



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



**GUSTAVO HENRIQUE GUERREIRO ABRANTES**

**AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO USO DE HIDROGÊNIO COMO  
COMBUSTÍVEL SUPLEMENTAR AO BIODIESEL EM MOTORES DE  
IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO**

**OURO PRETO - MG**  
**2026**

**GUSTAVO HENRIQUE GUERREIRO ABRANTES**  
**gustavo.abrantes@aluno.ufop.edu.br**

**AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO USO DE  
HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL SUPLEMENTAR AO  
BIODIESEL EM MOTORES 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.

**Orientadora:** Elisângela Martins Leal, D.Sc.

**OURO PRETO – MG  
2026**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A161a Abrantes, Gustavo Henrique Guerreiro.

Avaliação computacional do uso de hidrogênio como combustível  
suplementar ao biodiesel em motores de ignição por compressão.

[manuscrito] / Gustavo Henrique Guerreiro Abrantes. - 2026.

125 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.

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

1. Hidrogênio como combustível. 2. Biodiesel - Soja. 3. Motores a  
diesel. 4. Simulação (Computadores). I. Leal, Elisângela Martins. II.  
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Gustavo Henrique Guerreiro Abrantes**

**Avaliação computacional do uso de hidrogênio como combustível suplementar ao biodiesel em motores 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 Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 12 de fevereiro de 2026

**Membros da banca**

Profª Drª Elisângela Martins Leal - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia - membro (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Claudio Marcio Santana - membro (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 18/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Elisangela Martins Leal, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/02/2026, às 10:47, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1060555** e o código CRC **18C9944A**.

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de Agradecer primeiramente a Deus por sempre me acompanhar e por ter me dado forças para sempre seguir em frente durante essa caminhada, aos meus pais Carlos Abrantes e Rosália Abrantes por todo o apoio e todo o amor que me deram durante toda minha vida. As minhas irmãs pelas conversas e apoio durante toda minha vida. A minha família por todo amor e carinho. A minha namorada Mariana Rodrigues por ter me acompanhado e me apoiado durante toda essa jornada. A minha orientadora Elisângela por toda paciência e dedicação, obrigado por me ensinar tanto e sempre me apoiar nas minhas decisões. A Escola de Minas e seus professores por tudo que me ensinaram e me ensinam até hoje, por terem me proporcionado uma formação incrível, assim como por terem me fornecido amizades maravilhosas. Aos meus amigos de Ouro Preto por todos os momentos felizes e tristes que passamos juntos. A minha segunda casa Barraca Armada e meus irmãos que ganhei na república durante esses anos. OBRIGADO!!

*"Eu não falhei. Apenas descobri 10 mil maneiras  
que não funcionavam."*

(Thomas Edson)

## RESUMO

A crescente preocupação com a redução das emissões de gases poluentes e com a diversificação da matriz energética no setor de transportes tem impulsionado o uso de biocombustíveis e combustíveis alternativos em motores de combustão interna. Nesse contexto, o biodiesel de óleo de soja destaca-se como uma alternativa renovável ao diesel mineral, embora apresente limitações relacionadas ao poder calorífico e ao consumo específico. O hidrogênio, por sua vez, possui elevado potencial energético e não emite dióxido de carbono durante a combustão, sendo considerado um combustível promissor quando utilizado de forma suplementar. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar computacionalmente os efeitos da adição de diferentes frações volumétricas de hidrogênio ao biodiesel de soja no desempenho, consumo e emissões de um motor de combustão interna de ignição por compressão. A metodologia baseia-se em simulações computacionais realizadas no software Diesel-RK, previamente validadas a partir da comparação entre dados experimentais e resultados simulados para operação com diesel. São analisados cenários de funcionamento com diesel, biodiesel puro (B100) e misturas biodiesel-hidrogênio contendo 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de hidrogênio em volume. Os resultados indicam que a adição de hidrogênio tende a melhorar o desempenho do motor, com aumento de torque, potência e eficiência térmica em determinadas condições operacionais, além de redução do consumo específico. Observa-se também diminuição significativa das emissões de material particulado e dióxido de carbono, embora com tendência de aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio para maiores frações de hidrogênio. Conclui-se que a suplementação por hidrogênio em motores Diesel operando com biodiesel apresenta potencial para ganhos energéticos e ambientais, desde que sejam considerados limites operacionais adequados para controle das emissões.

