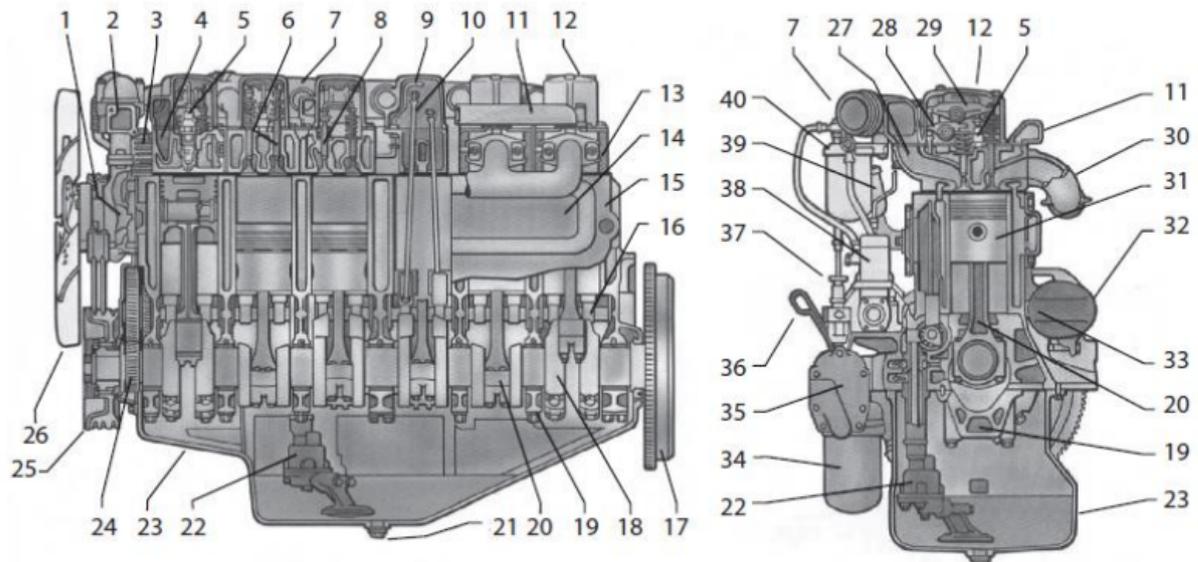


Figura 1 – Esquema fluxo de massa e energia
Fonte: Brunetti (2012)

Conforme o esquema da Figura 1, o combustível adentra o motor associado ao comburente, nesse caso o ar, e tem como saída o trabalho desejado junto com os gases residuais, e por não se tratar de um processo ideal, há também a perda de energia em forma de calor.

Estas máquinas possuem diferentes classificações. Uma forma de classificação de motores de combustão interna considera o movimento realizado pelo pistão. Neste contexto, os motores alternativos operam pelo movimento de vai e vem do pistão, enquanto os motores geram o trabalho por meio de um movimento de rotação. Há ainda os motores de reação, neste caso a propulsão provém da força gerada pelos gases expelidos em alta velocidade pelo motor. Em motores de combustão interna alternativos, há a presença de elementos principais para seu desempenho, como é apresentado na Figura 2.



1. Bomba-d'água	11. Duto de água	21. Bujão do cárter	31. Pistão
2. Válvula termostática	12. Tampa de válvula	22. Bomba de óleo	32. Motor de partida
3. Compressor de ar	13. Cabeçote	23. Cárter	33. Dreno de água
4. Duto de admissão	14. Tampa lateral	24. Engrenagem do virabrequim	34. Filtro de óleo
5. Injetor de combustível	15. Bloco	25. Amortecedor vibracional	35. Radiador de óleo
6. Válvula de escape	16. Eixo comando de válvulas	26. Ventilador	36. Vareta de nível de óleo
7. Coletor de admissão	17. Volante	27. Duto de admissão	37. Bomba manual de combustível
8. Válvula de admissão	18. Virabrequim	28. Balancim da válvula de admissão	38. Bomba injetora de combustível
9. Linha de combustível	19. Capa de mancal	29. Balancim da válvula de escape	39. Respiro do cárter
10. Haste de válvula	20. Biela	30. Coletor de escape	40. Filtro de combustível

Figura 2 – Componentes de um motor MCI alternativo
Fonte: Brunetti (2012)

Da Figura 2, o item 31 é um dos componentes móveis do MCI, responsável por transmitir a força da combustão para o virabrequim por meio da biela. Ele se move dentro do cilindro, que é o espaço onde ocorre a combustão da mistura ar-combustível. O movimento do pistão é alternado, deslocando-se entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI). O PMS é a posição mais alta que o pistão atinge dentro do cilindro, enquanto o PMI é a posição mais baixa. Esse movimento é o que impulsiona o ciclo de combustão, composto pelas etapas de admissão, compressão, combustão e exaustão, conforme discutido por Kumar (2018).

Segundo Brunetti (2012), o movimento alternado do pistão e a conversão para movimento rotativo pelo virabrequim são fundamentais para o ciclo termodinâmico do motor, influenciando diretamente sua eficiência e desempenho. A constituição do virabrequim deve garantir que ele possa suportar as altas forças geradas durante a combustão e minimizar as vibrações, como

observado por Thompson (2020), que explora técnicas de balanceamento e materiais avançados usados na fabricação de virabrequins.

Os cilindros, que abrigam os pistões, podem variar em número e disposição dentro do motor. De acordo com Ricardo (1923), a configuração dos cilindros em linha é muito utilizada devido à simplicidade e facilidade de manutenção, enquanto motores em V são mais adequados para aplicações de alto desempenho por oferecerem maior equilíbrio estrutural. No caso de motores em linha, eles são conhecidos por sua simplicidade e facilidade de manutenção, enquanto motores em V proporcionam uma estrutura mais compacta e equilibrada como observado por Smith (2017).

A relação de compressão, que é a razão entre o volume total quando o pistão está no PMI e o volume morto (ou volume da câmara de combustão) quando o pistão está no PMS, é outro parâmetro primordial. Uma relação de compressão elevada contribui para maior eficiência térmica, embora aumente o risco de detonação devido à maior pressão na câmara de combustão. O aumento da relação de compressão é mais viável em motores de ignição por compressão devido à natureza do ciclo de combustão (FERGUSON, 2001).

A potência e o torque do motor são diretamente influenciados pela capacidade volumétrica, que é determinada pelo volume deslocado total, ou cilindrada. Stone (2012) discute que motores com maior cilindrada geram mais torque em baixas rotações, sendo ideais para veículos utilitários, enquanto motores compactos com turbo alimentação são preferidos em aplicações de alta potência específica.

Pulkrabek (1997) enfatiza que motores mais eficientes convertem maior proporção da energia contida no combustível em trabalho útil, tornando crucial o controle preciso da relação ar-combustível para otimizar o consumo sem comprometer o desempenho.

O consumo de combustível também é um parâmetro chave, influenciado pela eficiência volumétrica e pela relação ar-combustível. Pulkrabek (1997) destaca a importância do controle preciso da injeção de combustível e do gerenciamento térmico para otimizar o consumo sem comprometer o desempenho; assim, motores mais eficientes conseguem converter uma maior proporção da energia contida no combustível em trabalho útil.

O curso do pistão (S) refere-se à distância que o pistão percorre entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI). O curso do pistão é uma característica definida durante o projeto do motor e tem um impacto significativo na potência e no torque gerados, pois influencia diretamente o volume da mistura ar-combustível que pode ser comprimido e queimado dentro do cilindro (PULKRABEK, 1997).

De acordo com as posições do pistão assumidas no cilindro, é possível inferir uma série de informações e nomenclaturas, como é observável na Figura 3.

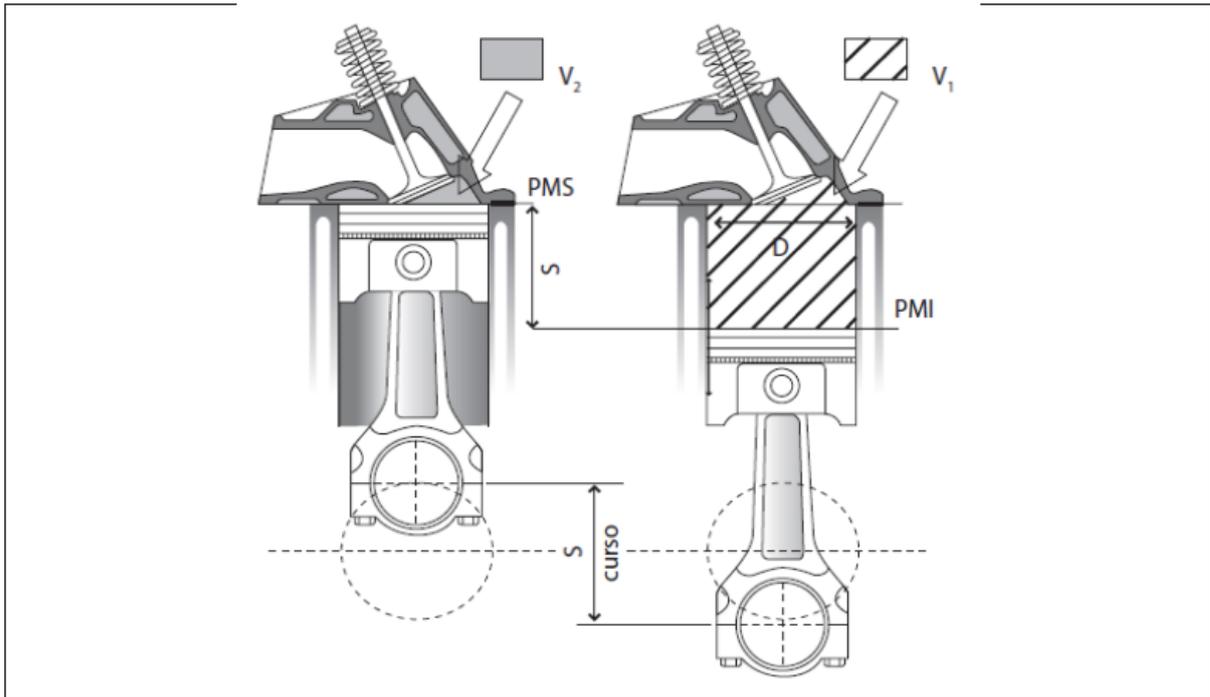


Figura 3 – Nomenclaturas de acordo com a posição do pistão
 Fonte: Brunetti (2012)

O volume total (V_1) é o volume compreendido entre a cabeça do pistão e o cabeçote quando o pistão está no PMI. Este volume é fundamental para o cálculo da relação de compressão do motor, que afeta tanto a eficiência quanto o desempenho do motor. O volume total pode ser calculado pela equação 2.1.

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S + V_2 \quad (2.1)$$

Em que D é diâmetro e S indica o curso do pistão.

O volume morto (V_2), também conhecido como volume da câmara de combustão, é o volume entre a cabeça do pistão e o cabeçote quando o pistão está no PMS. Este volume é crítico para a compressão da mistura ar-combustível antes da ignição. Como observado por Ferguson (2001), um volume morto menor resulta em uma relação de compressão maior, o que pode aumentar a eficiência térmica do motor. O volume morto pode ser calculado pela seguinte equação 2.2.

$$V_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \quad (2.2)$$

Nesse caso, h indica a altura da abertura das válvulas.

O volume deslocado unitário (V_{du}), ou cilindrada unitária, é o volume deslocado pelo pistão ao se mover do PMS ao PMI. Este parâmetro é um indicativo da capacidade volumétrica de um cilindro individual e é dado pela equação 2.3.

$$V_d = V_{du} \cdot z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot z \quad (2.3)$$

O número de cilindros (z), por sua vez, é uma característica construtiva do motor e não possui uma fórmula de cálculo, mas é um dado especificado durante o projeto do motor. A quantidade de cilindros influencia diretamente na potência do motor.

O diâmetro dos cilindros (D) é o diâmetro interno do cilindro, que junto com o curso do pistão, determina o volume deslocado. Este valor também é especificado durante o projeto e pode variar dependendo das especificações do motor.

Esses parâmetros geométricos do motor influenciam em diversas variáveis, a potência, por exemplo, que é expressa pela equação

$$P = \mathbf{T} \cdot \omega \quad (2.4)$$

Em que P é a potência mecânica, T é o torque e ω é a velocidade angular.

2.2 Tipos de Ignição

Os motores de combustão interna utilizam diferentes sistemas de ignição, dependendo do tipo de combustível e do ciclo de operação. De acordo com Heywood (1988), a ignição por centelha é empregada em motores a gasolina ou motores de ignição por faísca (MIF), nos quais uma vela de ignição gera uma faísca para inflamar a mistura ar-combustível comprimida. Este sistema destaca-se por sua simplicidade e confiabilidade. Pulkrabek (1997) ressalta que a sincronização precisa da ignição é essencial para otimizar a eficiência térmica do motor, evitando problemas como a detonação, que pode causar danos ao motor e reduzir o desempenho geral. Além disso, conforme indicado por Ferguson (2001), a calibragem correta da ignição pode melhorar o consumo de combustível e reduzir as emissões, aspectos fundamentais na engenharia automotiva atual.

Em contraste, a ignição por compressão, utilizada em motores de ignição espontânea (MIE), ocorre quando o combustível é injetado em ar altamente comprimido, que já se encontra a uma temperatura suficiente para causar a autoignição. Esse tipo de ignição, que não requer faísca, é mais eficiente em termos de consumo de combustível devido à maior relação de compressão permitida (HEYWOOD, 1988). Ferguson (2001) observa que, embora os motores de ignição por compressão sejam mais eficientes, eles também produzem maiores emissões de NOx e particulados, o que representa um desafio para o cumprimento das normas ambientais.

Além dos sistemas tradicionais, existem tecnologias híbridas que combinam aspectos de ambos os tipos de ignição, como o *Homogeneous Charge Compression-Ignition* (HCCI). Esse sistema busca combinar a eficiência dos motores de ignição por compressão com a menor emissão de poluentes característica dos motores de ignição por centelha (TURNS, 2012). Como

descrito por Stone (2012), a ignição HCCI é uma área promissora de pesquisa, mas enfrenta desafios em termos de controle preciso da combustão e estabilidade em diferentes condições operacionais.

Outro desenvolvimento recente é a ignição por laser, uma tecnologia que substitui a vela de ignição por um laser de alta potência para iniciar a combustão. Esta tecnologia oferece o potencial de melhorar o controle da ignição e aumentar a eficiência, especialmente em motores de alto desempenho (GLASSMAN; YETTER, 2008). No entanto, como ressalta Pulkrabek (1997), a complexidade e o custo dos sistemas de ignição por laser ainda são uma grande barreira para sua adoção.

2.3 Combustíveis

Um fator importante para a caracterização da eficiência de um motor de combustão interna é o tipo de combustível usado. No livro "*The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice*", Taylor (1985) explica que a escolha do combustível é crítica para a operação efetiva dos motores de combustão interna. O mesmo autor afirma que propriedades como a octanagem e o poder calorífico devem ser adequadas ao projeto do motor para evitar detonação e potencializar o rendimento térmico.

Em concordância com isso, vêm sendo desenvolvidas novas tecnologias e combustíveis alternativos, que apresentem um bom desenvolvimento e que consigam substituir a gasolina, devido à possível escassez futura desse combustível. Neste cenário, emerge o uso do hidrogênio associado ao etanol.

O etanol, como um combustível renovável, possui uma série de propriedades que influenciam diretamente o desempenho, a eficiência e as emissões em motores de combustão interna. Suas características físicas e químicas fazem dele uma opção viável em diversos tipos de motores (BALAT; BALAT, 2008).

Em conformidade com Heywood (1988), o calor latente de vaporização do etanol é maior do que o da gasolina, o que resulta em uma redução da temperatura da mistura ar-combustível durante a vaporização; assim, isso pode aumentar a densidade da mistura admitida no cilindro, melhorando a eficiência volumétrica do motor, mesmo o etanol possuindo uma densidade energética mais baixa. O autor afirma também que, devido à sua maior octanagem, o etanol permite maiores taxas de compressão, o que pode compensar a menor energia por unidade de volume.

A massa específica do etanol é cerca de 20% maior que a da gasolina, o que significa que, na mesma quantidade em volume, o etanol contém mais massa de combustível. Isso afeta a dosagem de combustível e a relação ar-combustível, que deve ser ajustada para otimizar a combustão. Desta forma, o ajuste adequado da relação ar-combustível é importante para evitar misturas ricas ou pobres, que podem afetar tanto a eficiência quanto as emissões (NAJAFI et al.,

2009; TURNS, 2012).

O ponto de fulgor do etanol é mais alto que o da gasolina, o que contribui para uma maior segurança no armazenamento e manuseio, isso reduz o risco de inflamabilidade em situações de exposição ao calor (HEYWOOD, 1988). O autor também destaca que as emissões evaporativas do etanol tendem a ser menores em comparação à gasolina pura, por ele possuir uma menor pressão de vapor em temperaturas ambiente normais, o que reduz a taxa de evaporação. Stone (2012) afirma que essa característica é uma vantagem importante do etanol, reduzindo os riscos de acidentes, ainda mais em climas quentes ou em situações onde o combustível é exposto a fontes de calor.

A temperatura de autoignição do etanol é mais alta do que a da gasolina, tornando-o menos suscetível à pré-ignição em motores de ignição por faísca (HEYWOOD, 1988). Essa propriedade é destacada por (GLASSMAN; YETTER, 2008), que aponta sua contribuição para uma operação mais estável do motor, especialmente sob condições de alta carga.

A pressão de vapor do etanol é mais baixa do que a da gasolina, isso reduz a formação de bolhas no sistema de alimentação, minimizando o risco de interrupção do fluxo de combustível, uma causa comum de vapor *lock* (STONE, 2012). Stone também explica que o vapor *lock* ocorre quando o combustível atinge seu ponto de ebulição nas linhas de combustível, formando bolhas de vapor que impedem o fluxo de combustível líquido para o motor. Ele também enfatiza a importância de controlar a temperatura das linhas de combustível e a utilização de sistemas de pressurização para mitigar o problema. No entanto, em climas frios, a baixa pressão de vapor do etanol pode causar dificuldades na partida a frio do motor. Heywood (1988) aponta que a formulação de misturas de etanol com gasolina (como o E10 ou E85) deve considerar o equilíbrio entre pressão de vapor adequada para partida e operação.

A composição química do etanol, essencialmente a ausência de compostos como enxofre, resulta em emissões mais limpas em comparação com os combustíveis fósseis. Lapuerta, Rodriguez-Fernandez e Agudelo (2008) destacam que o uso de etanol reduz substancialmente a emissão de óxidos de enxofre (SOx) e particulados, contribuindo para uma menor poluição atmosférica.

A condutividade térmica deste biocombustível é maior do que a da gasolina, o que permite uma dissipação de calor mais eficiente durante a combustão. Essa característica ajuda a reduzir os pontos quentes dentro da câmara de combustão, minimizando o risco de detonação e promovendo uma combustão mais uniforme (TURNS, 2012).

Já a corrosividade do etanol é uma preocupação devido à sua tendência de absorver água e formar ácidos, que podem corroer componentes do sistema de combustível. Glassman e Yetter (2008) mencionam que a corrosividade do etanol pode ser mitigada pelo uso de materiais resistentes à corrosão nos componentes do motor e pelo uso de aditivos apropriados. Nesse sentido Lapuerta, Rodriguez-Fernandez e Agudelo (2008) analisam os efeitos do uso de etanol

como combustível em motores de combustão interna, destacando que o etanol pode contribuir para o desgaste abrasivo devido à sua baixa lubrificidade, o que pode aumentar o atrito entre as partes móveis do motor, além da sua higroscopicidade. Assim, a manutenção regular do sistema de combustível é fundamental para prevenir danos a longo prazo.

O hidrogênio é um combustível promissor para MCI, sobretudo devido ao seu potencial de gerar emissões sem a presença de dióxido de carbono. No entanto, a utilização do hidrogênio como combustível apresenta adversidades e exige uma compreensão detalhada de suas propriedades para otimizar o desempenho do motor (VERHELST; WALLNER, 2009).

O hidrogênio possui um poder calorífico inferior (PCI) por unidade de massa extremamente alto, comparado aos combustíveis fósseis tradicionais como a gasolina e o diesel. Isso significa que, por unidade de massa, o hidrogênio pode liberar uma quantidade significativa de energia durante a combustão. Porém, a baixa densidade energética volumétrica do hidrogênio (por litro) pode ser uma limitação prática (VERGARA, 2016).

A massa específica do hidrogênio é expressivamente menor do que a dos combustíveis líquidos. Essa baixa densidade significa que, para uma mesma quantidade de energia, um volume muito maior de hidrogênio é necessário. A baixa massa específica do hidrogênio influencia diretamente a forma como o combustível é armazenado e injetado no motor, necessitando de sistemas de injeção de alta pressão e tanques de armazenamento volumosos (HEYWOOD, 1988).

Esse gás é altamente inflamável em uma ampla faixa de concentrações (de 4% a 75% em volume no ar), o que significa que ele pode formar misturas inflamáveis com o ar em uma vasta gama de condições. Essa característica torna o manuseio do hidrogênio mais crítico, exigindo cuidados adicionais para evitar riscos de explosões (GLASSMAN; YETTER, 2008).

O hidrogênio apresenta uma energia de ignição relativamente baixa, o que significa que uma quantidade mínima de energia é suficiente para iniciar a combustão. Essa energia é cerca de uma ordem de grandeza menor do que a da gasolina, o que torna o hidrogênio sensível a fontes de calor no cilindro, como pontos quentes e superfícies aquecidas, que podem atuar como gatilhos para pré-ignição (LÉON, 2008).

Como um gás, o hidrogênio não tem uma pressão de vapor no sentido convencional, mas sua capacidade de se expandir rapidamente quando liberado de um estado pressurizado pode levar a riscos de detonação nos motores. O hidrogênio, por ser um gás, elimina muitos dos problemas associados à detonação, mas introduz outros reveses, como o controle preciso da pressão de injeção e a vedação de sistemas de combustível (HEYWOOD, 1988).

A combustão do primeiro elemento da tabela em um motor resulta principalmente na formação de vapor de água, sem emissões de hidrocarbonetos não queimados. No entanto, a alta reatividade do hidrogênio pode levar à formação de óxidos de nitrogênio (NOx) em altas temperaturas de combustão. A composição química do hidrogênio o torna ideal para aplicações de combustão limpa, mas exige controle preciso das condições de combustão para minimizar a

formação de NO_x (VERHELST; WALLNER, 2009).