**Palavras-chave:** Hidrogênio. Biodiesel de soja. Motor Diesel. Simulação computacional. Emissões.

## ABSTRACT

Growing concerns regarding pollutant emissions and the diversification of the energy matrix in the transportation sector have stimulated the use of biofuels and alternative fuels in internal combustion engines. In this context, soybean biodiesel stands out as a renewable substitute for mineral diesel, although it presents limitations related to lower heating value and higher specific fuel consumption. Hydrogen, in turn, has a high energy potential and does not produce carbon dioxide during combustion, making it a promising supplementary fuel. Therefore, this study aims to computationally evaluate the effects of adding different volumetric fractions of hydrogen to soybean biodiesel on the performance, fuel consumption, and emissions of a compression ignition internal combustion engine. The methodology is based on numerical simulations performed using the Diesel-RK software, previously validated through comparison between experimental data and simulated results for diesel operation. Operating scenarios with diesel, pure biodiesel (B100), and biodiesel–hydrogen mixtures containing 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% hydrogen by volume were analyzed. The results indicate that hydrogen supplementation can enhance engine performance, leading to increases in torque, power, and thermal efficiency under certain operating conditions, as well as reductions in specific fuel consumption. A significant decrease in particulate matter and carbon dioxide emissions was also observed, although an increasing trend in nitrogen oxides emissions was identified for higher hydrogen fractions. It is concluded that hydrogen supplementation in diesel engines operating with biodiesel presents potential energy and environmental benefits, provided that appropriate operational limits are considered to control emissions.

**Keywords:** Hydrogen. Soybean biodiesel. Diesel engine. Computational simulation. Emissions.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Motor de Lenoir de 1860 .....                                                                                  | 6  |
| Figura 2 - Motor de Nicolaus Otto e Eugen Langen de 1867.....                                                             | 6  |
| Figura 3 - Componentes do Motor de Combustão Interna .....                                                                | 8  |
| Figura 4 - Diagrama técnico em português dos quatro tempos do motor.....                                                  | 9  |
| Figura 5 - Motores Ciclos Diesel nas Versões em Linha e V.....                                                            | 10 |
| Figura 6 - Nomenclaturas adotadas para as diferentes posições do pistão .....                                             | 10 |
| Figura 7 - Diagrama pressão-volume (PV) e temperatura-entropia (TS) do ciclo diesel .....                                 | 13 |
| Figura 8 - Processo de Transesterificação para o meio básico. ....                                                        | 17 |
| Figura 9 - Temperatura de Autoignição para Diferentes Combustíveis.....                                                   | 22 |
| Figura 10 - Comparação das Propriedades Físico-Químicas do Hidrogênio com as dos Hidrocarbonetos, Metano e Gasolina ..... | 22 |
| Figura 11 - Comparação das Propriedades Físico-Químicas do Hidrogênio com as dos Hidrocarbonetos, Metano e Gasolina ..... | 23 |
| Figura 12 - Faixa de flamabilidade e velocidade de chama do hidrogênio em comparação com combustíveis convencionais ..... | 24 |
| Figura 13 - fluxograma com os principais objetivos da pesquisa .....                                                      | 33 |
| Figura 14 - Tela 1 de configuração do Diesel RK.....                                                                      | 34 |
| Figura 15 - Tela 2 de configuração do Diesel RK.....                                                                      | 35 |
| Figura 16 - Tela 3 de configuração do Diesel RK.....                                                                      | 35 |
| Figura 17 - Tela 4 de configuração do Diesel RK.....                                                                      | 36 |
| Figura 18 - Tela 5 de configuração do Diesel RK.....                                                                      | 36 |
| Figura 19 - Configuração Mistura B97,5H22,5.....                                                                          | 39 |
| Figura 20 - Configuração Mistura B95H25.....                                                                              | 39 |
| Figura 21 - Configuração Mistura B92,5H27,5 .....                                                                         | 40 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22 - Configuração Mistura B90H210.....                                                     | 40 |
| Figura 23 - Ford Ranger 3.2 TDCi Oficial (original x modificado).....                             | 42 |
| Figura 24 - Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B100).....                                    | 51 |
| Figura 25 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B100) .....                                 | 51 |
| Figura 26 - Gráfico Comparativo de Eficiência Térmica (Diesel X B100).....                        | 51 |
| Figura 27 - Gráfico Comparativo de Consumo Específico (Diesel X B100).....                        | 53 |
| Figura 28 - Gráfico Comparativo de Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B100)<br>.....      | 53 |
| Figura 29 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B100) .....                    | 53 |
| Figura 30 - Gráfico Comparativo de Emissão de NOX (Diesel X B100) .....                           | 55 |
| Figura 31 - Gráfico Comparativo da Emissão de Material Particulado (Diesel X B100)<br>.....       | 55 |
| Figura 32 - Gráfico Comparativo da Emissão Específica de CO2 (Diesel X B100).....                 | 55 |
| Figura 33 – Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B97,5H2,5).....                               | 59 |
| Figura 34 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B97,5H2,5) .....                            | 59 |
| Figura 35 - Gráfico Comparativo de Eficiência (Diesel X B97,5H2,5).....                           | 59 |
| Figura 36 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico (Diesel X B97,5H2,5).....                   | 61 |
| Figura 37 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X<br>B97,5H2,5) ..... | 61 |
| Figura 38 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B97,5H2,5) .....               | 61 |
| Figura 39 - Gráfico Comparativo da Emissão de NOx (Diesel X B97,5H2,5) .....                      | 63 |
| Figura 40 - Gráfico Comparativo da Emissão de Material Particulado (Diesel X<br>B97,5H2,5) .....  | 63 |
| Figura 41 - Gráfico Comparativo da Emissão de CO2 (Diesel X B97,5H2,5) .....                      | 63 |
| Figura 42 - Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B95H5).....                                   | 67 |
| Figura 43 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B95H5) .....                                | 67 |
| Figura 44 - Gráfico Comparativo de Eficiência (Diesel X B95H5).....                               | 67 |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 45 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico (Diesel X B95H5).....                      | 69 |
| Figura 46 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B95H5) .....       | 69 |
| Figura 47 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B95H5) .....                  | 69 |
| Figura 48 - Gráfico Comparativo das Emissões de NOX (Diesel X B95H5) .....                       | 71 |
| Figura 49 - Gráfico Comparativo das Emissões de Material Particulado (Diesel X B95H5) .....      | 71 |
| Figura 50 - Gráfico Comparativo das Emissões de CO2 (Diesel X B95H5) .....                       | 71 |
| Figura 51 - Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B92,55H7,5).....                             | 75 |
| Figura 52 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B92,55H7,5) .....                          | 75 |
| Figura 53 - Gráfico Comparativo de Eficiência (Diesel X B92,55H7,5).....                         | 75 |
| Figura 54 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico (Diesel X B92,55H7,5).....                 | 77 |
| Figura 55 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B92,55H7,5) .....  | 77 |
| Figura 56 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B92,55H7,5) ....              | 77 |
| Figura 57 - Gráfico Comparativo das Emissões de NOx (Diesel X B92,55H7,5) .....                  | 79 |
| Figura 58 - Gráfico Comparativo das Emissões de Material Particulado (Diesel X B92,55H7,5) ..... | 79 |