O hidrogênio em si não é corrosivo, mas pode causar fragilização em certos materiais, como aços e outros metais, especialmente sob alta pressão. Esse fenômeno, conhecido como "fragilização por hidrogênio", pode levar à falha prematura de componentes críticos do motor e do sistema de armazenamento de combustível. A escolha de materiais resistentes ao hidrogênio é de extrema importância para evitar problemas de corrosão e assegurar a longevidade do motor e dos sistemas de combustível (GLASSMAN; YETTER, 2008).

O hidrogênio possui um conjunto de propriedades físicas e químicas que o distingue de outros combustíveis, tornando-o uma das alternativas mais auspiciosas na busca por substitutos aos combustíveis fósseis tradicionais. Essas características não apenas revelam o seu potencial, mas também destacam as vantagens que ele pode oferecer em termos de eficiência, sustentabilidade e redução de impactos ambientais (HEYWOOD, 1988).

A Tabela 1 compara propriedades físico-químicas dos combustíveis, destacando a diferença significativa entre o hidrogênio e outros combustíveis convencionais. O hidrogênio tem vantagens como alta energia por massa e baixa emissão de carbono, mas também apresenta desafios, como baixa densidade energética volumétrica e alta inflamabilidade, que devem ser consideradas no desenvolvimento de tecnologias de combustão.

Tabela 1 – Propriedades do hidrogênio, metano, gasolina e diesel

Propriedades	Hidrogênio	Metano	Gasolina	Diesel
Fórmula química	H ₂	CH ₄	C _n H _{2n}	C _n H _{2n}
Massa molecular (g/mol)	2,016	16,043	107	170
Massa específica (kg/m ³)	0,08	0,65	750	840
Difusividade em ar (cm ² /s)	0,61	0,16	-	-
Limites de inflamabilidade em ar (vol%)	4–75	5–15	1–7,6	0,7–7,5
Velocidade de queima (m/s)	2,65–3,25	0,37–0,43	0,45	0,3
Distância de extinção (mm)	0,61	2,00	2,00	-
Temperatura de autoignição (K)	858	813	523	483
Energia mínima de ignição (mJ)	0,02	0,28	0,24	0,24
Temperatura adiabática da chama (K)	2390	2226	2275	2275
Razão estequiométrica ar/combustível (massa)	34,3	17,2	14,5	14,5
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	120	50	43,4	42,6

Fonte: Adaptado de Ramsay e Dinesh (2024).

2.4 Injeção de combustíveis

O desenvolvimento dos injetores de combustível remonta ao início do século XX, quando a necessidade de melhorar o desempenho dos motores de combustão interna começou a ganhar destaque. Os primeiros sistemas de injeção de combustível foram projetados para motores de ignição por compressão, dado que esses motores exigem partículas muito finas de combustível para garantir uma combustão eficiente em altas pressões. Os trabalhos pioneiros de Robert Bosch na década de 1920 foram fundamentais para o desenvolvimento dos primeiros sistemas de

injeção mecânica de combustível. Bosch introduziu o conceito de bomba injetora, que era capaz de fornecer combustível pressurizado aos cilindros do motor, marcando o início da era moderna da injeção de combustível (BOSCH, 2014).

Esse mecanismo desempenha um papel primordial no desempenho dos MCI, influenciando diretamente a emissão de poluentes e a potência do motor. Esses dispositivos são responsáveis por introduzir o combustível na câmara de combustão de maneira precisa, garantindo uma mistura adequada de ar e combustível. A qualidade do fracionamento e a distribuição do combustível são fatores determinantes para uma combustão eficiente (HEYWOOD, 1988).

Segundo Stone (2012), existem duas classes principais de injeção de combustível: aquelas de injeção direta e aquelas com injeção indireta. Essas injeções podem ser visualizadas na Figura 4. Já Guzzella e Onder (2010) aborda a injeção *dual*, presente no esquema da Figura 5.

- **Injeção Indireta:** A injeção indireta é um dos primeiros tipos de injeção usados em motores de combustão interna, especialmente em motores a gasolina. Neste sistema, o combustível é injetado no coletor de admissão ou na pré-câmara, onde se mistura com o ar antes de entrar na câmara de combustão. Este método foi amplamente utilizado em motores de baixa potência devido à sua simplicidade e custo reduzido. A injeção indireta resulta em uma mistura mais homogênea de ar e combustível, mas tende a ser menos eficiente do que a injeção direta devido à menor precisão na pulverização do combustível (HEYWOOD, 1988).
- **Injeção Direta:** A injeção direta de combustível, por outro lado, envolve a injeção do combustível diretamente na câmara de combustão. Este método oferece maior precisão na quantidade de combustível injetada e no momento da injeção, permitindo uma combustão mais eficiente e uma redução nas emissões de poluentes Ganser (1998).
- **Injeção Dupla (*Dual Injection*):** A injeção dupla combina elementos da injeção direta e indireta, utilizando dois injetores por cilindro. Este sistema permite a injeção de dois tipos de combustível ou permite que o combustível seja injetado em diferentes momentos do ciclo de combustão, permitindo a melhora do desempenho do motor sob uma variedade de condições de operação. Esta tecnologia é útil para atender aos padrões de emissões mais rigorosos sem comprometer a potência do motor (GUZZELLA; ONDER, 2010).



Figura 4 – Injeção indireta (esquerda) e injeção direta (direita)
 Fonte: AutoEsporte (2019)

Na Figura 4, há o comparativo entre a injeção indireta, onde é perceptível que a injeção de combustível ocorre fora da câmara de combustão, e a injeção direta, que por sua vez ocorre dentro da câmara. Já na Figura 5 tem-se um esquema da injeção dupla de combustíveis, no caso representado seria o hidrogênio e o diesel.

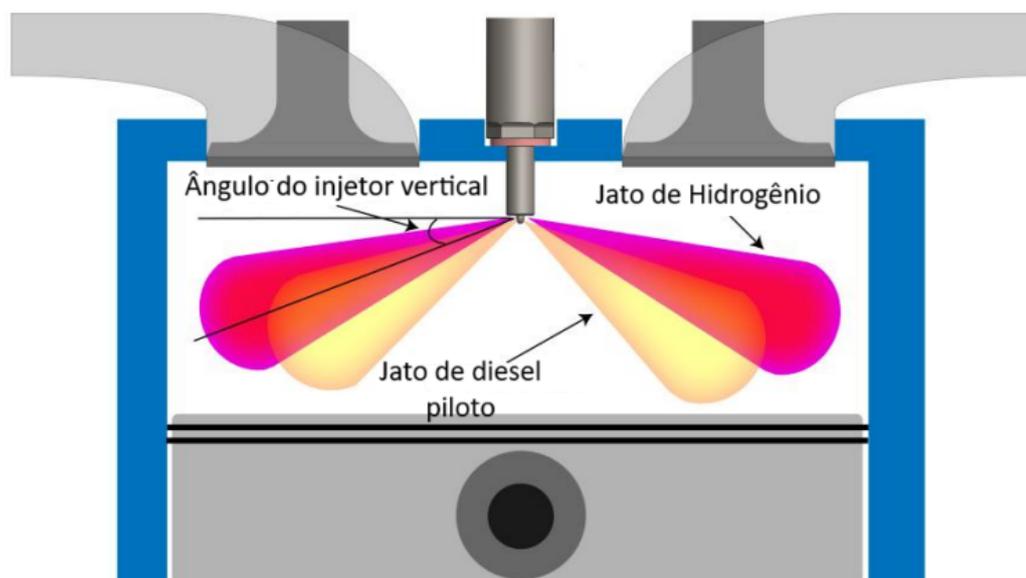


Figura 5 – Esquema da configuração de um jato injetor concêntrico de dupla injeção no plano transversal axial. O ângulo de injeção é definido como o ângulo entre o eixo do jato e o eixo horizontal neste plano - hidrogênio e diesel.
 Fonte: Adaptado de Trusca (2001).

A introdução de injetores de combustível de alta pressão, como os utilizados em sistemas de injeção direta, representou um avanço significativo na construção de motores de combustão interna. De acordo com Lefebvre e Ballal (2010), os injetores de alta pressão são capazes de fragmentar o combustível em partículas menores, o que aumenta a área de superfície disponível para a combustão e melhora o desempenho do motor.

A eficácia dos injetores também é influenciada pela geometria do bico injetor. Segundo Stone (2012), a geometria do injetor afeta a penetração e a distribuição da pulverização de combustível dentro da câmara de combustão. Injetores com múltiplos orifícios podem produzir uma pulverização mais distribuída, melhorando a mistura ar-combustível e, assim, otimizando o processo de combustão. Estudos recentes, como os de Park, Kim e Kim (2015), indicam que o uso de injetores com bicos otimizados pode reduzir significativamente a formação de depósitos de carbono e, portanto, melhorar a durabilidade do motor.

Em motores bicompostíveis, geralmente o injetor é concêntrico e integrado, fornecendo ramificações de fluxo separado para admitir dois combustíveis separadamente, da mesma unidade injetora (SANTOS; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2014). Além da concentricidade, há configurações de posição para a injeção que influenciarão a dispersão do combustível no cilindro, as quais se apresentam como paralela, divergente e convergente, como visualizado na Figura 6.

- **Injeção Paralela:** Na configuração de injeção paralela, ambos os injetores operam simultaneamente, injetando combustível em paralelo. Esta abordagem é tipicamente usada para permitir a combinação de dois tipos de combustível diferentes, como gasolina e etanol, ou para melhorar a atomização do combustível em motores que operam sob diferentes condições de carga e velocidade. A injeção paralela pode melhorar a flexibilidade operacional do motor, permitindo que ele opere de maneira mais eficiente em uma gama de condições (RIBEIRO; BRAGA, 2016).
- **Injeção Divergente:** Na injeção divergente, os dois injetores são posicionados de maneira a injetar combustível em diferentes regiões da câmara de combustão, criando duas nuvens de mistura ar-combustível que se afastam uma da outra. Esta técnica permite uma mistura mais precisa e controlada do combustível com o ar, aprimorando a combustão em motores com geometrias de câmara de combustão complexas (PLÖCHL; EDELBAUER, 2018).
- **Injeção Convergente:** Em contraste, a injeção convergente envolve a injeção de combustível de dois injetores que são direcionados para se encontrar em um ponto específico dentro da câmara de combustão. Esta abordagem é projetada para maximizar a concentração de combustível em áreas onde a ignição é mais provável de ocorrer, melhorando a eficiência de combustão e a potência de saída (HEYWOOD, 1988).

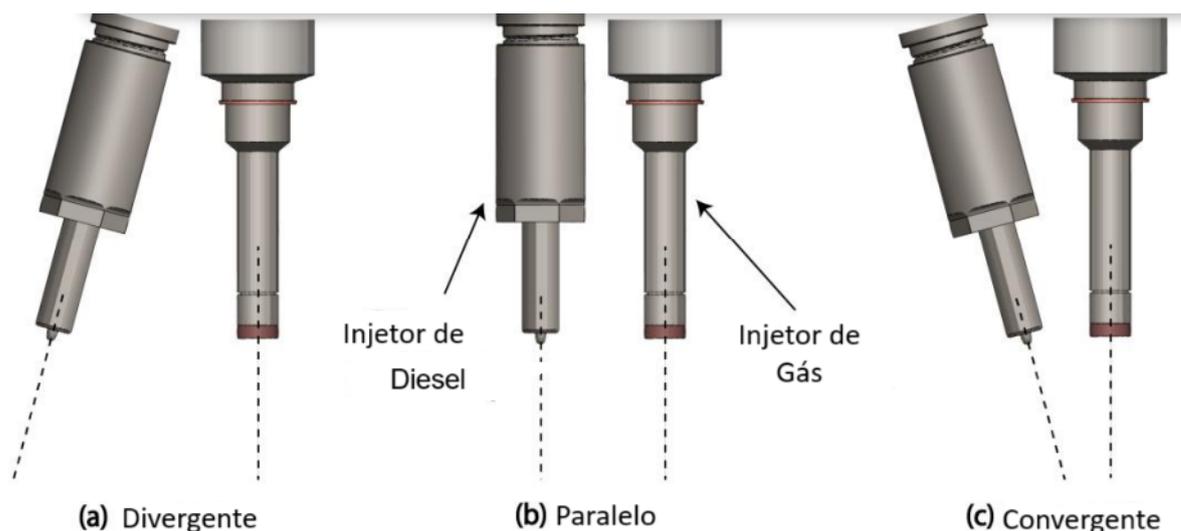


Figura 6 – Dois injetores coaxiais, configurações de combustível duplo com orientação dos injetores
 Fonte: Adaptado de Yip et al. (2019).

Essas configurações da Figura 6 permitem o controle refinado da quantidade, do tempo e da localização da injeção de combustível, possibilitando o emprego de cada uma de acordo com a finalidade do projeto.

Em motores de ignição por compressão, o etanol é frequentemente injetado em uma fase anterior à injeção do hidrogênio. Isso permite que o etanol atue como um combustível de base, estabilizando a combustão e reduzindo o risco de detonação, um problema comum em motores operando com altas taxas de compressão. A injeção inicial de etanol seguida pela injeção de hidrogênio pode resultar em uma combustão mais suave e controlada, em condições de operação a baixa e média carga (SARAVANAN; NAGARAJAN, 2018).

O hidrogênio, com sua alta reatividade e velocidade de chama, é geralmente injetado diretamente na câmara de combustão após a injeção do etanol. Isso promove uma combustão rápida e completa do hidrogênio, que atua como um intensificador da combustão. A combinação de etanol e hidrogênio nesta situação pode não apenas melhorar o desempenho do motor, mas também reduzir significativamente as emissões de NO_x e material particulado, uma vez que a combustão do hidrogênio não gera emissões de carbono (JAMROZIK; KOCISZEWSKI, 2018).

Outra configuração explorada em motores de ignição por compressão é a injeção de hidrogênio durante a fase de compressão, enquanto o etanol é injetado durante a fase de admissão. Essa técnica permite uma mistura mais homogênea de etanol e ar antes da ignição, enquanto o hidrogênio é queimado em uma fase posterior, resultando em uma combustão mais eficiente e uma redução na formação de depósitos de carbono na câmara de combustão. Essa abordagem pode ser satisfatória em motores projetados para operar com combustíveis alternativos, como etanol e hidrogênio (HUANG; ZHENG, 2010).

No entanto, a integração de hidrogênio em motores de ignição por compressão também apresenta algumas dificuldades, pois deve ser cuidadosamente controlada para evitar fenômenos

indesejáveis, como a batida de pino e a ignição prematura. Assim, a gestão precisa da injeção e o aperfeiçoamento dos parâmetros operacionais são indispensáveis para assegurar o desempenho e eficácia na combustão (PLÖCHL; EDELBAUER, 2018).

2.5 Ferramentas de simulação

A dinâmica dos fluidos computacional (DFC, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) é uma área vasta e complexa. Os fundamentos da DFC envolvem a compreensão das equações de Navier-Stokes, que governam o movimento dos fluidos, e como essas equações são resolvidas numericamente (FERZIGER; PERIĆ, 2002a). Autores como Anderson (1995) destacam que a base teórica da DFC está nas equações diferenciais parciais que descrevem a conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia. A discretização dessas equações, seja pelo método das diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos, é essencial para transformar as equações contínuas em problemas resolvíveis computacionalmente. Outro aspecto importante é a escolha de condições de contorno apropriadas, que podem influenciar significativamente a precisão das simulações. Neste contexto, Ferziger e Perić (2002b) discutem como diferentes métodos de discretização afetam a convergência e a estabilidade das soluções numéricas.

A turbulência é um dos maiores desafios na DFC devido à sua natureza caótica e multi-escalar. A modelagem de turbulência geralmente é feita através de técnicas como a média de Reynolds (RANS), simulações de grandes escalas (LES), e simulações diretas de Navier-Stokes (DNS). Wilcox (1993) aponta que o modelo RANS, apesar de suas limitações em capturar detalhes finos do escoamento, é amplamente utilizado devido à sua eficiência computacional. Por outro lado, Sagaut (2006) discute a LES como uma abordagem intermediária que oferece um compromisso entre precisão e custo computacional, enquanto Moin e Kim (1991) defendem o uso do DNS para estudos de fundamental importância, onde a precisão é crítica, apesar do alto custo computacional.

A qualidade da malha computacional é importante para a precisão das simulações DFC. Uma malha inadequada pode introduzir erros significativos, enquanto uma malha bem refinada pode capturar melhor os gradientes de variáveis como velocidade e pressão. Thompson, Warsi e Mastin (1985) discutem a importância de técnicas de geração de malha, como malhas estruturadas e não estruturadas, e como a adaptação da malha durante a simulação pode melhorar a precisão. Blazek (2001) também explora a otimização da malha, sugerindo que a geração de malhas híbridas pode ser uma solução eficiente para problemas complexos, onde diferentes regiões do domínio exigem diferentes níveis de refinamento.

2.5.1 *Software* Ansys Fluent®

O *software* Ansys Fluent® é reconhecido como uma das ferramentas mais usuais e versáteis para simulação da dinâmica dos fluidos computacional (DFC). Ele oferece uma gama de funcionalidades que permitem a modelagem e simulação com precisão do comportamento

de fluidos em diversos contextos industriais e científicos. Patankar (1980) menciona que o Ansys Fluent[®] é competente em resolver as equações de Navier-Stokes utilizando técnicas de discretização como volumes finitos, o que o torna adequado para uma variedade de aplicações, desde escoamentos laminares simples até complexos escoamentos turbulentos e multifásicos.

Uma das principais vantagens no uso do Ansys Fluent[®] é sua capacidade de integração com outras ferramentas de simulação, permitindo uma abordagem multi física que pode incluir não apenas fluidodinâmica, mas também análise estrutural, transferência de calor e eletromagnetismo. Essa integração facilita a simulação de fenômenos acoplados, onde as interações entre diferentes domínios físicos são críticas. Por exemplo, Ferziger e Perić (2002b) mencionam que em aplicações de transferência de calor conjugada, onde o comportamento térmico do fluido e da estrutura deve ser simulado simultaneamente.

O *software* também oferece uma vasta biblioteca de modelos de turbulência, como os modelos k-epsilon e k-omega, além de opções avançadas como *Large Eddy Simulation* (LES) e *Detached Eddy Simulation* (DES). Wilcox (1993) destaca que a escolha do modelo de turbulência é importante para a precisão das simulações e que o Ansys Fluent[®] facilita essa escolha através de sua interface amigável e documentação extensa, permitindo aos usuários selecionar o modelo mais adequado para suas necessidades específicas.

As equações governantes e os modelos de turbulência utilizados na simulação deste trabalho são extraídos do próprio software Ansys Fluent[®] e sua documentação técnica (ANSYS Inc., 2024).

2.5.2 Equações Governantes

A simulação baseia-se nas equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, além das equações do modelo de turbulência *k-omega SST*. Essas equações são fundamentais para descrever o comportamento do escoamento dos combustíveis.

A equação da continuidade expressa a conservação da massa em um volume de controle e pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.5)$$

Em que ρ é a massa específica do fluido [kg/m³], t é o tempo [s], \mathbf{v} é o vetor velocidade do fluido [m/s] e $\nabla \cdot$ representa o operador divergente, que calcula a taxa de variação da densidade em um volume de controle.

A equação 2.5 assegura que qualquer variação na massa específica dentro do volume de controle deve ser compensada pelo fluxo de massa que entra ou sai do domínio.

A equação da quantidade de movimento, derivada das equações de Navier-Stokes, descreve a conservação do momento linear do fluido e é expressa por:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho\mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2.6)$$

Em que P é a pressão estática [Pa], que age sobre os elementos de fluido, $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor das tensões viscosas [Pa], que inclui os efeitos da viscosidade no escoamento, \mathbf{g} é o vetor aceleração da gravidade [m/s^2], responsável pelos efeitos gravitacionais no fluido e \mathbf{F} representa forças externas aplicadas ao fluido, como forças de corpo ou interações com outras fases do escoamento.

A equação 2.6 estabelece que a variação da quantidade de movimento linear do fluido ao longo do tempo e do espaço é resultado da soma das forças de pressão, viscosas e externas aplicadas ao sistema.

A equação da energia expressa a conservação da energia total do fluido, levando em consideração a condução térmica e os efeitos de dissipação viscosa:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (k\nabla T) + \Phi \quad (2.7)$$

Em que E é a energia total do fluido por unidade de massa [J/kg], que inclui energia interna e energia cinética, k é a condutividade térmica do fluido [W/(m·K)], responsável pela transferência de calor por condução, T é a temperatura do fluido [K] e Φ representa a dissipação viscosa, que converte energia mecânica em calor devido às tensões de cisalhamento.

A equação 2.7 determina como a energia do fluido varia ao longo do tempo, considerando efeitos advectivos, difusivos e dissipativos.

2.5.3 Modelo de Turbulência *k-omega SST*

O modelo *k-omega SST* é escolhido pois, além de ser muito utilizado para simulações de escoamentos turbulentos, também é levado em consideração o custo operacional dispendido em usar um modelo de turbulência mais preciso disponível no programa (MENTER, 1994). Deste modo, é decidido que esse modelo atenderia às expectativas e é implementado no processo.

Outro aspecto notável do Ansys Fluent[®] é sua capacidade de lidar com malhas complexas e refinadas. A qualidade da malha é essencial para a precisão dos resultados em DFC, e o programa oferece ferramentas automatizadas para a geração de malhas estruturadas e não estruturadas. Thompson, Warsi e Mastin (1985) sugerem que a capacidade de refinar a malha nas regiões de maior interesse, como áreas de alto gradiente de velocidade ou pressão, é um diferencial do programa.

2.5.4 Software Diesel RK[®]

O software Diesel RK[®] (2025) é uma ferramenta muito utilizada para a modelagem e simulação de motores de combustão interna, permitindo a análise de diferentes configurações de injeção de combustíveis e parâmetros operacionais. Esse software foi desenvolvido com foco

na otimização da eficiência e no estudo da emissão de poluentes em motores diesel, incluindo modelos que permitem a simulação de combustíveis alternativos, como hidrogênio e etanol. A utilização do Diesel RK[®] é particularmente vantajosa para prever o desempenho do motor sem a necessidade de testes experimentais extensivos, o que reduz significativamente os custos e o tempo de desenvolvimento de novas configurações de motores.

Dentre os recursos oferecidos pelo Diesel RK[®], destaca-se a capacidade de simular sistemas de injeção direta e indireta, permitindo avaliar como diferentes estratégias de injeção afetam a formação da mistura ar-combustível, a taxa de combustão e a eficiência global do motor. O software também permite análises avançadas de turbulência e processos termodinâmicos, contribuindo para a compreensão detalhada dos fenômenos que ocorrem dentro da câmara de combustão.

No presente trabalho, o Diesel RK[®] foi empregado para avaliar diferentes proporções de hidrogênio misturadas ao diesel, analisando o impacto dessas variações no desempenho do motor. Os dados extraídos do software são utilizados para definir condições de contorno na simulação DFC, garantindo que os parâmetros aplicados fossem realistas e representassem fielmente a operação do motor em condições variadas.

2.5.5 *Software Autodesk Inventor*

O Autodesk Inventor (AUTODESK-INC., 2025) é um software de modelagem tridimensional amplamente utilizado na engenharia mecânica para o desenvolvimento e validação de componentes e sistemas. Ele permite a criação de geometrias complexas com alta precisão, sendo uma ferramenta essencial para a concepção e análise de dispositivos mecânicos, incluindo sistemas de injeção de combustíveis para motores de combustão interna.

Dentre as funcionalidades do Inventor, destacam-se a modelagem paramétrica, a análise de interferências e a geração de desenhos técnicos detalhados. O software também oferece integração com módulos de análise de elementos finitos (FEA), permitindo que os engenheiros avaliem a resistência estrutural das peças projetadas antes da fabricação. Essa capacidade de simulação estrutural é especialmente importante na modelagem de componentes sujeitos a altas pressões e temperaturas, como os injetores de combustível.

No presente estudo, o Autodesk Inventor foi utilizado para modelar a geometria do injetor dual, permitindo a adição de um segundo canal de injeção para hidrogênio. Essa modelagem foi fundamental para a análise computacional no Ansys Fluent[®], garantindo que a geometria considerada na simulação DFC representasse fielmente a configuração real do injetor.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são detalhadas as abordagens e procedimentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa, com o objetivo de classificar e especificar as ferramentas, métodos e técnicas empregadas. Além disso, são identificadas as variáveis e indicadores utilizados ao longo do trabalho, possibilitando a análise e a verificação dos cálculos realizados.

3.1 Tipo de pesquisa

A pesquisa é fundamental para o avanço do conhecimento em todas as áreas do saber, pois desempenha um papel essencial na resolução de problemas, inovação e desenvolvimento econômico e social. Richardson (2017,p.4) afirma que "A pesquisa é uma forma de pensar, analisar criticamente os vários aspectos do dia a dia do trabalho profissional; compreender e formular princípios orientadores que orientam um determinado procedimento [...]".

Richardson (2017) ainda corrobora que há algumas características essenciais em pesquisas, que seriam a sistematização, validade e verificabilidade, empirismo e criticalidade. Assim, são usados destes e outros artifícios para o entendimento e resolução de problemas. Já pelo ponto de vista de Kumar (2018), os tipos de pesquisa podem ser divididas seguindo três vieses, não sendo totalmente independente, uma pode estar correlacionada a outra. Isto é demonstrado na Figura 7.

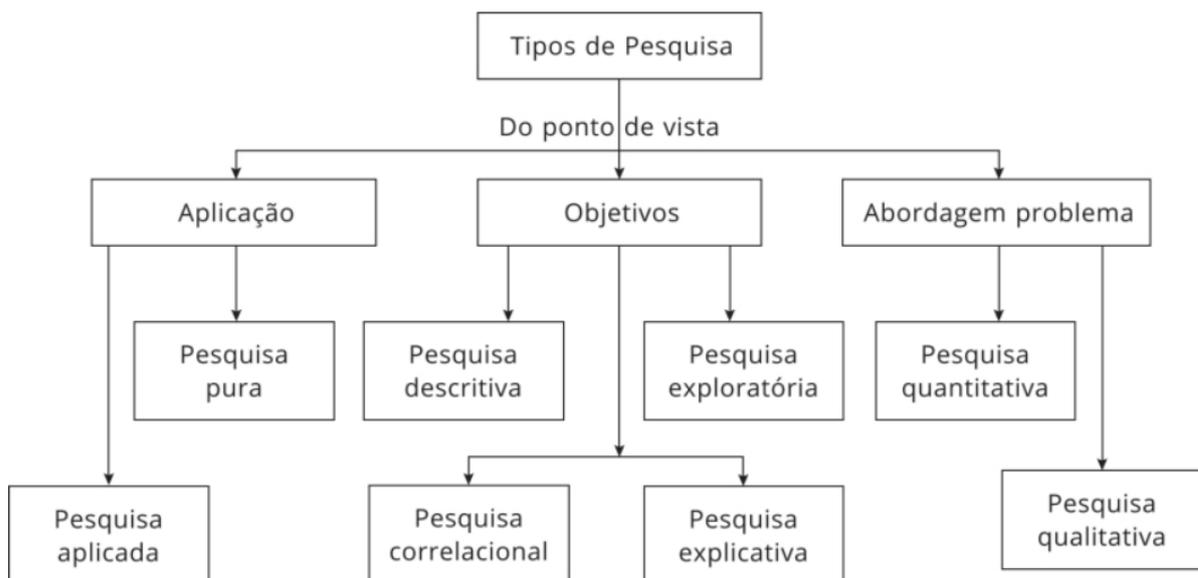


Figura 7 – Tipos de pesquisa
Fonte: Kumar (2018)

No ponto de vista da abordagem do problema, esses métodos embora divididos não são completamente distintos, pois podem estar associados de tal forma que têm-se a presença da

abordagem mista. A abordagem mista emerge da necessidade de enfrentar a complexidade dos problemas de pesquisa em diversas áreas científicas e tratá-los de maneira global (RICHARDSON, 2017).

A pesquisa qualitativa é centrada na compreensão profunda dos fenômenos sociais e comportamentais. Essa abordagem se preocupa em explorar as percepções, experiências, e significados atribuídos pelos indivíduos a um determinado contexto ou evento (BOGDAN; BIKLEN, 1994). Assim, permite explorar a complexidade das experiências humanas por meio de métodos como entrevistas, grupos focais e observações, fornecendo uma compreensão profunda e detalhada dos contextos estudados (CRESWELL, 2014).

Para Babbie (2016), a pesquisa quantitativa se concentra na mensuração e na quantificação dos dados, utilizando métodos estruturados como questionários e experimentos para testar hipóteses específicas. Este tipo de abordagem permite ao pesquisador generalizar os resultados para um público mais amplo e estabelecer relações de causa e efeito com base em análises estatísticas.

Outrossim, também tem-se o viés de classificação da pesquisa de acordo com seus objetivos, o que categoriza os estudos baseando-se na finalidade que o pesquisador deseja alcançar. As pesquisas podem ser classificadas como exploratórias, descritivas ou explicativas, cada uma com características e finalidades específicas.

A pesquisa exploratória é realizada quando o objetivo é proporcionar uma maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Gil (2017) explica que a pesquisa exploratória tem como objetivo desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, com vistas a uma formulação de problemas mais precisa ou a hipóteses mais testáveis para estudos futuros.

A pesquisa descritiva tem o objetivo de observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos sem manipulá-los. Nessa classificação, se busca fornecer informações sobre um determinado fenômeno ou população, responde perguntas do tipo “o quê?”, “como?”, “onde?” e “quando?”, sem necessariamente determinar causas ou relações causais (LAKATOS; MARCONI, 2017).

Como abordado por Sampieri, Collado e Lucio (2013), a pesquisa explicativa busca estabelecer relações de causalidade, identificando variáveis independentes que influenciam uma variável dependente. Este viés é essencial para o desenvolvimento de teorias científicas e o avanço do conhecimento.

Além desses métodos, há a categorização da pesquisa quanto aos procedimentos técnicos, que refere-se às técnicas e métodos específicos utilizados para coletar, analisar e interpretar os dados. Os principais tipos de classificação quanto aos procedimentos técnicos incluem: estudo de caso, pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa-ação, pesquisa participante e pesquisa experimental.

Yin (2017) argumenta que o estudo de caso é ideal para pesquisas em que o fenômeno em estudo é contemporâneo e complexo, quando não se tem controle sobre eventos comportamentais. Ademais, Gil (2017) afirma que contrário de outros tipos de delineamentos, como o experimento e o levantamento, as fases do estudo de caso não seguem uma ordem rígida. Seu planejamento costuma ser mais adaptável e, frequentemente, o que é elaborado em uma etapa acaba influenciando modificações na etapa seguinte.

Lakatos e Marconi (2017) expõe que a pesquisa bibliográfica é essencial para o delineamento do problema de pesquisa e o embasamento teórico, servindo como base para a formulação de hipóteses e desenvolvimento de outras metodologias.

Gil (2017) observa que a pesquisa documental se diferencia da pesquisa bibliográfica pelo uso de fontes primárias, que não são criadas com o propósito direto de servir à pesquisa, mas que oferecem percepções importantes sobre a temática estudada.

A pesquisa-ação é um tipo de investigação que busca, simultaneamente, produzir conhecimento científico e promover mudanças práticas em um determinado contexto social (THIOLLENT, 2011). Esse método foi inicialmente desenvolvido por Kurt Lewin (1946), que o definiu como uma forma de pesquisa voltada para a resolução de problemas sociais concretos através da ação colaborativa entre pesquisadores e participantes.

A pesquisa participante é um método que enfatiza a colaboração entre pesquisadores e participantes no processo de investigação. Consoante com Freire (1987) a pesquisa participante é essencial para promover um processo de conscientização, no qual os participantes se tornam protagonistas na construção de seu próprio conhecimento.

Creswell (2014) descreve a pesquisa experimental como um método que consiste em alterar deliberadamente uma variável independente para examinar como essa alteração afeta uma variável dependente. Ele destaca que a pesquisa experimental é usada não apenas nas ciências naturais, mas também nas ciências sociais e comportamentais para determinar a eficácia de intervenções, programas ou tratamentos.

Este trabalho adota uma abordagem mista, integrando a pesquisa exploratória de forma estruturada. A pesquisa exploratória é utilizada para compreender e mapear o problema, identificar variáveis relevantes e desenvolver um quadro teórico inicial.

3.2 Materiais e Métodos

Para viabilizar a análise da influência da injeção *dual* no desempenho de um motor de combustão interna utilizando etanol e hidrogênio, é necessário seguir uma sequência estruturada de procedimentos e métodos. Na Figura 8 é ilustrado esse fluxo de trabalho, destacando as principais etapas do processo.

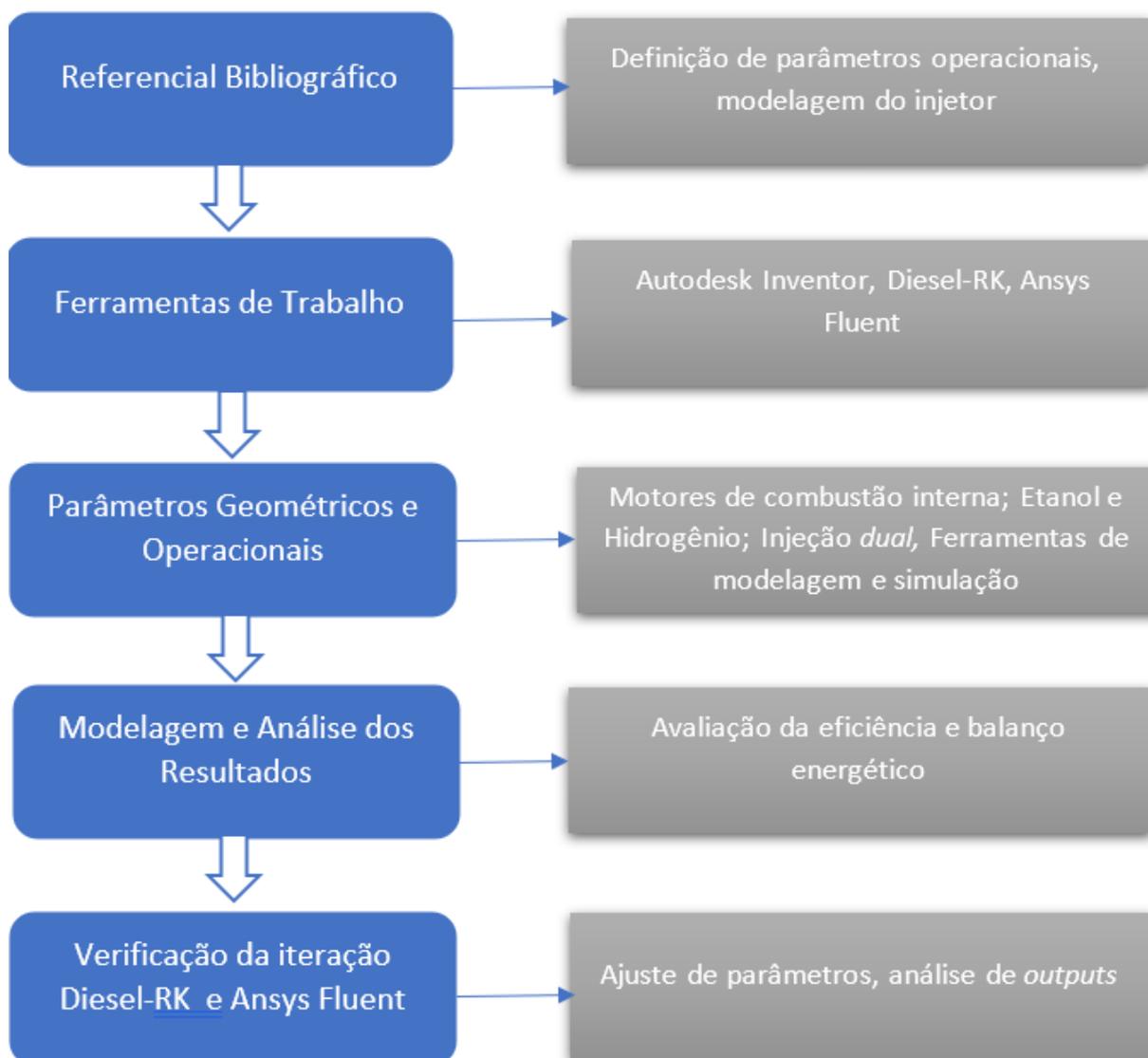


Figura 8 – Fluxograma das etapas do estudo.
Fonte: Pesquisa direta (202).

A primeira fase envolve uma revisão da literatura técnica e científica sobre a aplicação de combustíveis alternativos, como etanol e hidrogênio, em motores de combustão interna. Os principais tópicos abordados incluem:

- Estudo do uso de etanol e hidrogênio em motores de combustão interna.
- Análise de sistemas de injeção dual etanol-hidrogênio.
- Revisão de desempenho, eficiência e emissões, considerando diferentes misturas de combustíveis.

Em sequência, são definidos os parâmetros iniciais necessários para a simulação do injetor. Primeiramente, é realizada a modelagem geométrica do injetor no Autodesk Inventor. Após isso, é feita a análise no *software* Diesel RK[®] para avaliar o desempenho do motor com diferentes proporções de hidrogênio e determinar condições de contorno representativas, como pressão, temperatura e taxa de injeção dos combustíveis. A partir desses resultados, são estabelecidos os valores a serem utilizados na simulação DFC.

A geometria do injetor simulada neste trabalho é modelada no *software* Autodesk Inventor, com adaptações necessárias para viabilizar a injeção *dual*. O processo de modelagem envolve uma revisão de literatura e a comparação com protótipos reais, permitindo a definição das dimensões das peças e a determinação dos respectivos graus de liberdade. Assim, são considerados os seguintes pontos:

- Definição da estrutura original do injetor;
- Ajustes para compatibilizar o projeto com os requisitos do motor de ignição por compressão com injeção dupla de combustíveis.

A Figura 9 apresenta as vistas do injetor modelado e sua montagem final.

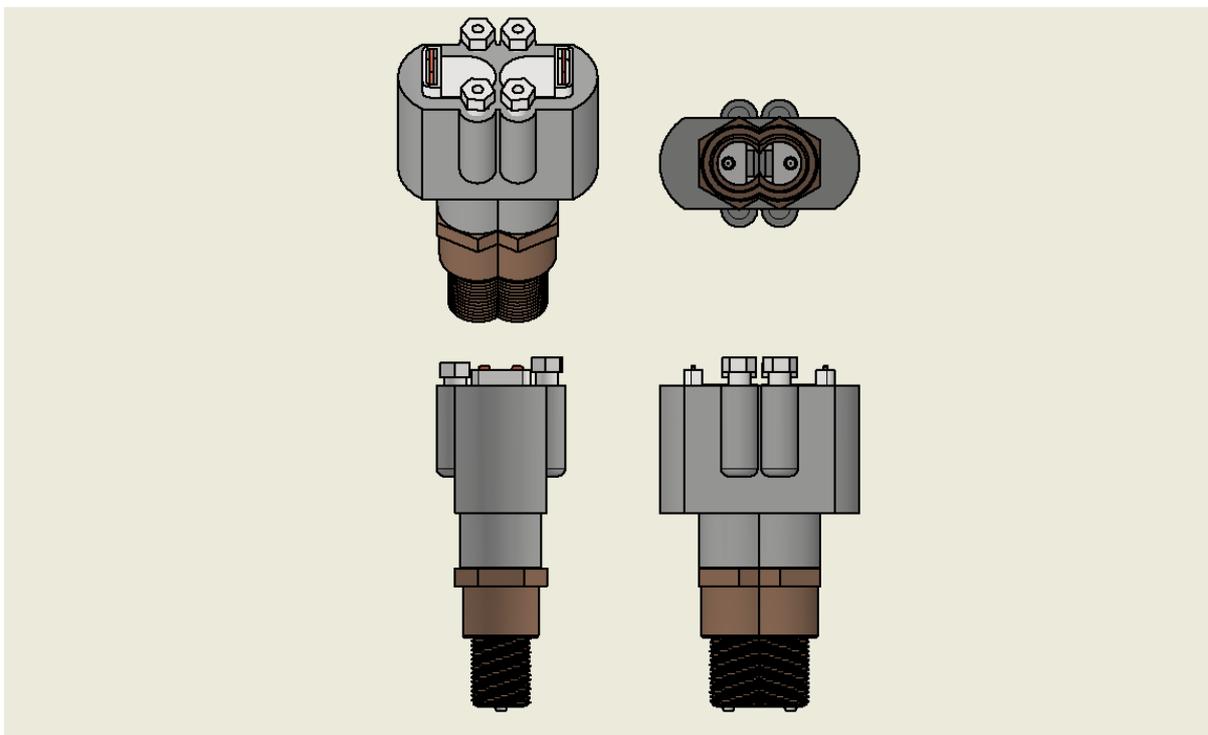


Figura 9 – Montagem final do injetor.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Para fins de redução do custo computacional e redução do tempo de simulação, é optado por aplicar a malha e simular somente as agulhas de injeção. Assim, as outras peças são suprimidas na montagem, resultando na Figura 10. Na agulha de menor diâmetro será injetado o hidrogênio e na de maior diâmetro o etanol.

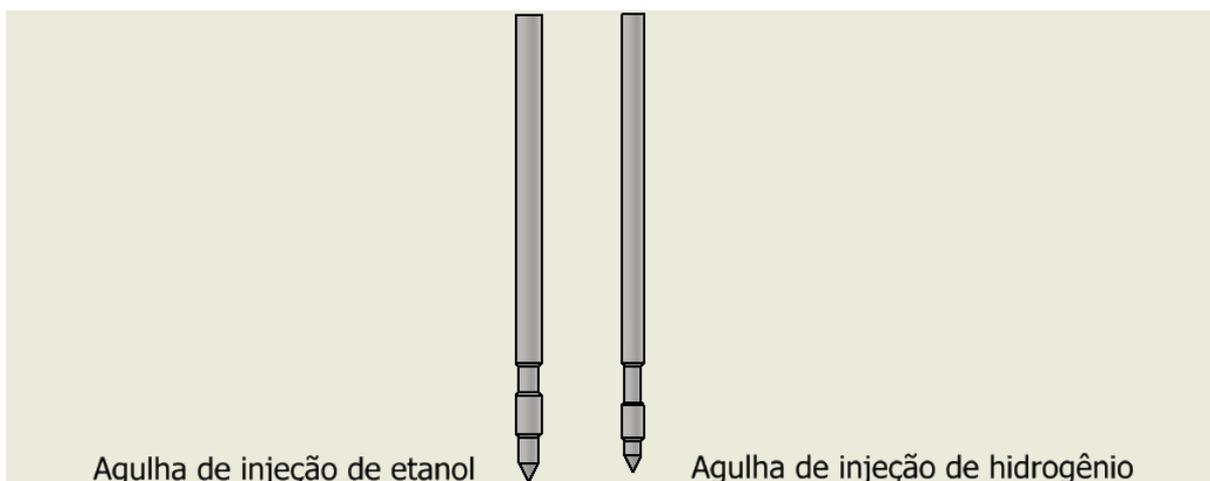


Figura 10 – Agulhas de injeção.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Com o modelo geométrico devidamente desenvolvido, é feita a importação para o Ansys Fluent[®] para que seja dado seguimento no estudo. Com o objetivo de reduzir os custos computacionais e garantir a precisão dos resultados da simulação, é adotado um procedimento sistemático para avaliar a dependência da malha no modelo. Inicialmente, aplicou-se a malha padrão mais grosseira como ponto de partida para a análise, em seguida, procedeu-se com um refinamento gradual da malha, reduzindo progressivamente o tamanho dos elementos para melhorar a resolução da solução e observar como isso impactaria os resultados obtidos.

Esse procedimento de verificação é essencial para garantir que os resultados da simulação não sejam sensíveis ao tamanho da malha, garantindo, assim, a confiabilidade dos dados obtidos para a análise. O processo de malhação envolveu:

- Escolha do tipo de malha (estruturada/não estruturada);
- Definição dos refinamentos locais em regiões críticas e identificação de entradas e saídas dos fluidos, bem como identificação das paredes na geometria;
- Análise de métricas de qualidade da malha.

É importante ressaltar que, para diferentes números de elementos da malha, são aplicadas as mesmas condições de contorno. A primeira malha segue o tamanho padrão do Ansys Fluent[®], seguida do refino da malha de 56%. Nas Tabelas 2 e 3 são trazidas as descrições do tamanho, quantidade e número de nós dos elementos de malha.