| Figura 59 - Gráfico Comparativo das Emissões de CO2 (Diesel X B92,55H7,5) .....                  | 79 |
| Figura 60 - Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B90H10).....                                 | 83 |
| Figura 61 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B90H10) .....                              | 83 |
| Figura 62 - Gráfico Comparativo de Eficiência (Diesel X B90H10).....                             | 83 |
| Figura 63 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico (Diesel X B90H10).....                     | 85 |
| Figura 64 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B90H10) .....      | 85 |
| Figura 65 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B90H10) .....                 | 85 |
| Figura 66 - Gráfico Comparativo das Emissões de NOX (Diesel X B90H10).....                       | 87 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 67 - Gráfico Comparativo das Emissões de Material Particulado (Diesel X B90H10) .....      | 87 |
| Figura 68 - Gráfico Comparativo das Emissões de CO <sub>2</sub> (Diesel X B90H10) .....           | 87 |
| Figura 69 - Gráfico Comparativo de Torque Entre Todos os Cenários.....                            | 89 |
| Figura 70 - Gráfico Comparativo de Potência Entre Todos os Cenários .....                         | 90 |
| Figura 71 - Gráfico Comparativo de Eficiência Térmica Entre Todos os Cenários.....                | 91 |
| Figura 72 - Gráfico Comparativo das Emissões de NO <sub>x</sub> Entre Todos os Cenários .....     | 92 |
| Figura 73 - Gráfico Comparativo das Emissões de Material Particulado Entre Todos os Cenários..... | 93 |
| Figura 74 - Gráfico Comparativo das Emissões de CO <sub>2</sub> Entre Todos os Cenários .....     | 94 |
| Figura 75 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico Entre Todos os Cenários....                 | 95 |
| Figura 76 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente Entre Todos os Cenários.....  | 96 |
| Figura 77 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva Entre Todos os Cenários ..               | 97 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Tabela Comparativa entre as Propriedades do Diesel, Biodiesel Convencional e do Biodiesel a partir do Óleo de Soja..... | 21 |
| Tabela 2 - Principais Variáveis e Indicadores Utilizados nesse Trabalho .....                                                      | 37 |
| Tabela 3 - Parâmetros do Motor P5AT / Duratorq 3.2 TDCi- Ford Ranger 3.2 Duratorq TDCI (2015-2022).....                            | 43 |
| Tabela 4 - Comparação entre torque real e torque simulado .....                                                                    | 44 |
| Tabela 5 - Comparação entre potência real e potência simulada.....                                                                 | 45 |
| Tabela 6 - Métricas globais de validação do modelo .....                                                                           | 45 |
| Tabela 7 - Resultados da Simulação do Cenário a Diesel.....                                                                        | 47 |
| Tabela 8 - Resultado da Simulação do Cenário B100.....                                                                             | 49 |
| Tabela 9 - Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B100).....                                                   | 50 |
| Tabela 10 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B100) .....                                             | 52 |
| Tabela 11 - Comparação dos Resultados das Emissões do Motor (Diesel X B100) .....                                                  | 54 |
| Tabela 12 – Resultado da Simulação do Cenário B97,5H2,5.....                                                                       | 57 |
| Tabela 13 – Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B97,5H2,5) .....                                            | 58 |
| Tabela 14 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B97,5H2,5).....                                         | 60 |
| Tabela 15 - Comparação dos Resultados das Emissões do Motor (Diesel X B97,5H2,5) .....                                             | 62 |
| Tabela 16 - Resultado da Simulação do Cenário B95H5.....                                                                           | 65 |
| Tabela 17 - Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B95H5)....                                                  | 66 |
| Tabela 18 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B95H5) .....                                            | 68 |
| Tabela 19 - Comparação dos Resultados de Emissões do Motor (Diesel X B95H5).....                                                   | 70 |
| Tabela 20 - Resultado da Simulação do Cenário B92,55H7,5 .....                                                                     | 73 |
| Tabela 21 - Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B92,55H7,5) .....                                           | 74 |
| Tabela 22 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B92,55H7,5).....                                        | 76 |
| Tabela 23 -Comparação dos Resultados de Emissões do Motor (Diesel X B92,55H7,5)...                                                 | 78 |
| Tabela 24 - Resultado da Simulação do Cenário B90H10 .....                                                                         | 81 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 25 - Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B90H10)..                                | 82 |
| Tabela 26 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B90H10)                              |    |
| .....                                                                                                           | 84 |
| Tabela 27 - Comparação dos Resultados de Emissões do Motor (Diesel X B90H10).....                               | 86 |
| Tabela 28 - Comparação dos Resultados de Torque do Motor para Todos os Cenários .....                           | 89 |
| Tabela 29 - Comparação dos Resultados de Potência do Motor para Todos os Cenários...                            | 90 |
| Tabela 30 - Comparação dos Resultados de Eficiência Térmica do Motor para Todos os Cenários .....               | 91 |
| Tabela 31 - Comparação dos Resultados de Emissões de NOX do Motor para Todos os Cenários .....                  | 92 |
| Tabela 32 - Comparação dos Resultados de Emissões de Material Particulado do Motor para Todos os Cenários.....  | 93 |
| Tabela 33 - Comparação dos Resultados de Emissões de CO2 do Motor para Todos os Cenários .....                  | 94 |
| Tabela 34 - Comparação dos Resultados de Consumo Específico do Motor para Todos os Cenários .....               | 95 |
| Tabela 35 - Comparação dos Resultados de Razão Ar-Combustível Equivalente do Motor para Todos os Cenários ..... | 96 |
| Tabela 36 - Comparação dos Resultados de Pressão média efetiva do Motor para Todos os Cenários .....            | 97 |