Tabela 2 – Comparação entre as malhas - Agulha de hidrogênio

Parâmetro	Malha 1	Malha 2
Tamanho dos Elementos (mm)	3,5809	2
Número de Elementos	5462	54636
Número de Nós	22100	220950

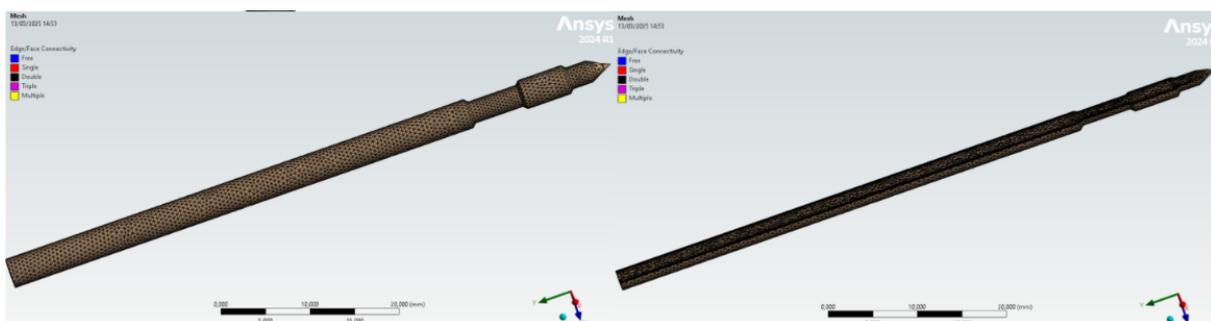
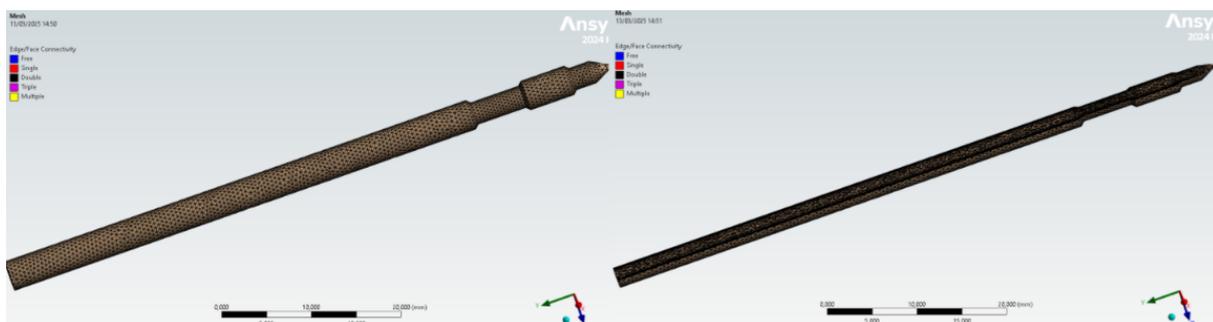
Fonte: Pesquisa direta 2025.

Tabela 3 – Comparação entre as malhas - Agulha de etanol

Parâmetro	Malha 1	Malha 2
Tamanho dos Elementos (mm)	3,6522	2
Número de Elementos	5983	43137
Número de Nós	26864	267420

Fonte: Pesquisa direta 2025.

Nas Figuras 11 e 12 é trazida a imagem da agulha de hidrogênio com as malhas aplicadas, bem como a vista transversal.

**Figura 11** – Agulha de injeção de H_2 com a primeira malha.**Figura 12** – Agulha de injeção de H_2 com a malha refinada.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Já nas Figuras 13 e 14 têm-se as agulhas de etanol, onde mesmo na primeira malha mais grossa os elementos parecem mais estáveis. Contudo, em ambas as agulhas é perceptível que a distorção da malha é diminuída de acordo com a diminuição do tamanho dos elementos.

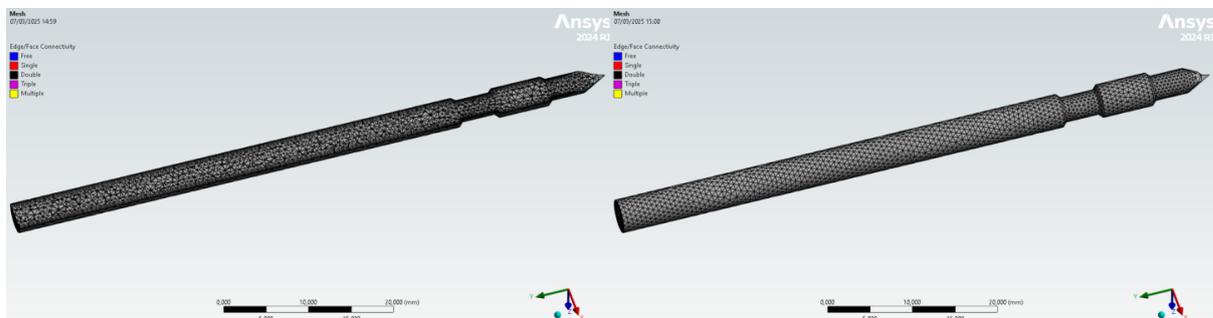


Figura 13 – Agulha de injeção de C_2H_5OH com a primeira malha.

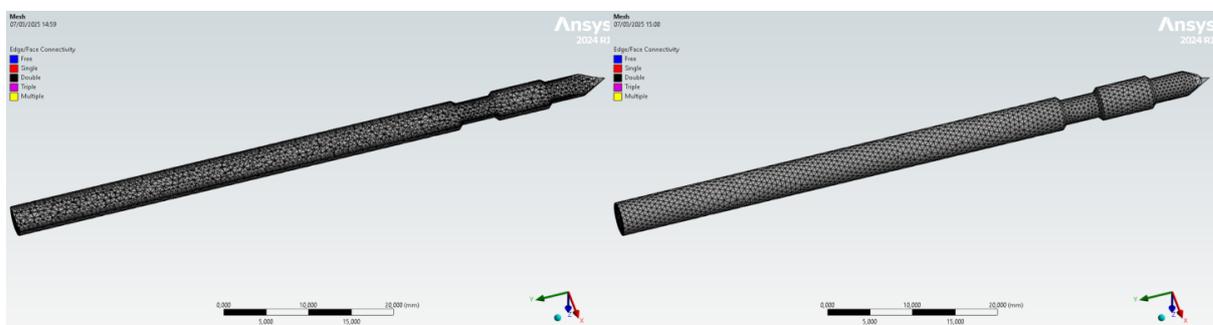


Figura 14 – Agulha de injeção de C_2H_5OH com a malha refinada.

Para avaliar se as malhas aplicadas têm uma boa qualidade de forma que os resultados converjam, é empregado o uso das métricas *Skewness* e *Orthogonal Quality* ambas são métricas que quantificam a deformação dos elementos da malha em relação à forma ideal, permitindo a identificação de regiões problemáticas que podem comprometer a confiabilidade dos resultados, como explicado no Apêndice A.

A métrica de *Skewness* mede o grau de deformação dos elementos da malha em relação a uma forma geométrica ideal. Para um quadrado ou hexaedro perfeito, a assimetria é zero. Quanto maior o valor de *Skewness*, mais distorcido é o elemento.

De acordo com a análise da métrica *Skewness*, no histograma das Figuras 15, 16, 17 e 18 é notória a presença de elementos com formatos diferentes na malha, em que:

- Tet4 (Tetraedros de 4 nós) – em amarelo
- Wed6 (Prismas de 6 nós) – em vermelho
- Pyr5 (Pirâmides de 5 nós) – em azul esverdeado

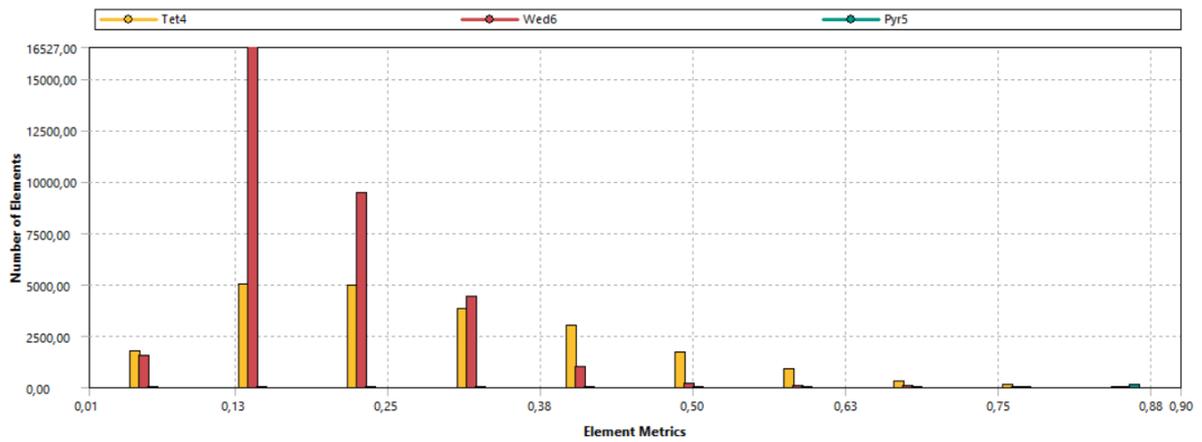


Figura 15 – Métrica de qualidade de malha *Skewness* para a agulha de Hidrogênio - Malha 1.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

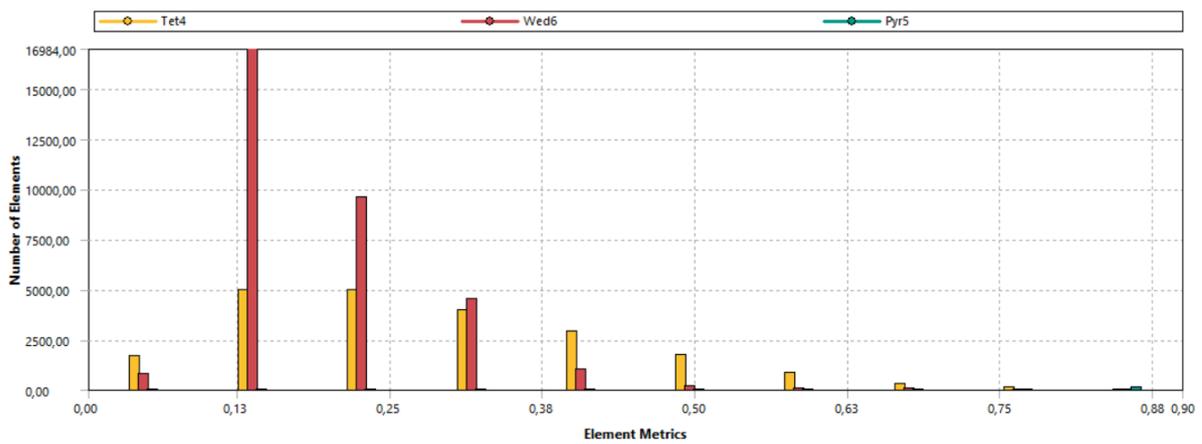


Figura 16 – Métrica de qualidade de malha *Skewness* para a agulha de Hidrogênio - Malha 2.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

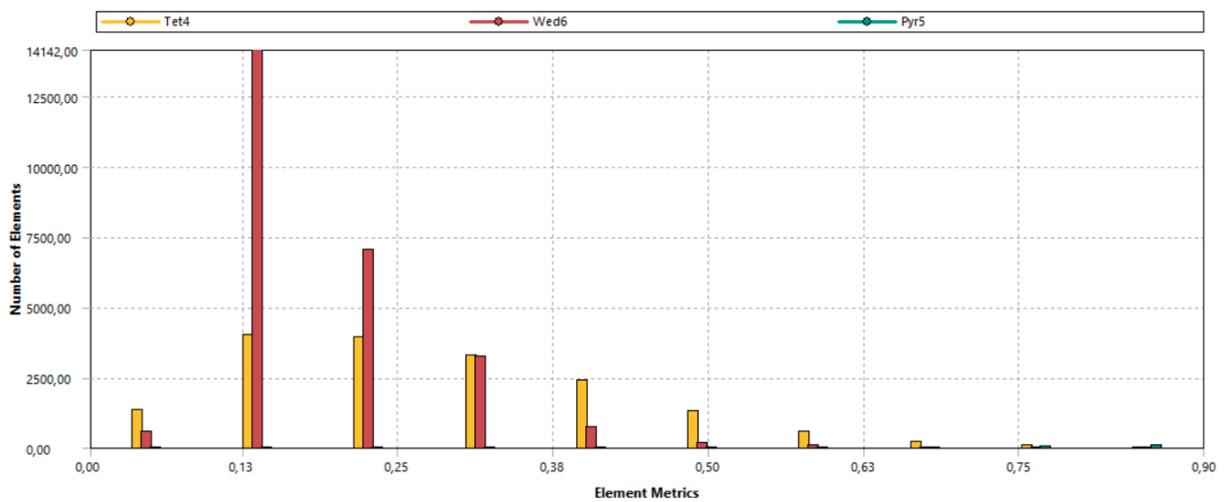


Figura 17 – Métrica de qualidade de malha *Skewness* para a agulha de Etanol - Malha 1.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

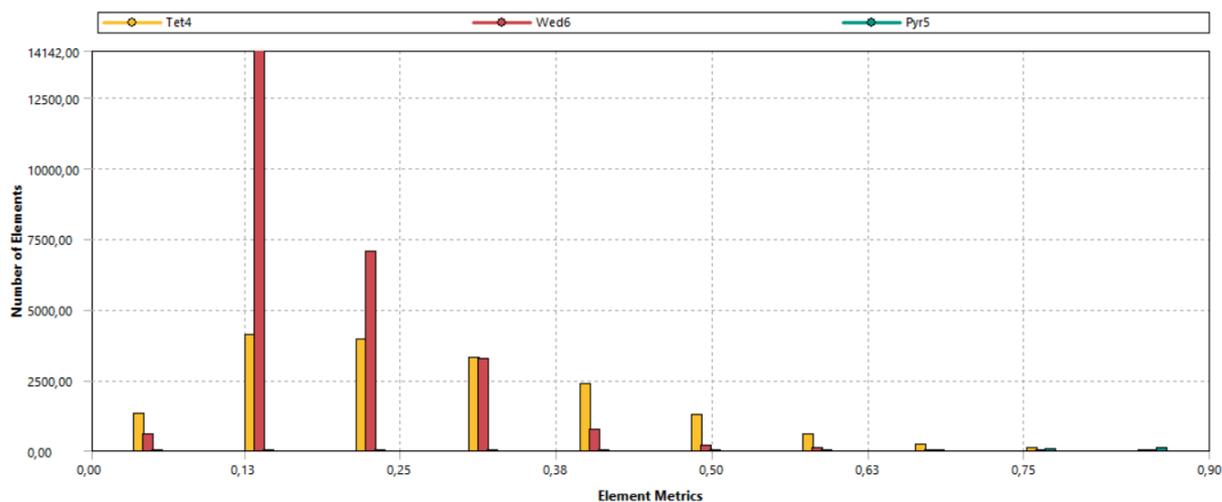


Figura 18 – Métrica de qualidade de malha *Skewness* para a agulha de Etanol - Malha 2.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Desta forma, com a análise dos histogramas, as malhas apresentam boa qualidade na maior parte dos elementos, mesmo com a presença de alguns elementos maiores do que 0,5. Levando isso em consideração, tanto a primeira quanto segunda malha são consideradas válidas para realizar o estudo de acordo com a métrica *Skweness*.

O segundo parâmetro usado para avaliar a qualidade da malha é a *Orthogonal Quality*, ela mede a regularidade dos ângulos entre as faces adjacentes de um elemento da malha. O objetivo é garantir que esses ângulos sejam o mais próximos possível de 90° (para elementos quadriláteros e hexaédricos) ou de 60° (para elementos triangulares e tetraédricos). Quanto mais ortogonais forem os elementos, melhor será a qualidade da malha. Assim, nas Figuras 19, 20, 21 e 22, é importante ressaltar alguns pontos:

- Os elementos Wed6 (prismáticos) apresentam a melhor qualidade ortogonal na malha.
- Os elementos Tet4 (tetraédricos) têm qualidade intermediária, mas com algumas regiões de menor qualidade.
- Os elementos Pyr5 (piramidais) apresentam menor ocorrência e tendem a ter valores menores de qualidade ortogonal.

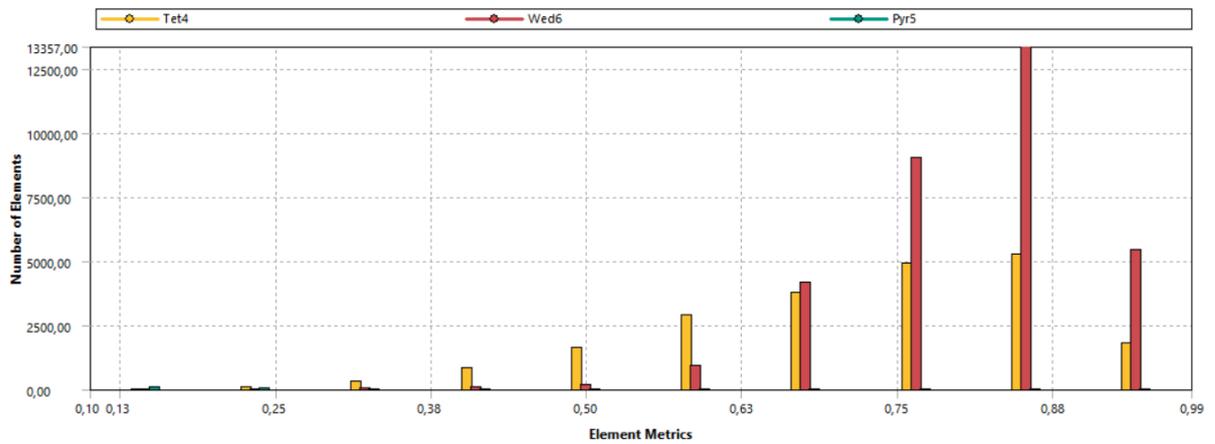


Figura 19 – Métrica de qualidade de malha *Orthogonal Quality* para a agulha de hidrogênio - Malha 1.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

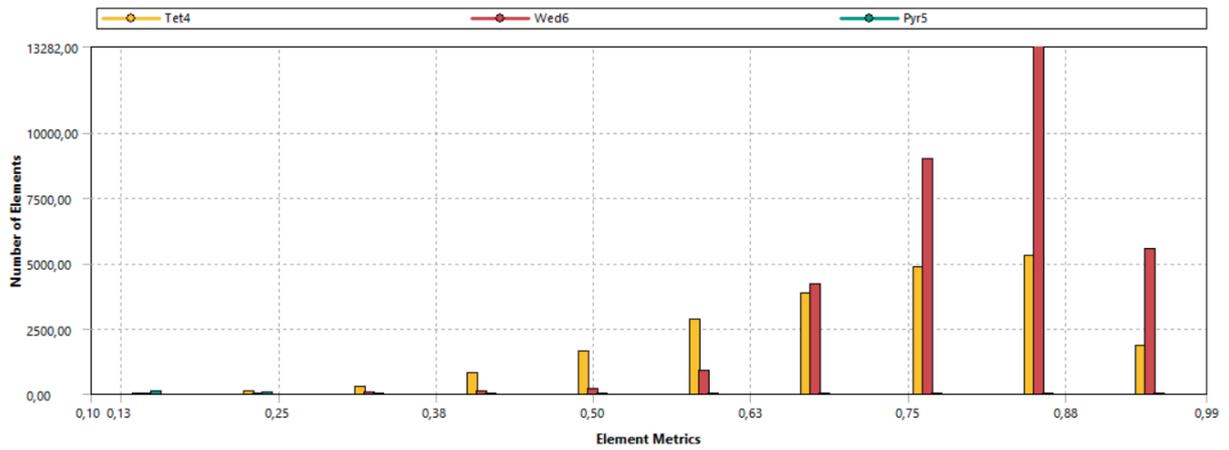


Figura 20 – Métrica de qualidade de malha *Orthogonal Quality* para a agulha de hidrogênio - Malha 2.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

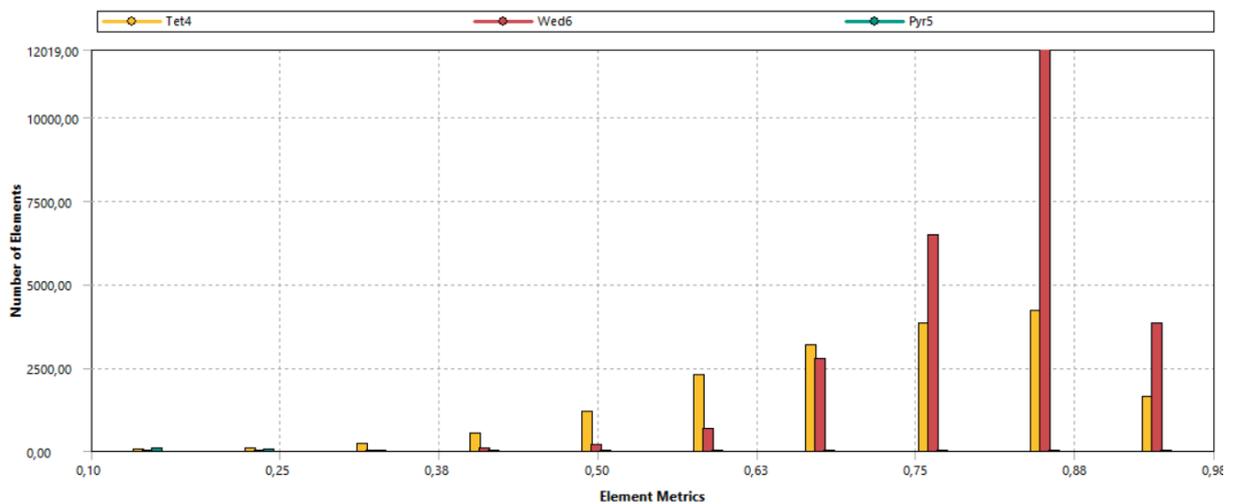


Figura 21 – Métrica de qualidade de malha *Orthogonal Quality* para a agulha de etanol - Malha 1.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

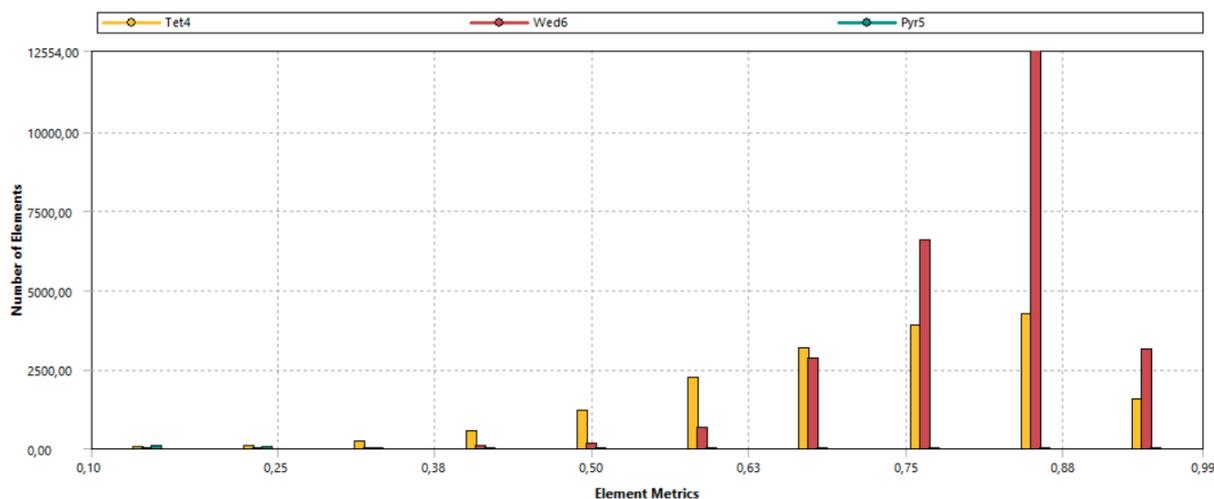


Figura 22 – Métrica de qualidade de malha *Orthogonal Quality* para a agulha de etanol - Malha 2.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Nos histogramas, é perceptível que há alguns elementos fora da faixa ótima de trabalho. Porém, como a quantidade é muito pequena quando feita a relação com o número total de elementos, é decidido que essa qualidade está aceitável para realizar os cálculos.

A simulação inicial do motor é realizada no *software* Diesel RK[®], onde são configuradas as condições do ciclo de combustão, incluindo compressão, pressão, temperatura e a curva de liberação de calor ao longo do ciclo. A simulação foca no comportamento do motor com diferentes proporções de etanol e hidrogênio.

Para simular o motor no programa Diesel RK[®], é necessário inserir os parâmetros característicos do motor e ajustá-los de modo que, ao executar a simulação, os resultados obtidos sejam comparáveis aos valores reais do motor. O processo de validação do *software* Diesel RK[®] é conduzido utilizando os dados fornecidos pelo fabricante, que estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do fabricante para validação do Diesel RK[®].

Motor	Buffalo BFDE 5.0
Relação de Compressão	20,5:1
Número de cilindros	1
Combustível	Diesel
Potência máxima a 3600 rpm	3,68 kW
Torque máximo	12,5 N.m
Diâmetro do cilindro	70 mm
Curso do pistão	57 mm

Fonte: Buffalo Motores (2025).

Com os dados devidamente inseridos no programa, inicia-se a etapa de avaliação do desempenho do motor operando com diesel. Essa análise tem como objetivo verificar o comportamento de parâmetros fundamentais, como torque, potência e consumo específico de combustível,

em função da rotação do motor. Para isso, os valores gerados pela simulação são comparados diretamente com os dados de referência fornecidos pelo fabricante. Assim, procura-se reproduzir de forma semelhante o desempenho do motor real.

Os resultados dessa análise estão sintetizados na Tabela 5, onde são explicitadas as variações entre os valores simulados e os valores de referência, em busca da confiabilidade do modelo antes da introdução dos combustíveis foco deste trabalho.

Tabela 5 – Comparação entre torque e potência real e simulada.

Rotação (rpm)	Torque (N.m)		Erro	Potência (kW)		Erro
	Real	Simulado		Real	Simulada	
1500	10,5	9,8321	6%	1,47	1,5443	-5%
2000	12,5	10,971	12%	2,06	2,2976	-12%
2500	12,5	11,164	11%	2,65	2,9226	-10%
3000	12,5	11,318	9%	3,31	3,5553	-7%
3500	12	10,681	11%	3,53	3,9145	-11%
3600	11,25	10,341	8%	3,68	3,8981	-6%

Fonte: Pesquisa direta 2025.

A precisão da simulação é avaliada por meio do cálculo do erro percentual, conforme a equação apresentada a seguir. Esse cálculo permite quantificar as diferenças entre os resultados obtidos na simulação e os valores experimentais do fabricante.

$$\text{Erro Percentual} = \frac{\text{TorqueReal} - \text{TorqueSimulado}}{\text{TorqueReal}} \times 100\% \quad (3.1)$$

O erro percentual encontrado variou entre $+/-12\%$, sendo que ambos os extremos ocorreram na rotação de 2000 rpm. Esse valor indica que, ao longo da curva de desempenho, os valores de torque apresentaram, em média, $9,5\%$ menores em todos os pontos, enquanto a potência, por ser inversamente proporcional ao torque em determinadas condições de operação, mostrou um aumento médio de $8,5\%$ ao longo dos pontos analisados. Para as condições de mínima e máxima rotação, o erro percentual é de 6% e 8% para o torque e 5% e 6% para a potência, o que sugere uma melhor precisão da simulação nesses pontos extremos.

O erro observado é da ordem de $+/-12\%$, valor que não compromete de forma crítica as análises subsequentes. A influência desse desvio sobre os valores de torque e potência é analisada e considerada compatível com os objetivos e a metodologia adotada na pesquisa. Desta forma, os resultados obtidos na simulação são considerados adequados para o propósito do estudo.

A Figura 23 apresenta as curvas de desempenho do motor, plotadas com base nos dados do fabricante e nos dados obtidos no programa de simulação.

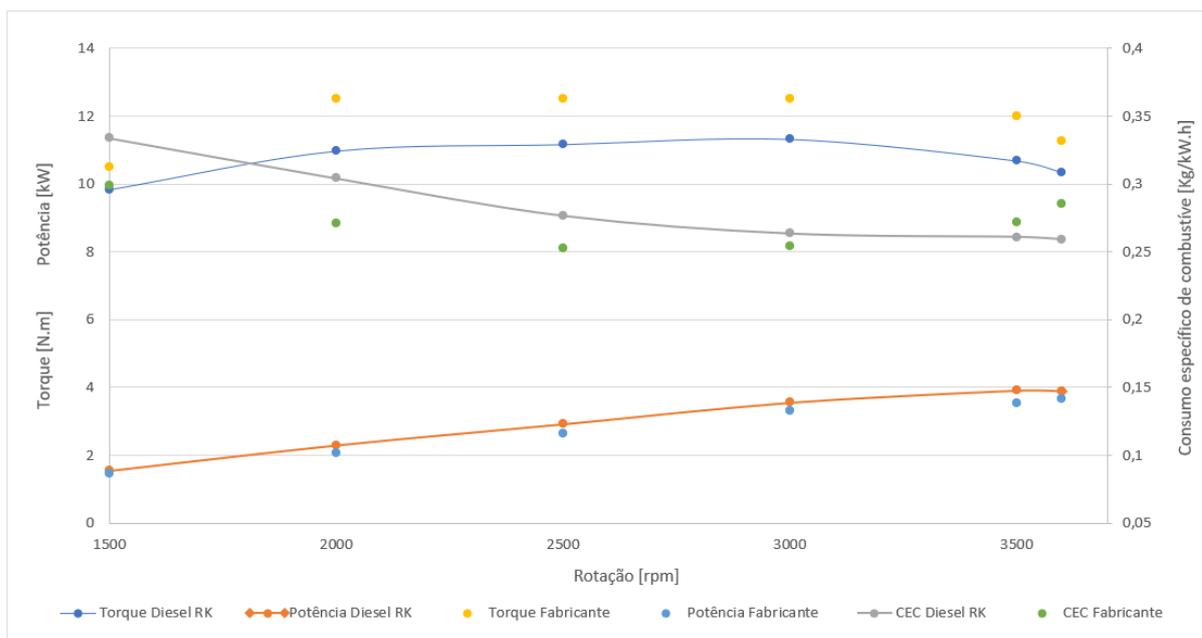


Figura 23 – Gráfico comparativo dos dados do fabricante com a curva de validação obtida no Diesel RK[®].
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Nessas curvas, observa-se uma tendência coerente na forma dos gráficos, com o maior desvio ocorrendo em 2000 rpm, conforme indicado anteriormente. Esse comportamento reforça a necessidade de uma análise crítica dos resultados, especialmente nos pontos com maior erro percentual.

A partir da análise inicial com Diesel RK[®], são definidos os métodos de trabalho para a simulação Ansys Fluent[®] e a posterior integração dos resultados. As etapas incluem:

- Avaliação termodinâmica e análise de desempenho utilizando o Diesel RK[®] para configurar diferentes condições de combustão e misturas de combustíveis.
- Realização de simulações para diferentes proporções de etanol e hidrogênio, avaliando a eficiência e o desempenho sob diversas condições operacionais do motor.

3.3 Condições de Contorno

Esta etapa, além de possibilitar a análise do desempenho do motor com os combustíveis, também é essencial para a coleta das condições de contorno essenciais para o processamento no Ansys Fluent[®]. Com esses dados, é possível avaliar o comportamento do escoamento, a distribuição de temperatura e pressão a uma dada velocidade inicial, contribuindo para uma melhor compreensão do processo de combustão e do desempenho do injetor.

Na simulação do motor de combustão interna com injeção dual de hidrogênio (H₂) e etanol (C₂H₅OH), diversas condições de contorno precisam ser definidas para garantir a consistência e a precisão dos resultados. Abaixo estão as condições relevantes para a simulação,

considerando os dados fornecidos e algumas estimativas. Essas condições são inseridas nas agulhas de injeção no *software* Ansys Fluent[®], que modela o comportamento dos fluidos dentro do sistema de injeção.

A temperatura de injeção é uma variável de grande importância para o processo de combustão, afetando a eficiência e a formação de emissões. Como a temperatura da pré-câmara é registrada diretamente nos resultados gerados pelo *software* Diesel RK[®], estimou-se esse valor para a temperatura de entrada do combustível.

A pressão de injeção é outra variável importante para a modelagem do processo de combustão; essa variável é registrada diretamente nos resultados gerados pelo *software* Diesel RK[®].

Além disso, a intensidade da turbulência nas agulhas de injeção é definida com um valor máximo de 10%, o que representa uma condição de alta intensidade turbulenta. Esse valor é utilizado para simular o comportamento do fluido durante a injeção, considerando que a turbulência influencia a mistura dos combustíveis, a formação de vapores e a eficiência de combustão.

As Tabelas 6 e 7 a seguir resumem as principais condições de contorno e parâmetros utilizados para a simulação, com base nas características fornecidas e estimativas realizadas.

Tabela 6 – Condições de Contorno para o Hidrogênio

Região	Tipo de Condição	Pressão (bar)	Temperatura (K)
Entrada de ar	<i>Inlet</i>	0,979	296,0
Injeção de combustível	<i>Outlet</i>	11070	-

Fonte: Pesquisa direta 2025.

Tabela 7 – Condições de Contorno para o Etanol

Região	Tipo de Condição	Pressão (bar)	Temperatura (K)
Entrada de ar	<i>Inlet</i>	0,9792	293,70
Injeção de combustível	<i>Outlet</i>	525,58	-

Fonte: Pesquisa direta 2025.

3.3.1 Considerações sobre o uso do Diesel RK[®]

A simulação realizada no *software* Diesel RK[®] permite uma análise detalhada dos efeitos da injeção *dual* de etanol e hidrogênio, além da obtenção de dados essenciais para a definição das condições de contorno na simulação fluidodinâmica.

É importante ressaltar que, embora esse método seja válido para uma avaliação geral da combustão, o programa considera a injeção dos combustíveis pelo modelo de *blended injection*.

Nesse modelo, assume-se que os combustíveis são previamente misturados e injetados como um único fluido homogêneo. Apesar dessa simplificação, esse parâmetro é considerado aceitável dentro do escopo da análise.

Além disso, o procedimento adotado permite avaliar a influência do hidrogênio em diferentes proporções, possibilitando uma investigação detalhada do impacto desse gás sobre parâmetros como torque, potência e consumo específico de combustível.

A convergência da simulação é monitorada por meio dos resíduos das equações governantes. O critério de convergência adotado é a redução dos resíduos abaixo de 10^{-4} , garantindo a estabilidade da solução. A simulação é conduzida até que todas as variáveis de interesse apresentassem um comportamento estável, assegurando um equilíbrio numérico adequado.

A solução numérica é conduzida utilizando o método baseado em pressão (*pressure-based solver*), adequado para escoamentos compressíveis e incompressíveis. É adotada uma formulação implícita, permitindo uma melhor resolução dos gradientes de pressão no domínio do fluido. Além disso, a discretização espacial utilizou esquemas de segunda ordem para garantir maior precisão na solução.

Os dados utilizados na simulação são extraídos das análises realizadas no Diesel RK[®] e aplicados como condições de contorno no Ansys Fluent[®], garantindo a consistência dos resultados.

A interação entre os resultados do Diesel RK[®] e do Ansys Fluent[®] é fundamental para o aprimoramento da simulação, pois a análise iterativa entre os dois programas permite ajustar as condições operacionais como taxa de injeção e parâmetros do injetor, até atingir uma configuração otimizada.

3.4 Variáveis e Indicadores

Gil (2017) infere que as variáveis são elementos fundamentais de qualquer pesquisa científica, pois são objetos de trabalho que podem ter seus valores ou classificações alterados. O mesmo autor também explica que as variáveis de entrada referem-se àquelas que são obtidas, medidas ou observadas no decorrer do estudo, enquanto as variáveis de saída correspondem ao retorno ou efeito que as variáveis de entrada produzem após um processo. Essa dinâmica entre variáveis de entrada e saída é importante para permitir o teste de hipóteses, como no presente trabalho, onde o comportamento de combustíveis alternativos é avaliado sob diferentes condições operacionais.

Na análise de desempenho de motores, variáveis como pressão, temperatura, taxa de injeção e proporções de mistura de combustíveis são consideradas variáveis de entrada que afetam diretamente o comportamento do sistema. Já as variáveis de saída, como torque, potência, eficiência térmica e emissões, são os resultados observáveis que derivam das condições iniciais impostas. Segundo Vergara (2016), a definição clara e objetiva dessas variáveis é essencial para

garantir a precisão na análise dos resultados e para que se possa validar as hipóteses levantadas no início da pesquisa.

Além das variáveis, o conceito de indicadores também desempenha um papel central na pesquisa científica. Para Walliman (2015), um indicador é uma medida ou variável capaz de avaliar um fenômeno de forma quantitativa ou qualitativa. Em pesquisas de natureza quantitativa, como simulações computacionais e análises de desempenho energético, os indicadores assumem um papel preponderante, pois eles permitem medir, de forma objetiva, o impacto de diferentes proporções de combustíveis no motor e, conseqüentemente, tomar decisões informadas sobre quais condições produzem o melhor desempenho.

A seleção de indicadores relevantes, conforme explica Vergara (2016), deve considerar sua capacidade de refletir os principais aspectos da hipótese testada. No contexto deste trabalho, indicadores como eficiência térmica, pressão, taxa de injeção e consumo de combustível são escolhidos por sua relevância para avaliar o desempenho de motores de combustão interna com misturas de etanol e hidrogênio. A partir dessas medidas, é possível identificar as configurações que otimizam a operação do motor, contribuindo para avanços na eficiência energética. Na Tabela 8 são indicadas as variáveis e indicadores que são abordados neste estudo.

Tabela 8 – Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Motor de combustão interna	Eficiência Térmica Torque Potência Consumo Específico de Combustível
Injetor <i>dual</i>	Pressão de Injeção Taxa de Injeção Momento de Injeção Duração da Injeção
Etanol e Hidrogênio	Proporção de Mistura Poder Calorífico Temperatura de Combustão

Fonte: Pesquisa direta 202.

De acordo com Vergara (2016), os instrumentos de coleta de dados são ferramentas importantes para o desenvolvimento de uma pesquisa, pois garantem a obtenção de informações necessárias para testar hipóteses ou responder questões centrais do estudo. Ela destaca que a escolha do instrumento deve estar diretamente ligada à natureza do problema investigado e à metodologia adotada. Os instrumentos devem permitir uma coleta de dados eficiente e sistemática, proporcionando resultados válidos e confiáveis. Assim, é explicitado na Tabela 9 os instrumentos, as vantagens e desvantagens do uso abordados neste estudo.

Tabela 9 – Instrumentos de coleta de dados, vantagens e desvantagens

Técnica de Coleta	Vantagens	Desvantagens
Simulação Computacional (Diesel RK® e Ansys Fluent®)	<ul style="list-style-type: none"> - Permite a análise detalhada de diferentes cenários operacionais - Requer menos recursos físicos (não há necessidade de protótipos) - Alta precisão na simulação de parâmetros térmicos e dinâmicos - Flexibilidade para testar várias proporções de combustíveis - Coleta automatizada de dados numéricos de desempenho 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige alta capacidade computacional - Resultados dependem fortemente da qualidade das malhas e das condições de contorno - Requer habilidades técnicas avançadas no uso dos <i>softwares</i> - Difícil generalização para motores fora dos parâmetros modelados

Fonte: Pesquisa direta 202.

3.5 Tabulação de Dados

Após a obtenção dos dados provenientes das simulações no *software* Diesel RK® e Ansys Fluent®, realiza-se a tabulação dos resultados no *Microsoft Excel*. Esses dados incluem parâmetros como pressão, temperatura, taxa de injeção e eficiência térmica do motor com diferentes proporções de etanol e hidrogênio. A utilização desses programas facilita a organização, filtragem e visualização dos dados, permitindo uma análise mais precisa e clara dos resultados, além de possibilitar a criação de gráficos comparativos que auxiliam na interpretação do desempenho do motor.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo tem o intuito de descrever os métodos e ferramentas adotados ao longo da pesquisa, desde a coleta de dados por meio de simulações até as técnicas de análise e tabulação. São apresentados os principais instrumentos de coleta, como os softwares Autodesk Inventor, Diesel RK® e Ansys Fluent®, além das metodologias empregadas para investigar o desempenho de um motor de combustão interna utilizando etanol e hidrogênio.

No capítulo seguinte, são discutidos os resultados das simulações realizadas, com o objetivo de analisar o comportamento do motor e as influências das variáveis estudadas, propondo, assim, soluções e conclusões baseadas nos dados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desempenho do motor com o Etanol

Após a definição dos parâmetros do motor e a finalização do processo de validação no *software* Diesel-RK, inicia-se a inclusão do etanol como um dos combustíveis a serem analisados. Dessa forma, o etanol é adicionado à biblioteca do *software*, uma vez que esse combustível não está disponível por padrão no programa.

Com o etanol devidamente inserido no modelo, procede-se à avaliação da relação de compressão que proporciona o melhor desempenho para esse combustível. Para isso, são analisadas diferentes relações de compressão, variando desde o valor de relação de compressão de 10:1 até 16:1, que foi o valor máximo de aumento da relação de compressão que a configuração do motor permite com este combustível.

Além disso, são examinadas as curvas de torque (Figura 24), potência (Figura 25) e consumo específico de combustível (Figura 26) em função do regime de rotação (rpm), a fim de identificar a condição mais favorável para o funcionamento do motor com etanol.

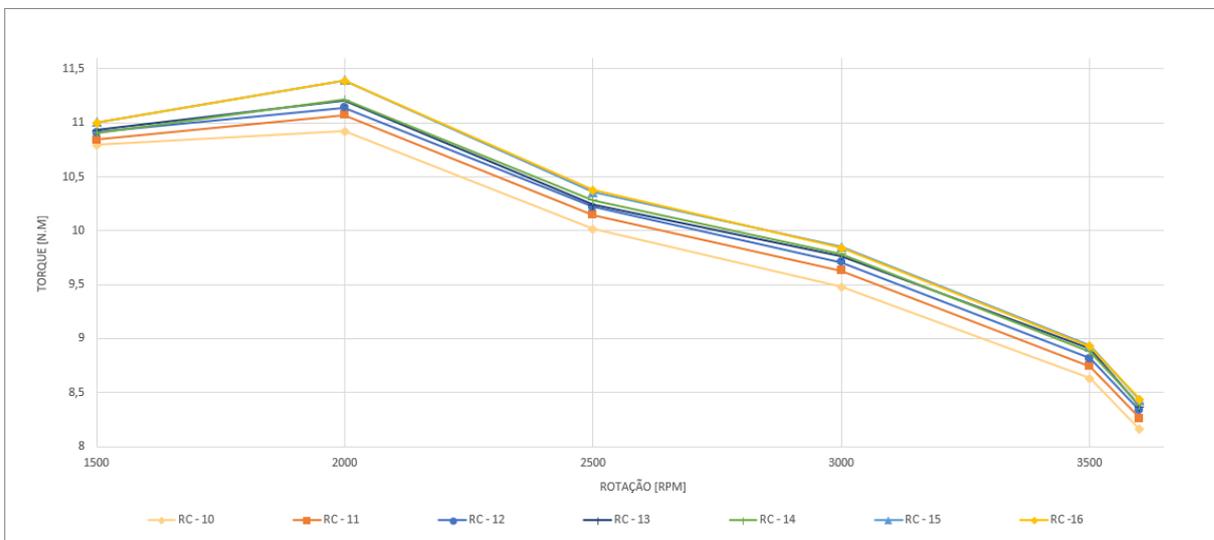


Figura 24 – Resultados da variação da relação de compressão no torque do motor usando etanol como combustível. Fonte: Pesquisa direta (2025).