## LISTA DE SIMBOLOS

$P$  – Potência efetiva do motor (kW)  
 $T$  – Torque ( $N \cdot m$ )  
 $\omega$  – Velocidade angular ( $rad \cdot s^{-1}$ )  
 $n$  – Rotação do motor (rpm)  
 PMI – Ponto Morto Inferior  
 PME ou pme – Pressão média efetiva (bar)  
 BMEP – Pressão média efetiva ao freio (bar)  
 $P_{max}$  – Pressão máxima no cilindro (bar)  
 $V_d$  – Volume deslocado total ( $m^3$ )  
 $V_{du}$  – Volume deslocado unitário ( $m^3$ )  
 $V_1$  – Volume total no PMI ( $m^3$ )  
 $V_2$  – Volume morto ( $m^3$ )  
 $S$  – Curso do pistão (m)  
 $D$  – Diâmetro do cilindro (m)  
 $z$  – Número de cilindros (–)  
 $r_c$  – Relação de compressão (–)  
 $\eta_t$  – Eficiência térmica (–)  
 $\eta_b$  – Eficiência ao freio (–)  
 $m_f$  – Massa de combustível por ciclo (g)  
 SFC – Consumo específico ( $kg \cdot kWh^{-1}$ )  
 $\lambda$  – Fator ar-combustível equivalente (–)  
 AFR – Razão ar-combustível (–)  
 $Q_{in}$  – Calor fornecido (kJ)  
 $Q_{out}$  – Calor rejeitado (kJ)  
 $W$  – Trabalho (kJ)  
 $C_p$  – Calor específico a pressão constante ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )  
 $C_v$  – Calor específico a volume constante ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )  
 $NO_x$  – Óxidos de nitrogênio ( $g \cdot kWh^{-1}$ )  
 MP – Material particulado ( $g \cdot kWh^{-1}$ )  
 $CO_2$  – Emissão de dióxido de carbono ( $g \cdot kWh^{-1}$ )  
 $H_2$  – Hidrogênio (–)

## SUMÁRIO

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                               | 1  |
| 1.1. Formulação do Problema.....                                                 | 1  |
| 1.2. Justificativa.....                                                          | 2  |
| 1.3. Objetivos.....                                                              | 3  |
| 1.3.1. Geral.....                                                                | 3  |
| 1.3.2. Específicos .....                                                         | 3  |
| 1.4. Estrutura do Trabalho .....                                                 | 4  |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                   | 5  |
| 2.1. Motores de Combustão Interna .....                                          | 5  |
| 2.1.1. Motores de Combustão Interna de Ignição por Compressão .....              | 12 |
| <i>Princípios Termodinâmicos</i> .....                                           | 12 |
| 2.2. Biodiesel como Combustível Alternativo em Motores de Ignição por Compressão | 15 |
| 2.2.1. Matérias-Primas para Produção de Biodiesel .....                          | 17 |
| 2.2.2. Propriedades Físico-Químicas do Biodiesel de Óleo de Soja.....            | 19 |
| 2.3. Hidrogênio .....                                                            | 21 |
| 2.4. Reforma de Biodiesel .....                                                  | 26 |
| 2.4.1. Reforma a Vapor ( <i>Steam Reforming - SR</i> ).....                      | 26 |
| 2.4.2. Reforma Autotérmica ( <i>Autothermal Reforming - ATR</i> ).....           | 27 |
| 2.4.3. Oxidação Parcial ( <i>Partial Oxidation - POX</i> ).....                  | 27 |
| 2.4.4. Tipos de Catalisadores para Reforma de Biodiesel .....                    | 28 |
| <i>Catalisadores à Base de Níquel</i> .....                                      | 28 |
| <i>Catalisadores de Metais Nobres</i> .....                                      | 29 |
| 2.4.5. Desativação de Catalisadores.....                                         | 29 |
| 3. METODOLOGIA.....                                                              | 31 |
| 3.1. Tipo de Pesquisa.....                                                       | 31 |
| 3.2. Materiais e Métodos .....                                                   | 32 |
| 3.3. Variáveis e Indicadores .....                                               | 37 |
| 3.4. Instrumentos de Coleta de Dados .....                                       | 38 |
| 3.5. Tabulação de dados .....                                                    | 38 |
| 4. RESULTADOS .....                                                              | 41 |
| 4.1. Validação do Software DIESEL-RK.....                                        | 41 |
| 4.1.1. Características técnicas do motor avaliado .....                          | 41 |

|        |                                                        |     |
|--------|--------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.2. | Procedimento de validação do modelo computacional..... | 43  |
| 4.1.3. | Comparação entre torque real e torque simulado .....   | 44  |
| 4.1.4. | Métricas globais de erro .....                         | 45  |
| 4.2.   | Cenário Diesel (Referência Comparativa).....           | 46  |
| 4.3.   | Cenário 1 (Biodiesel 100).....                         | 48  |
| 4.3.1. | Comparação com o Cenário Diesel .....                  | 49  |
| 4.4.   | Cenário 2 (Biodiesel 97,5% + hidrogênio 2,5%) .....    | 56  |
| 4.4.1. | Comparação com o Cenário Diesel .....                  | 57  |
| 4.5.   | Cenário 3 (Biodiesel 95% + H2 5%).....                 | 64  |
| 4.5.1. | Comparação com o Cenário Diesel .....                  | 65  |
| 4.6.   | Cenário 4 (Biodiesel 92,5% + H2 7,5%).....             | 72  |
| 4.6.1. | Comparação com o Cenário Diesel .....                  | 73  |
| 4.7.   | Cenário 5 (Biodiesel 90% + H2 10%).....                | 80  |
| 4.7.1. | Comparação com o Cenário Diesel .....                  | 81  |
| 4.8.   | Comparação Entre Todos os Cenários.....                | 88  |
| 5.     | CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS .....                | 99  |
| 5.1.   | Conclusões.....                                        | 99  |
| 5.2.   | Recomendações para trabalhos futuros .....             | 100 |

## **1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresenta-se uma introdução ao tema proposto neste trabalho de conclusão de curso. A seguir tem-se a formulação do problema, a justificativa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

### **1.1. Formulação do Problema**

A crise climática quando confrontada com um crescimento acentuado do consumo de energia, justificado pelo crescimento da população mundial; elevação dos padrões de vida e ao aumento da industrialização, pede regulamentações cada vez mais rigorosas com relação às emissões de gases poluentes na atmosfera, uma vez que nesse consumo de energia os combustíveis fósseis representam parcela significativa da matriz energética global, especialmente no setor de transportes em 2023 (IEA, 2024).

O óleo diesel, por sua elevada densidade energética e ampla infraestrutura de distribuição, permanece como um dos derivados de petróleo mais utilizados, sobretudo em aplicações associadas a motores de ignição por compressão (HOSSEINI, 2023). De acordo com o mesmo autor, a ampla adoção de motores Diesel está relacionada a fatores como durabilidade e eficiência térmica quando comparados a motores de ignição por centelha. Diante desse cenário, o biodiesel, quando produzido a partir de fontes renováveis, destaca-se como alternativa parcial ao diesel mineral (MOREIRA, 2024).