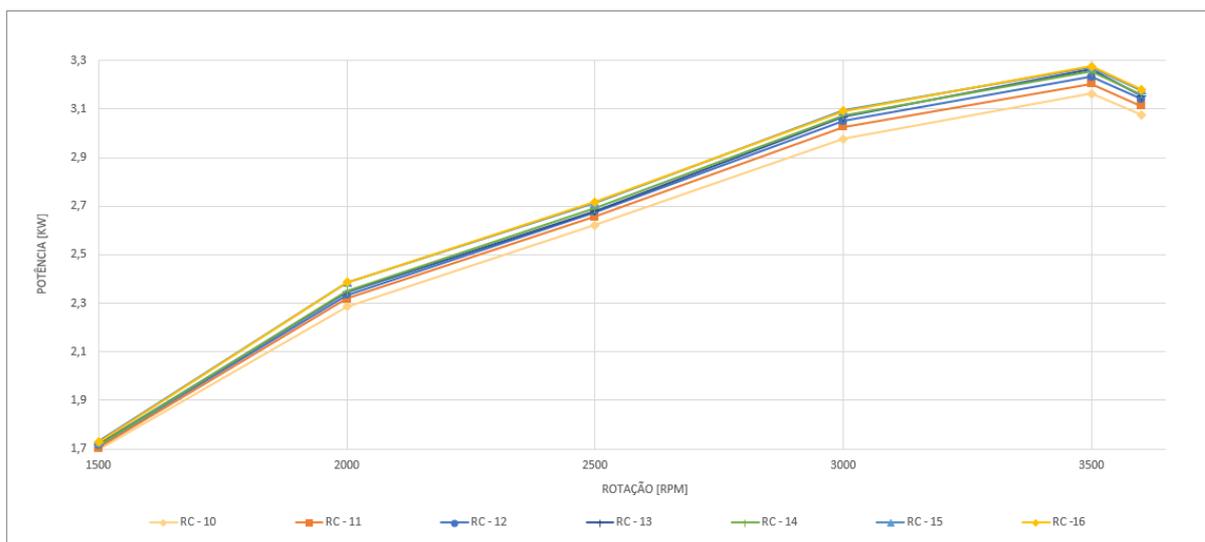


Figura 25 – Resultados da variação da relação de compressão na potência do motor usando etanol como combustível.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

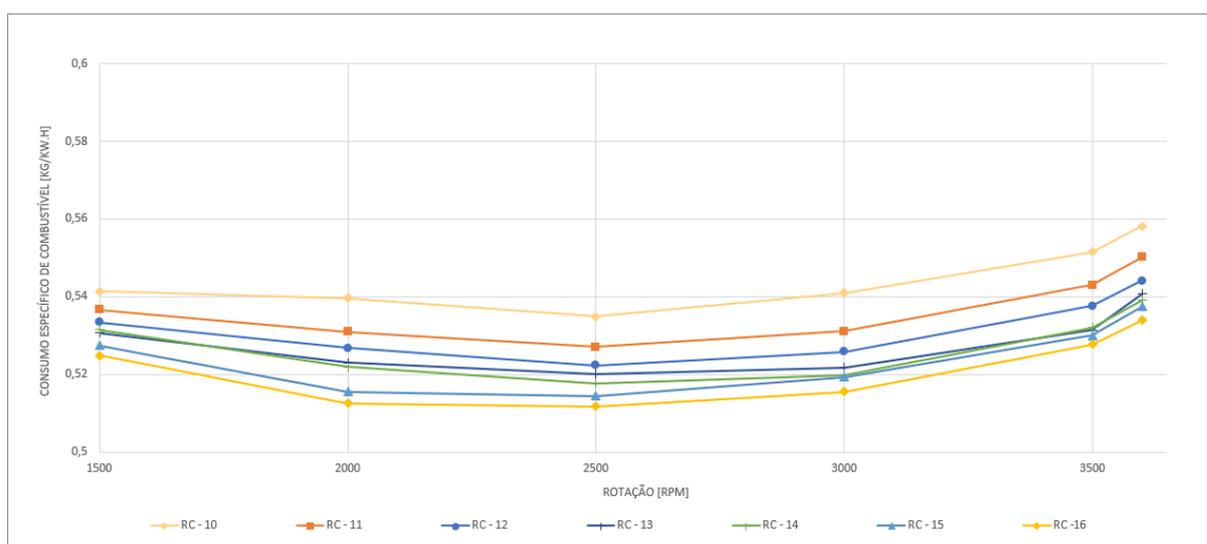


Figura 26 – Resultados da variação da relação de compressão no consumo específico de combustível do motor usando etanol como combustível.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Os resultados obtidos demonstram que o melhor desempenho ocorre com a razão de compressão de 16:1 em todas as situações avaliadas; isso provavelmente ocorre porque, nesse ponto, a temperatura é suficiente para garantir uma combustão mais eficiente do etanol, reduzindo atrasos na ignição e melhorando a conversão de energia térmica em trabalho mecânico.

Com base nessa conclusão, as simulações envolvendo hidrogênio são realizadas adotando essa mesma relação de compressão (16:1), de modo a avaliar quais parâmetros podem ser otimizados.

Na etapa seguinte, diferentes frações de hidrogênio são adicionadas ao sistema para investigar o efeito desse combustível no desempenho do motor. São analisadas suas influên-

cias tanto em proporções elevadas quanto reduzidas, buscando compreender seu impacto no desempenho geral e na eficiência energética do motor.

4.2 Adição de hidrogênio

A última etapa da simulação no Diesel RK[®] consiste na adição do hidrogênio ao modelo no *software*. Para essa análise, é adotada uma estratégia de inserção gradual do gás, permitindo avaliar de forma progressiva a resposta do motor à introdução desse combustível.

Inicialmente, é realizada a injeção de uma fração de 5% de hidrogênio na mistura, seguida de incrementos sucessivos de 5% até atingir o limite de 30% de H_2 no etanol, operando na razão de compressão de 16:1. A seguir, nas Figuras 27, 28 e 29 são trazidos os gráficos com as curvas de adição de hidrogênio, bem como a curva só com etanol, para que seja possível a comparação direta do efeito da adição do gás.

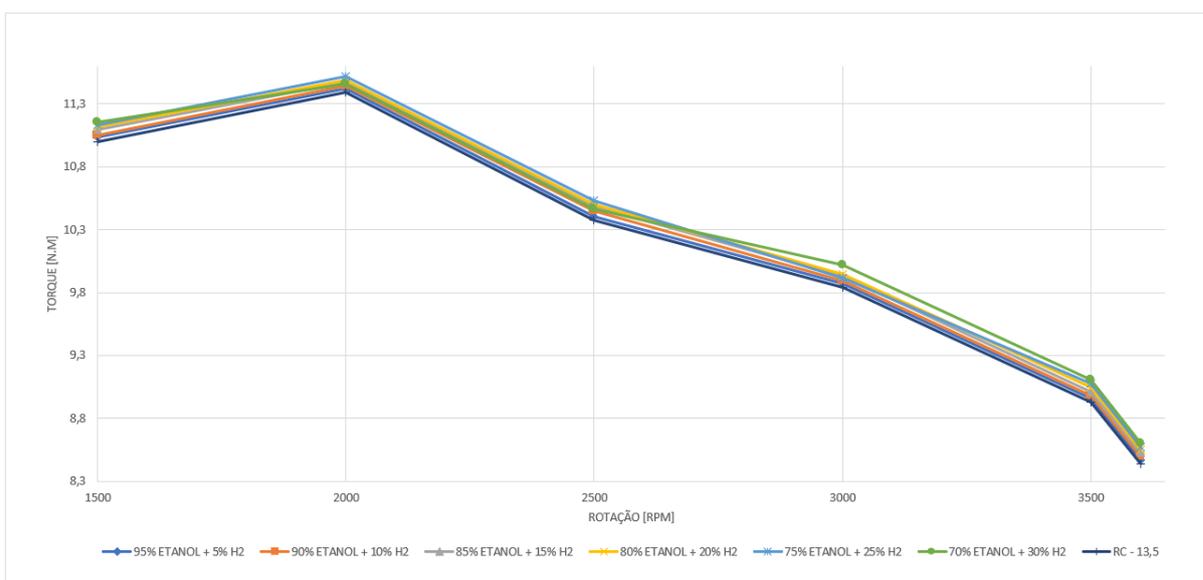


Figura 27 – Resultado da adição de hidrogênio no torque.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

No gráfico da Figura 27 é possível inferir que o torque aumenta inicialmente com a rotação do motor, atingindo um pico por volta de 2000 rpm, seguido de uma queda progressiva até 3600 rpm.

A mistura com maior proporção de hidrogênio (70% etanol + 30% H_2) apresenta valores de torque maiores, cerca de 2% em comparação com as misturas com menor teor de hidrogênio. A análise da Figura 27 demonstra que a adição de hidrogênio ao etanol impacta positivamente o torque em praticamente todas as rotações analisadas, sendo esse efeito mais perceptível em rotações mais baixas, como em 2000 rpm. Esse comportamento pode ser atribuído às propriedades específicas do hidrogênio, que possui uma velocidade de chama mais alta e menor energia mínima de ignição, assim contribuindo para a combustão mais eficiente, principalmente em baixas rotações.

A Figura 28 mostra os resultados da potência para a adição de H_2 no motor.

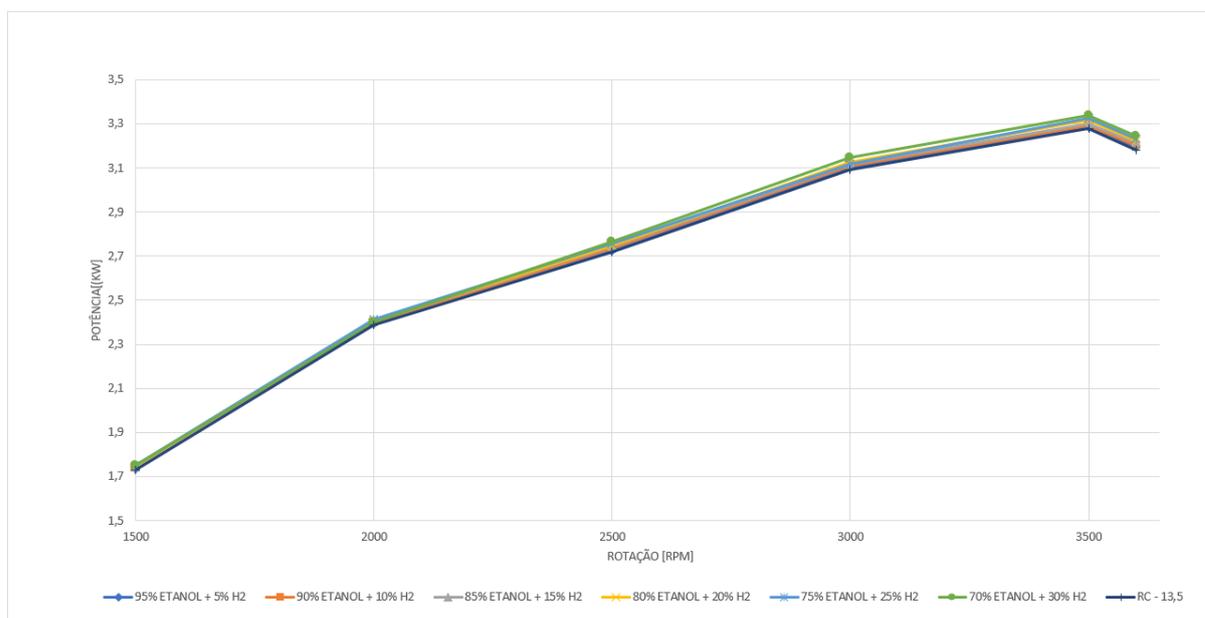


Figura 28 – Resultado da adição de hidrogênio na potência.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

De acordo com a Figura 28 a potência aumenta linearmente com o aumento da rotação até aproximadamente 3500 rpm, onde as curvas começam a se estabilizar. Esse comportamento é esperado, pois a potência depende diretamente do torque e da rotação, seguindo a relação na equação (2.4). A Figura 29 mostra os resultados do consumo de combustível com a adição de hidrogênio no motor.

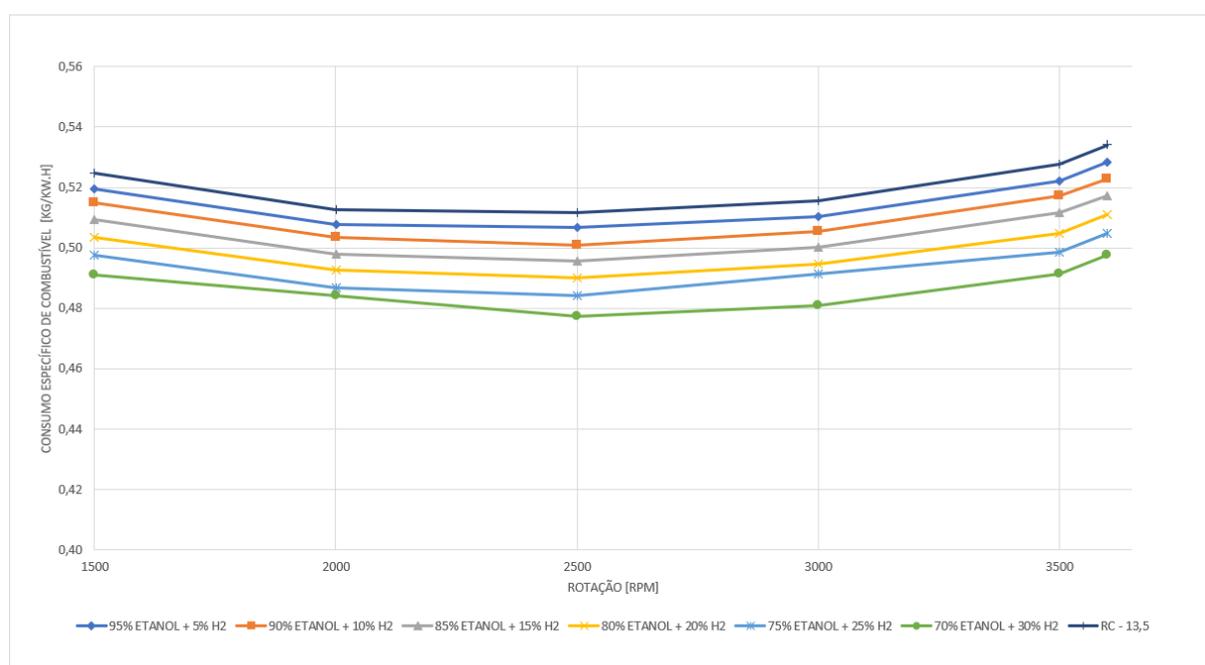


Figura 29 – Resultados da adição de hidrogênio no consumo específico de combustível.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Os resultados da análise do consumo específico de combustível indicam que, à medida que o teor de hidrogênio aumenta na mistura, o consumo específico de combustível tende a diminuir. Isso sugere que a adição de hidrogênio melhora a eficiência da combustão, reduzindo a quantidade de combustível necessária para gerar a mesma potência, o que implica também na redução de emissões de NOx. A curva da mistura 70% etanol + 30% H_2 apresenta os menores valores de consumo específico de combustível, cerca de 6%, indicando um melhor aproveitamento energético.

4.3 Pós processamento das malhas

Nesta seção, são apresentados os resultados da simulação do injetor *dual* e sua relação com a análise do desempenho do motor no Diesel RK[®]. O foco está na avaliação dos perfis de temperatura, velocidade, pressão e turbulência, permitindo compreender como os combustíveis etanol e hidrogênio interagem dentro do injetor e quais impactos isso pode ter na combustão e eficiência do motor, pois esses fatores influenciam diretamente a atomização, mistura ar-combustível e a formação da chama.

Como proposto inicialmente, é realizada a simulação com ambas as malhas para avaliar sua convergência matemática, o que é verificado quando a primeira malha da agulha de injeção de hidrogênio converge em 60 iterações e a segunda em 79 iterações, enquanto a malha da agulha de injeção de etanol converge inicialmente em 58 iterações e a segunda malha mais refinada em 67 iterações. Essa validação reforça a confiabilidade dos resultados obtidos. Assim, em sequência, são trazidos os resultados para a simulação da segunda malha.

A Figura 30 mostra a distribuição de temperatura nas agulhas de hidrogênio (esquerda) e etanol (direita). A distribuição da temperatura dentro do injetor impacta diretamente a vaporização do combustível e a formação da mistura ar-combustível.

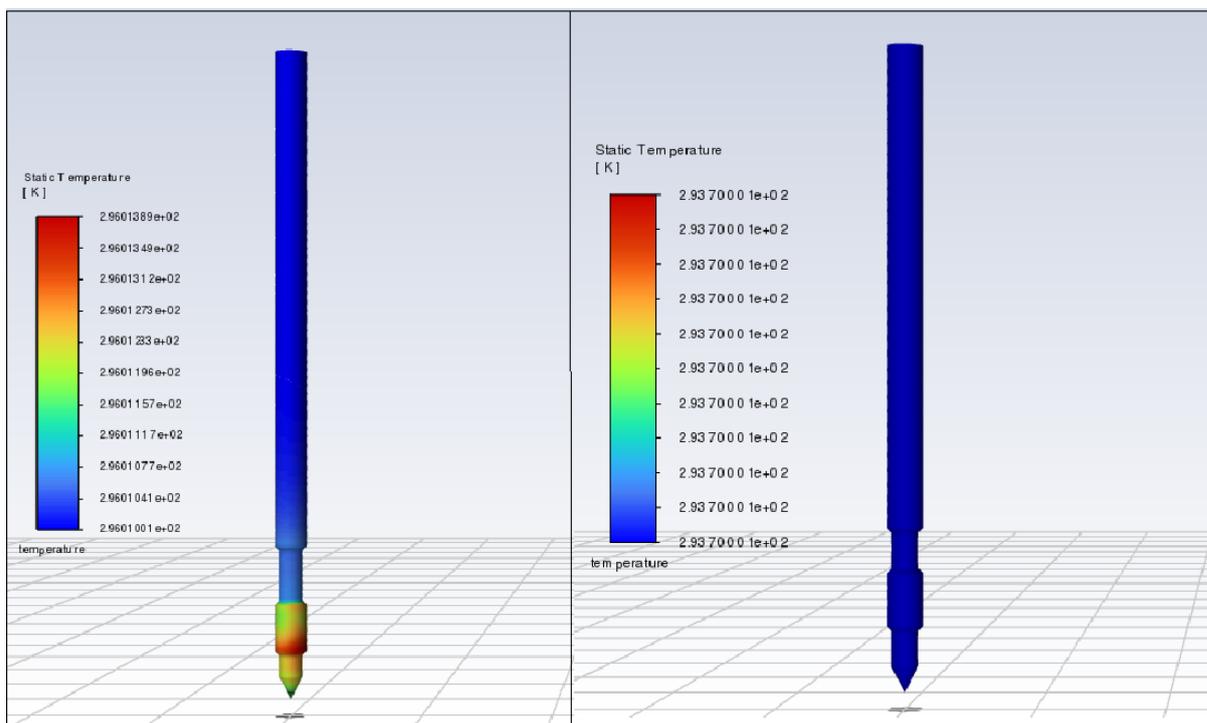


Figura 30 – Distribuição de temperatura ao longo das agulhas de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita).

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Assim, devido à consideração de que é um sistema com pouca troca térmica entre as paredes da agulha e outros componentes do injetor, há uma mínima variação de temperatura ao longo da agulha de injeção de hidrogênio, menos de 0,1%, ao passo que, na agulha de injeção de etanol, o fluido aparenta ter permanecido com a mesma temperatura de entrada ao longo do escoamento. A análise dessa diferença é importante para ajustar a temporização e o controle da injeção para cada combustível.

As variações de pressão dentro do injetor determinam a eficiência da injeção e a capacidade do combustível de se dispersar adequadamente. Na Figura 31 é mostrada a distribuição de pressão ao longo das agulhas de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita).

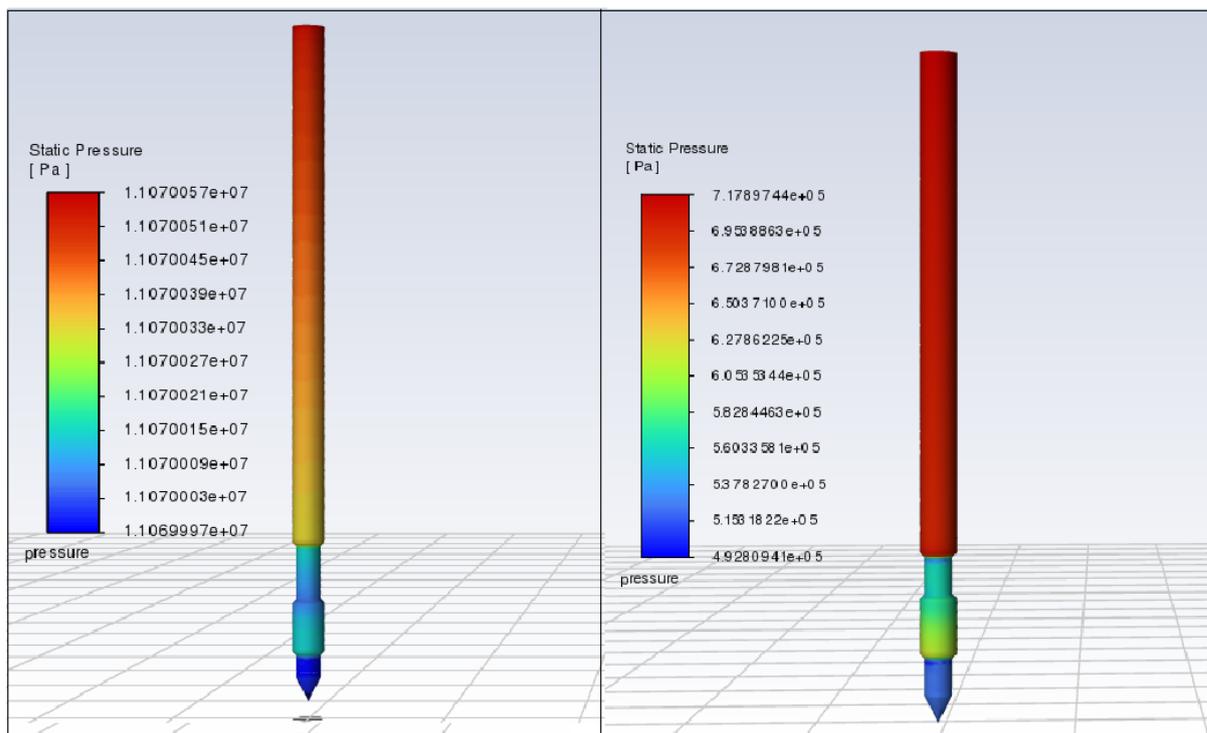


Figura 31 – Distribuição de pressão ao longo da agulha de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita).
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Nesta situação, é visível a variação de 31,4% na pressão do etanol, onde na região de diminuição do diâmetro há uma diminuição da pressão e, conseqüentemente, aumento da velocidade do escoamento. É visível uma queda na pressão nessa região. Já na agulha de injeção de hidrogênio, é perceptível uma variação máxima de 0,0005% na pressão.

Na Figura 32 têm-se os vetores de velocidade dos combustíveis. A velocidade do escoamento influencia a atomização e a mistura do combustível com o ar.

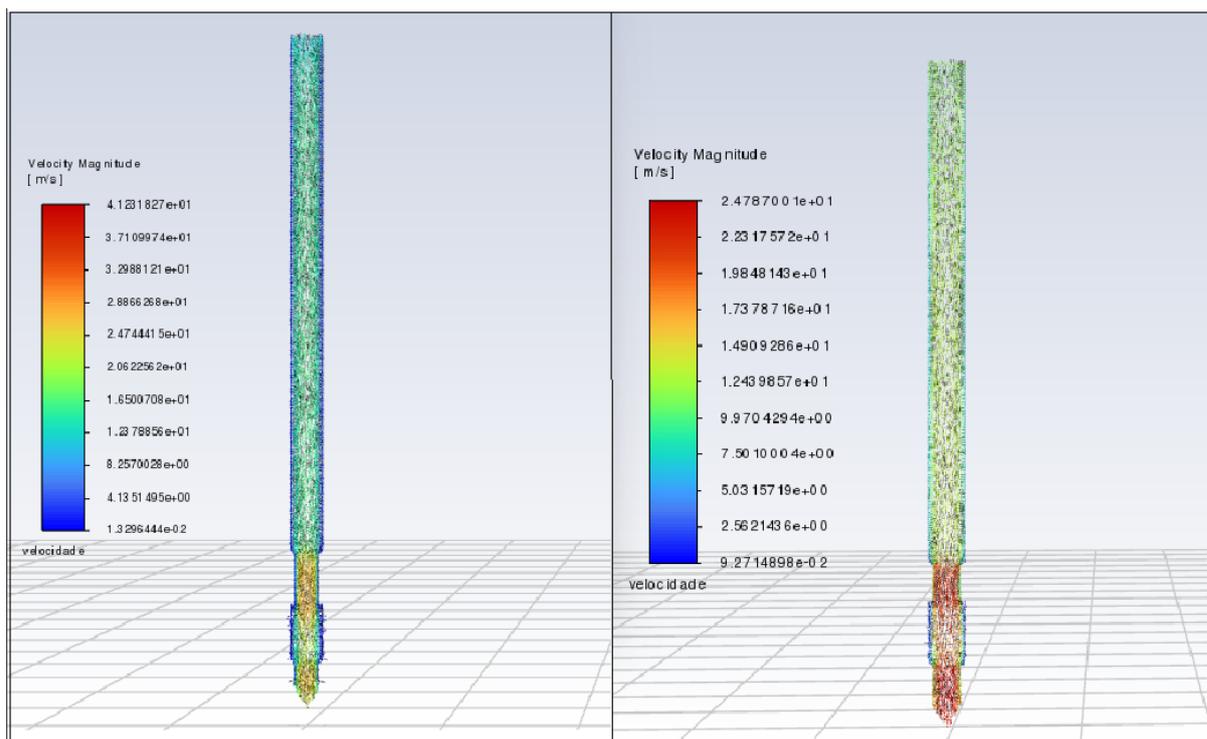


Figura 32 – Vetores de velocidade do fluido ao longo da agulha de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita).

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Nesta situação, é feito o cálculo da média aritmética da velocidade na saída da agulha e é obtido o valor de aproximadamente $19,74 \text{ m/s}$ para o hidrogênio e $20,21 \text{ m/s}$ para o etanol.

Já na Figura 33 são obtidos os vetores de turbulência do fluxo. A turbulência influencia a mistura e a propagação da chama dentro do motor. O hidrogênio apresenta níveis mais elevados de turbulência, o que pode favorecer a combustão em alta carga e melhorar a eficiência térmica. No entanto, níveis excessivos de turbulência podem dificultar o controle da combustão e gerar instabilidades. O etanol, por outro lado, mostra um padrão de turbulência mais moderado, presente na saída da agulha, favorecendo uma combustão mais controlada e previsível. É perceptível que a restrição na geometria causa diversos efeitos no fluxo contínuo do etanol, mas no caso do hidrogênio, a turbulência é maior na entrada do fluido, mas, após isso, ela se estabiliza.

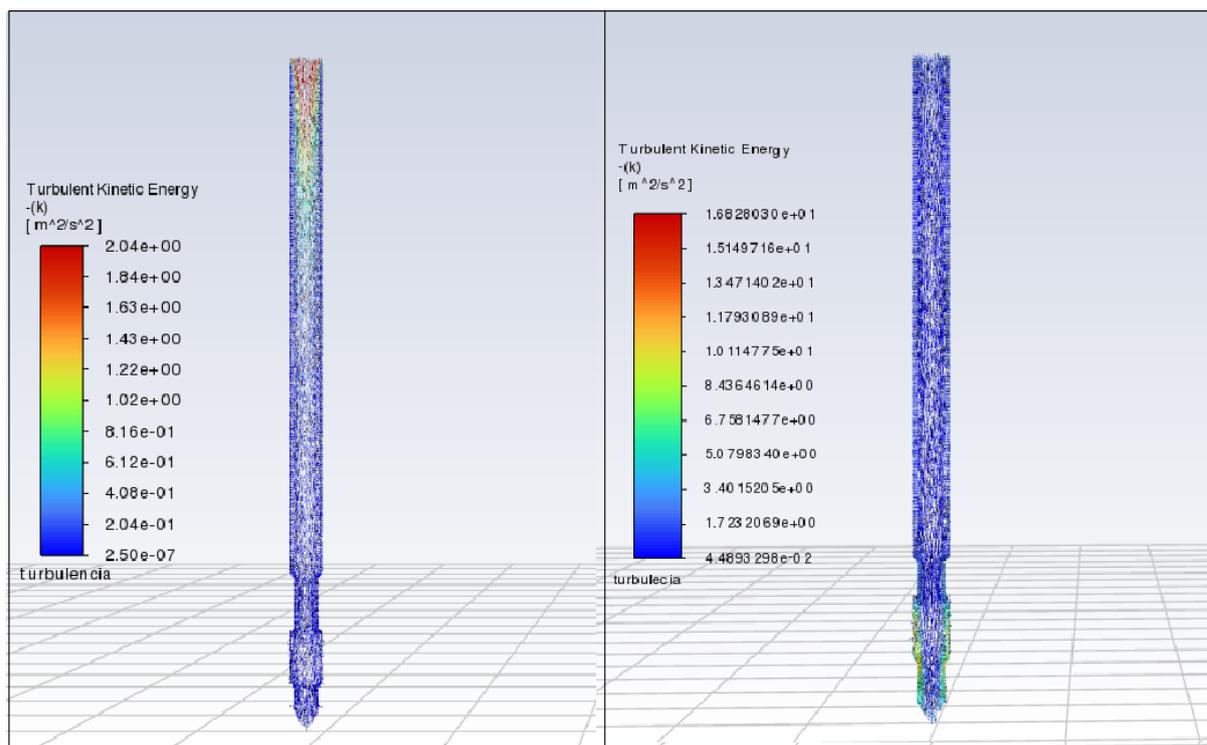


Figura 33 – Vetores de turbulência do fluxo ao longo da agulha de injeção de hidrogênio (esquerda) e de etanol (direita).

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Com o intuito de ter maior precisão da análise, é criado um monitor da temperatura na saída do injetor, para avaliar se o resultado estava convergindo e se estabilizando. No Apêndice A, tem-se as Figuras 36 e 37, em que mostram graficamente o valor da temperatura se estabilizando em 296,011 K para o hidrogênio e 293,7 K para o etanol. Além disso, também há a preocupação se os valores são consistentes, então são gerados gráficos para monitorar a convergência dos cálculos. Estes estão presentes nas Figuras 40 e 41 do Apêndice A.

Para avaliar se, com os resultados obtidos contém o risco de ondas de choque que prejudiquem o motor, é feita a análise do número de Mach, considerando as temperaturas e velocidades na saída das agulhas de injeção.

O número de Mach (M) é definido como:

$$M = \frac{v}{c} \quad (4.1)$$

Em que v é a velocidade do fluido e c é a velocidade do som, dada por:

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (4.2)$$

Cálculo para o hidrogênio:

$$\gamma = 1,41$$

$$R = 4124 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$T = 296,011 \text{ K}$$

$$v = 19,74 \text{ m/s}$$

Cálculo da velocidade do som:

$$c_H = \sqrt{(1,41)(4124)(296,011)} \quad (4.3)$$

$$M_H = \frac{19,74}{c_H} = 0,015 \quad (4.4)$$

Cálculo para o etanol:

$$\gamma = 1,13$$

$$R = 268 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$T = 293,7 \text{ K}$$

$$v = 20,21 \text{ m/s}$$

Cálculo da velocidade do som:

$$c_E = \sqrt{(1,13)(268)(293,7)} \quad (4.5)$$

$$M_E = \frac{20,21}{c_E} = 0,068 \quad (4.6)$$

Os valores obtidos para o número de Mach indicam que ambos os combustíveis operam em regime subsônico, estando ambos abaixo de 1. Isso significa que a injeção ocorre sem a formação de ondas de choque, uma vez que essas estruturas só aparecem em fluxos supersônicos ou transônicos. Além disso, como os valores de Mach são bem inferiores a 0,3, os efeitos da compressibilidade são desprezíveis, permitindo que o fluxo seja tratado como incompressível. Dessa forma, a dispersão e a mistura do combustível com o ar são dominadas principalmente por fenômenos de turbulência e interação aerodinâmica, em vez de efeitos de choque ou variações significativas na densidade. No entanto, a atomização e a distribuição do combustível ainda podem ser influenciadas pela velocidade do jato e pelas condições do escoamento ao redor do injetor, aspectos fundamentais para garantir uma combustão eficiente e homogênea.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo responder à questão de como avaliar computacionalmente um sistema de injeção dual etanol-hidrogênio, disponível para um motor de combustão interna de ignição por compressão. Para isso, é adotada uma abordagem baseada em simulação computacional, utilizando três *softwares* distintos: Autodesk Inventor, Diesel RK[®] e Ansys Fluent[®], permitindo uma análise detalhada da dinâmica dos fluidos na injeção e seus efeitos no motor.

A modelagem da geometria do injetor é realizada no Autodesk Inventor, possibilitando a criação de um modelo do sistema de injeção *dual*. Durante o desenvolvimento do estudo, opta-se por uma configuração de injeção paralela, decisão influenciada pelas limitações do *software* Diesel RK[®], para que a modelagem seja compatível com sua abordagem de cálculo. Assim, essa configuração permite a análise da influência do hidrogênio na combustão de maneira mais realista dentro das restrições da ferramenta.

Com o Diesel RK[®], além de avaliar o impacto da adição de hidrogênio ao etanol no desempenho do motor, também são obtidas as condições de contorno para a simulação fluidodinâmica computacional, incluindo pressão, velocidade e temperatura dos combustíveis no momento da injeção. Essas condições são fundamentais para a simulação no Ansys Fluent[®], onde é realizada a análise detalhada do escoamento dentro do injetor. A partir dessas simulações, é possível obter perfis de pressão, velocidade, turbulência e temperatura dos fluidos, permitindo a avaliação do comportamento do hidrogênio e do etanol ao longo do sistema de injeção.

Os resultados indicam que a adição de hidrogênio ao etanol contribui para a melhora no desempenho do motor, com a melhora de 2% no torque, 2% na potência e 6% no consumo específico de combustível na proporção de 30% de hidrogênio. Entretanto, devido a desafios operacionais e de segurança, a aplicação prática dessa tecnologia provavelmente demandaria proporções menores de hidrogênio na mistura. Além disso, observa-se que a região de transição do diâmetro do injetor provoca uma queda de pressão acompanhada por um aumento na velocidade do fluido, fenômeno que pode afetar a atomização do combustível e a eficiência da combustão no cilindro. A análise desse fenômeno é essencial para o refinamento do projeto do injetor *dual* e para uma melhor compreensão do comportamento da mistura combustível dentro do motor.

A validação do modelo numérico é realizada por meio da análise de independência de malha, garantindo que os resultados obtidos não são influenciados pela discretização espacial. Observa-se que ambas as malhas testadas apresentam convergência satisfatória, reforçando a confiabilidade das simulações realizadas. A análise dos perfis de escoamento no injetor *dual* demonstrou que o comportamento dos combustíveis tem impacto direto na combustão e no desempenho do motor.

Apesar das contribuições deste estudo, algumas limitações são identificadas. O alto custo computacional das simulações impacta diretamente o tempo de processamento e exige algumas simplificações na modelagem.

Por fim, este trabalho contribui para o avanço no entendimento do funcionamento de injetores *dual fuel* operando com etanol e hidrogênio, fornecendo dados essenciais para o aprimoramento do projeto e para a avaliação da segurança e viabilidade dessa tecnologia em aplicações práticas.

Trabalhos futuros

- Otimização e simulação da geometria completa do injetor, considerando efeitos de atomização e mistura na câmara de combustão;
- Análise da durabilidade dos componentes em contato com o hidrogênio, considerando fenômenos como fragilização por hidrogênio e corrosão;
- Validação experimental dos valores obtidos na simulação, por meio de testes com protótipos e medições dos parâmetros analisados.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1995. Citado na página 18.
- ANSYS Inc. *ANSYS Fluent User's Guide*. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.ansys.com>. Acesso em: 24 fev. 2025. Citado na página 19.
- AUTODESK-INC. *Autodesk Inventor*. 2025. Acesso em: 27 fev. 2025. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>. Citado na página 21.
- AUTOESPORTE. [S.l.]: o.globo, 2019. Citado 2 vezes nas páginas iii e 15.
- BABBIE, E. R. *The Basics of Social Research*. 7th. ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2016. Citado na página 23.
- BALAT, M.; BALAT, H. Global bioethanol production and utilization trends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2008. Taylor & Francis, v. 30, n. 6, p. 548–564, 2008. Citado na página 10.
- BLAZEK, J. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. [S.l.]: Elsevier, 2001. Citado na página 18.
- BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. *Qualitative Research for Education: An Introduction to Theory and Methods*. Boston: Allyn and Bacon, 1994. Citado na página 23.
- BOSCH, R. *Diesel-Engine Management*. Berlin, Germany: Springer, 2014. Citado na página 14.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna – Volume 1*. 1. ed. São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012. 1ª reimpressão – 2013. Citado 4 vezes nas páginas iii, 5, 6 e 8.
- Buffalo Motores. *Buffalo Motores - Motores a Combustão e Equipamentos*. 2025. Acesso em: 22 fev. 2025. Disponível em: <https://buffalo.com.br>. Citado na página 33.
- CGEE. *Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários: hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025*. Brasília, Brasil: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2010. Disponível em: <https://www.cgEE.org.br>. Citado na página 3.
- CRESWELL, J. W. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. 4th. ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- DIESEL, R. *Theory and Construction of a Rational Heat Motor*. [S.l.]: Springer, 1893. Citado na página 1.
- FERGUSON, C. R. *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*. New York, NY: John Wiley & Sons, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 7, 8 e 9.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer, 2002. Citado na página 18.

- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. [S.l.]: Springer, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- FREIRE, P. *Educação e Mudança*. Rio de Janeiro, Brasil: Paz e Terra, 1987. Citado na página 24.
- GANSER, H. P. Common rail fuel injection systems for passenger car diesel engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1998. v. 120, n. 3, p. 496–503, 1998. Citado na página 14.
- GIL, A. C. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. 7^a. ed. São Paulo, Brasil: Atlas, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 37.
- GLASSMAN, I.; YETTER, R. A. *Combustion*. 4th. ed. [S.l.]: Academic Press, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 10, 11, 12 e 13.
- GUZZELLA, L.; ONDER, C. H. *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Berlin, Germany: Springer, 2010. Citado na página 14.
- HEYWOOD, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1st. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1988. Citado 9 vezes nas páginas 1, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 16.
- HUANG, H. W. Z.; ZHENG, B. Combustion characteristics and no emissions of a hydrogen-enriched gasoline engine under different excess air ratio and spark timing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010. v. 35, n. 9, p. 4652–4660, 2010. Citado na página 17.
- JAMROZIK, R. T. A.; KOCISZEWSKI, A. Effect of hydrogen addition on combustion process and emissions characteristics of a dual-fuel spark-ignition engine at full load. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. v. 43, n. 35, p. 16998–17006, 2018. Citado na página 17.
- KUMAR, V. *Fundamentals of Engine Design*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018. Citado 3 vezes nas páginas iii, 6 e 22.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. *Fundamentos de Metodologia Científica*. 8^a. ed. São Paulo, Brasil: Atlas, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- LAPUERTA, M.; RODRIGUEZ-FERNANDEZ, J.; AGUDELO, J. R. Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel. *Bioresource Technology*, 2008. Elsevier, v. 99, p. 731–740, 2008. Citado na página 11.
- LEFEBVRE, A. H.; BALLAL, D. R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010. Citado na página 16.
- LÉON, A. *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. Citado na página 12.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994. American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994. Citado na página 20.
- MOIN, P.; KIM, J. Numerical simulation of turbulent flows. *Annual review of fluid mechanics*, 1991. Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 23, n. 1, p. 225–256, 1991. Citado na página 18.

NAJAFI, G. et al. Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network. *Applied Energy*, 2009. v. 86, n. 5, p. 630–639, 2009. Citado na página 11.

OTTO, N. *Desenvolvimento do motor de quatro tempos*. 1876. Alemanha. Invenção histórica documentada. Citado na página 1.

PARK, S. W.; KIM, S. H.; KIM, K. Spray characteristics of high-pressure gasoline injectors. *International Journal of Automotive Technology*, 2015. v. 16, n. 3, p. 495–504, 2015. Citado na página 16.

PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. Citado na página 19.

PLöCHL, M.; EDELBAUER, W. Numerical simulation of multiple injection processes in dual-fuel engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018. v. 140, n. 3, p. 032803, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.

PULKRABEK, W. W. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 7, 9 e 10.

RAMSAY, C.; DINESH, K. R. Numerical modelling of a heavy-duty diesel-hydrogen dual-fuel engine with late high pressure hydrogen direct injection and diesel pilot. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024. v. 49, p. 674–696, 2024. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923045846>>. Citado na página 13.

RIBEIRO, C. A. M. L. F.; BRAGA, S. L. Ethanol use in a gasoline direct injection spark ignition engine: A case study. *Fuel*, 2016. v. 182, p. 54–63, 2016. Citado na página 16.

RICARDO, H. *The Internal Combustion Engine*. London: Blackie and Son Limited, 1923. Citado na página 7.

RICHARDSON, R. J. *Pesquisa Social - Métodos e Técnicas*. 4ª. ed. São Paulo, Brasil: Editora Atlas Ltda, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

SAGAUT, P. *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. Citado na página 18.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. *Metodologia de Pesquisa*. 5ª. ed. RS, Brasil: McGraw-Hill, 2013. Citado na página 23.

SANTOS, M. A.; OLIVEIRA, A. A. M.; OLIVEIRA, M. F. *Injetores centrífugos duais e jato-centrífugos para aplicação em motores de combustão interna*. [S.l.], 2014. Acessado em: 17 de dezembro de 2024. Disponível em: <<https://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2014/02.07.19.42/doc/publicacao.pdf>>. Citado na página 16.

SARAVANAN, N.; NAGARAJAN, G. An experimental investigation of hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique. *International Journal of Energy Research*, 2018. v. 42, n. 8, p. 2587–2599, 2018. Citado na página 17.

- SCHAMEL, A. et al. Dual-fuel gasoline-ethanol injection for improved engine performance. In: *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development*. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2013. p. 317–349. Citado na página 2.
- SMITH, J. Crankshaft design in modern engines. *International Journal of Engine Research*, 2017. v. 19, n. 3, p. 210–225, 2017. Citado na página 7.
- SMITH, J. The role of simulation software in engineering design. *Engineering Journal*, 2020. Springer, v. 25, n. 3, p. 123–135, 2020. Citado na página 2.
- STONE, R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. London, UK: Palgrave Macmillan, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 7, 10, 11, 14 e 16.
- TAYLOR, C. F. *The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice, Vol. 1: Thermodynamics, Fluid Flow, Performance*. 2nd. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1985. ISBN 978-0262700276. Citado na página 10.
- THIOLLENT, M. *Metodologia da Pesquisa-Ação*. 18^a. ed. São Paulo, Brasil: Cortez Editora, 2011. Citado na página 24.
- THOMPSON, A. Innovations in crankshaft technology. *Journal of Automotive Engineering*, 2020. v. 22, n. 7, p. 540–555, 2020. Citado na página 7.
- THOMPSON, J. F.; WARSI, Z. U.; MASTIN, C. W. *Numerical grid generation: foundations and applications*. [S.l.]: Elsevier, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- TRUSCA, B. *High pressure direct injection of natural gas and hydrogen fuel in a diesel engine*. Tese (Doutorado) — University of British Columbia, 2001. Disponível em: <<https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/831/items/1.0089902>>. Citado 2 vezes nas páginas iii e 15.
- URNS, S. R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.
- VERGARA, S. C. *Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração*. São Paulo: Atlas, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 12, 37 e 38.
- VERHELST, S.; WALLNER, T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009. Elsevier, v. 35, p. 490–527, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- WALLIMAN, N. *Social Research Methods: The Essentials*. London: SAGE Publications, 2015. Citado na página 38.
- WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. [S.l.]: DCW industries La Canada, CA, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- YIN, R. K. *Case Study Research and Applications: Design and Methods*. 6th. ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2017. Citado na página 24.
- YIP, H. L. et al. A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion. *Applied Sciences*, 2019. v. 9, p. 4842, 11 2019. Citado 2 vezes nas páginas iii e 17.

APÊNDICE A – MÉTRICAS DE ANÁLISE DE QUALIDADE DE MALHA

Skewness

O *Skewness* pode ser calculado comparando a geometria real do elemento com a sua forma idealizada. Uma das formas comuns de definição matemática é:

$$\text{Skewness} = \frac{A_{\text{elemento}}}{A_{\text{ideal}}} \quad (\text{A.1})$$

Em que A_{elemento} representa a área do elemento deformado e A_{ideal} é a área do elemento de referência com a forma ideal (por exemplo, um quadrado ou hexágono perfeito). A interpretação dos valores de *Skewness* geralmente segue a seguinte classificação:

Tabela 10 – Classificação da qualidade da malha pelo *Skewness*.

Skewness	Qualidade do Elemento
0	Perfeito
< 0.5	Excelente
0.5 – 0.8	Aceitável
0.8 – 0.9	Ruim
> 0.9	Inaceitável

Fonte: Pesquisa direta 2025.

Orthogonal Quality

A métrica pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{Qualidade Ortogonal} = \frac{(S_{\min})^2}{A_{\text{elemento}}} \quad (\text{A.2})$$

Onde S_{\min} é a menor distância entre os centros de cada face do elemento e A_{elemento} é a área do elemento.

A interpretação da *Orthogonal Quality* é baseada nos seguintes valores:

Tabela 11 – Classificação da qualidade da malha pela *Orthogonal Quality*

Orthogonal Quality	Qualidade do Elemento
1	Perfeito
> 0.7	Excelente
0.4 – 0.7	Aceitável
0.1 – 0.4	Ruim
< 0.1	Inaceitável

Fonte: Pesquisa direta 2025.

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE CONVERGÊNCIA DOS CÁLCULOS

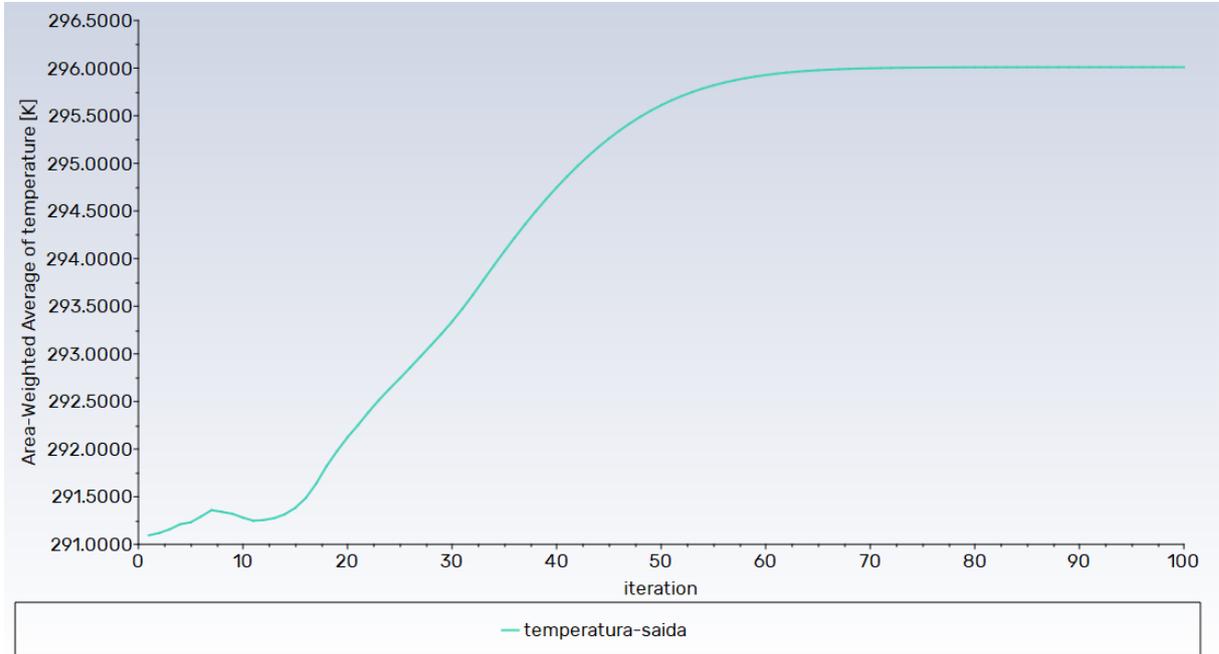


Figura 34 – Análise física da convergência da temperatura na saída da agulha de injeção de hidrogênio - Primeira malha.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

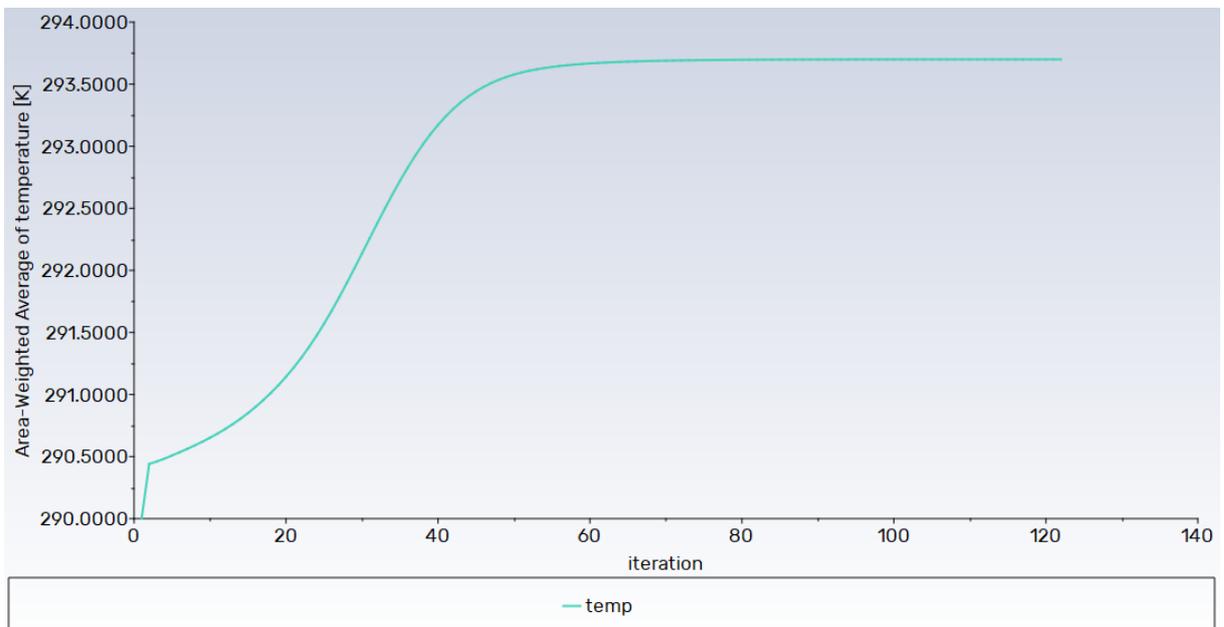


Figura 35 – Análise física da convergência da temperatura na saída da agulha de injeção de etanol - Primeira malha.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

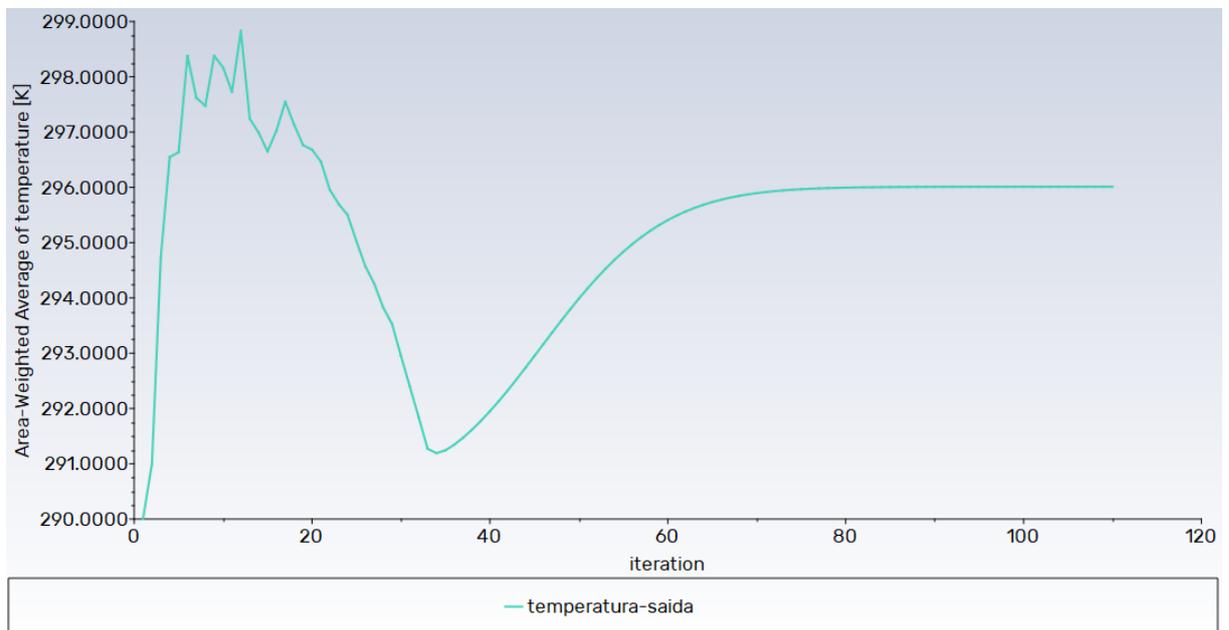


Figura 36 – Análise física da convergência da temperatura na saída da agulha de injeção de H_2 - Segunda malha. Fonte: Pesquisa direta (2025).

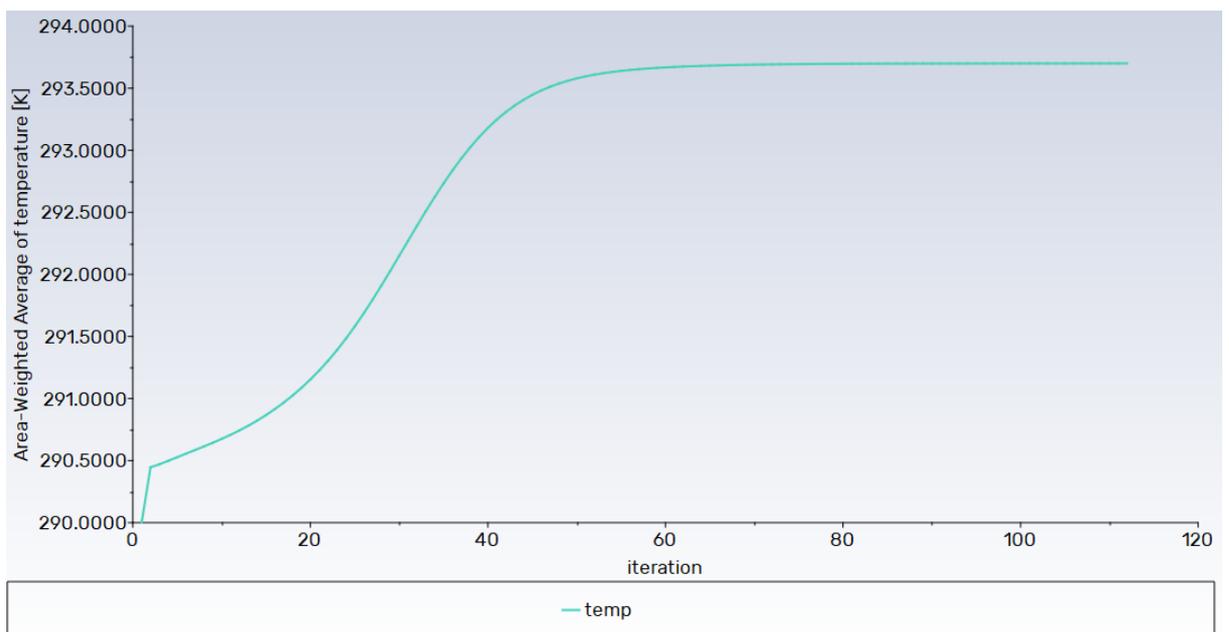


Figura 37 – Análise física da convergência da temperatura na saída da agulha de injeção de etanol- Segunda malha. Fonte: Pesquisa direta (2025).

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE RESÍDUOS

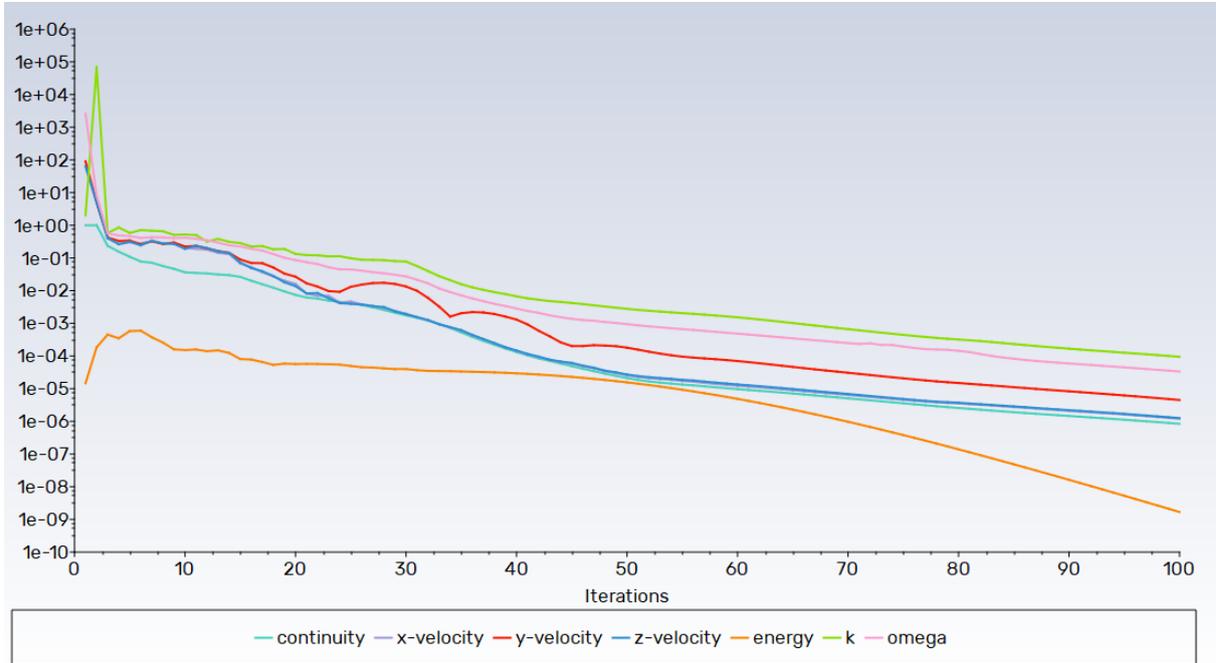


Figura 38 – Convergência dos resíduos para a simulação do hidrogênio. - Primeira malha
Fonte: Pesquisa direta (2025).

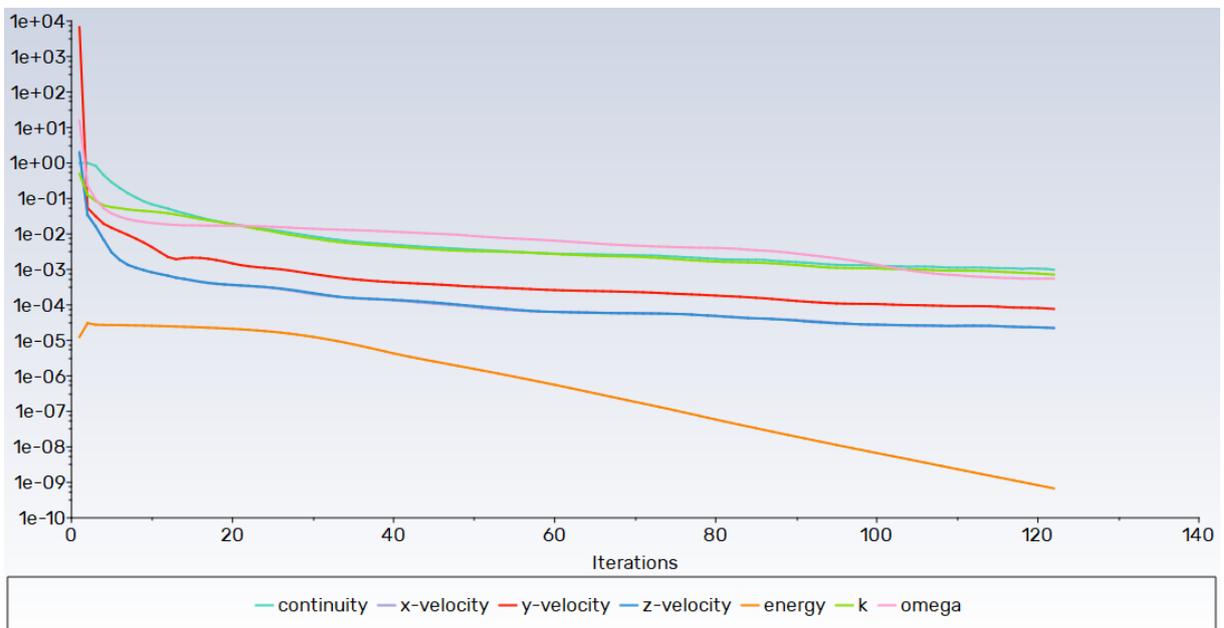


Figura 39 – Convergência dos resíduos para a simulação do etanol. - Primeira malha.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

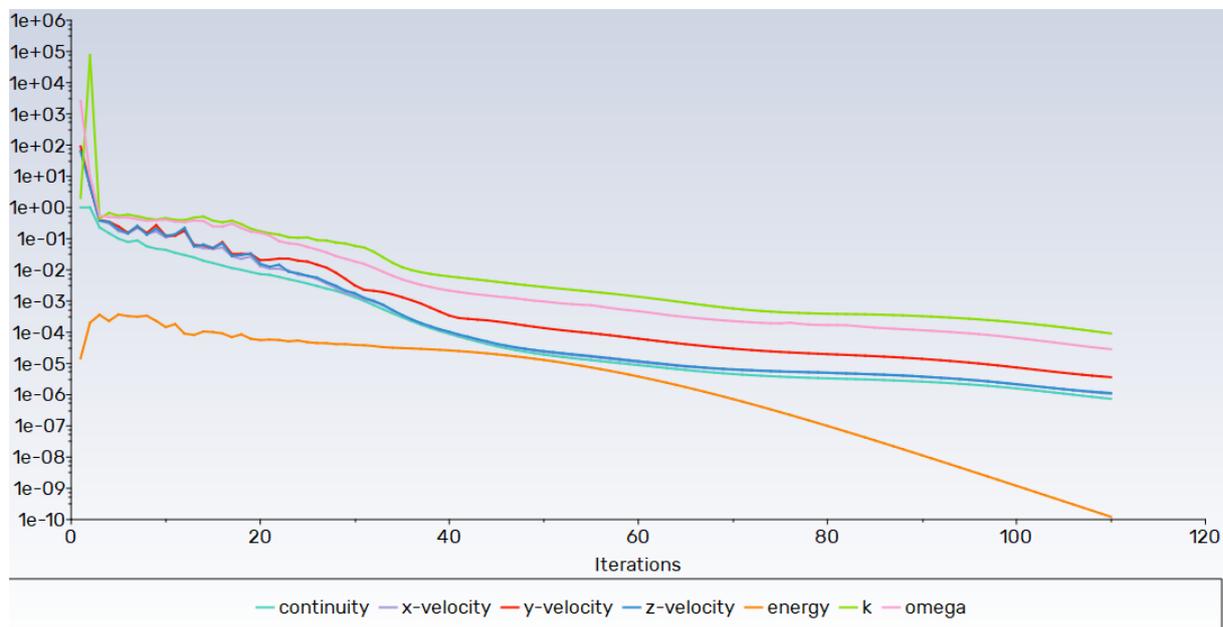


Figura 40 – Convergência dos resíduos na saída de hidrogênio. - Segunda malha.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

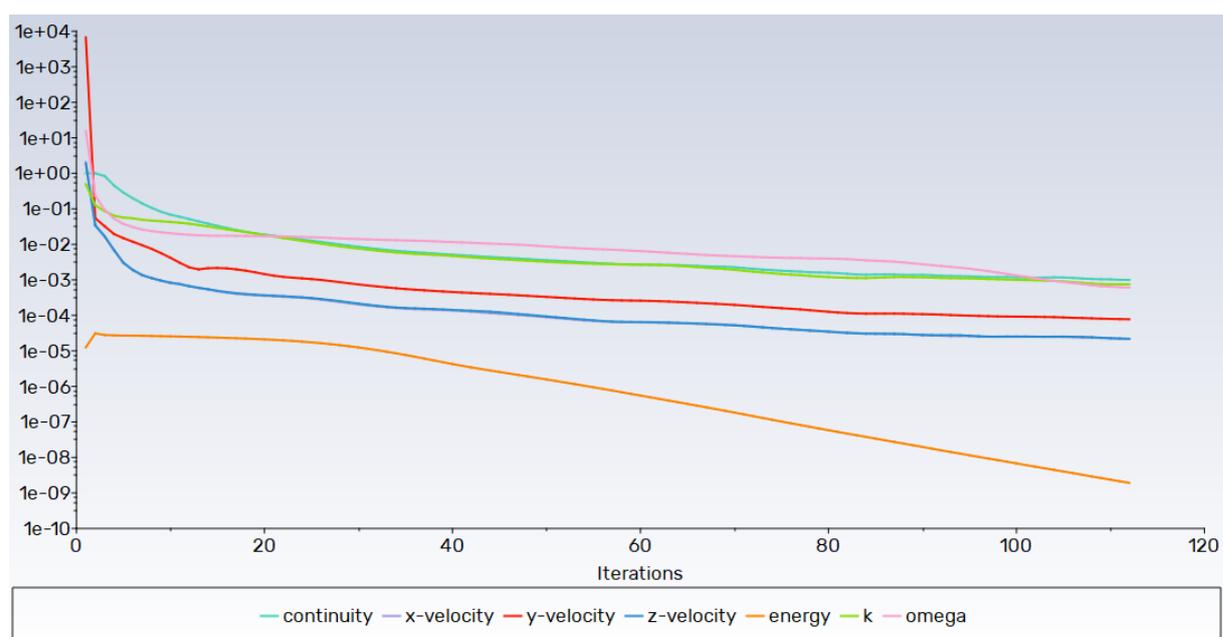


Figura 41 – Convergência dos resíduos na saída do etanol.
Fonte: Pesquisa direta (2025). - Segunda malha.