Apesar das vantagens ambientais, como a redução de emissões de material particulado e de compostos sulfurados, o biodiesel apresenta limitações operacionais em relação ao diesel mineral, com destaque para a maior viscosidade e o menor poder calorífico (CÂMARA, 2025). Silva et al. (2018) indicam que a viscosidade do biodiesel puro é tipicamente superior à do diesel, situando-se entre 3,0 e 6,0 mm<sup>2</sup>/s a 40 °C, enquanto o diesel apresenta valores entre 2,0 e 4,5 mm<sup>2</sup>/s. Adicionalmente, o poder calorífico do biodiesel tende a ser aproximadamente 10% a 15% inferior ao do diesel mineral, em função do maior teor de oxigênio na molécula e da menor densidade energética por unidade de massa, o que pode resultar em aumento do consumo específico para uma mesma condição de carga.

Essas diferenças físico-químicas influenciam diretamente o processo de combustão em motores de ignição por compressão, afetando parâmetros como consumo específico de combustível, pressão máxima no cilindro, temperatura de combustão e

formação de emissões. Assim, a avaliação do comportamento do biodiesel em comparação ao diesel mineral é fundamental para a interpretação dos resultados obtidos por simulação computacional no software Diesel-RK, cujos efeitos serão discutidos nos capítulos subsequentes.

Além do biodiesel, o hidrogênio tem sido estudado como alternativa energética por não emitir dióxido de carbono diretamente durante a combustão, embora apresente desafios relevantes relacionados à produção, armazenamento e integração em sistemas veiculares (PIRELLI, 2023; SANTOS; SOUZA, 2018). No contexto nacional, a produção de hidrogênio a partir de biomassa e biocombustíveis é considerada uma rota potencial para aplicações de baixo carbono, incluindo integrações com cadeias de bioenergia (EPE, 2025).

Nesse sentido, a geração de hidrogênio por reforma de biodiesel surge como alternativa promissora por combinar uma fonte renovável com a possibilidade de enriquecimento energético e melhoria do processo de combustão. Diferentes tecnologias de reforma podem alterar a eficiência de conversão e a qualidade do hidrogênio produzido, repercutindo na viabilidade de uso em motores de ignição por compressão (EPE, 2025). Adicionalmente, permanece relevante compreender como diferentes proporções volumétricas de hidrogênio em mistura com biodiesel influenciam o desempenho global e as emissões do motor (CÂMARA, 2025).

Assim, para identificar a tecnologia de reformador de biodiesel mais adequada à geração de hidrogênio e sua aplicação em motores Diesel, este trabalho realiza simulações no software Diesel-RK, avaliando a influência de diferentes percentuais volumétricos de hidrogênio em mistura com biodiesel sobre indicadores de desempenho e emissões. Com base nisso, formula-se a seguinte questão de pesquisa:

**Qual é o efeito da adição de hidrogênio ao biodiesel sobre desempenho e emissões de um motor de ignição por compressão, usando simulação computacional?**

## **1.2. Justificativa**

Diante do contexto relatado, faz-se necessária a busca por novas tecnologias que atuem no setor automotivo com o objetivo de reduzir as emissões e diminuir o impacto ambiental por meio de atividades mais sustentáveis, minimizando as perdas de desempenho e otimizar a eficiência térmica em relação ao cenário atual.

Em complemento sabe-se que o hidrogênio está ganhando espaço no cenário energético mundial, uma vez que se torna uma opção que pode se enquadrar na categoria de energia renovável e mais limpa (EPE, 2022).

Nesse sentido, transformar biodiesel em hidrogênio surge como solução viável para aproveitar o potencial renovável do biocombustível com ganhos em eficiência (EPE, 2025). As principais rotas tecnológicas de reforma, como reforma a vapor e oxidação parcial, diferem em rendimento e impacto operacional, influenciando a escolha da tecnologia para o veículo (SILVA, 2022). O tipo de reformador determina a pureza do hidrogênio, as condições operacionais e os resíduos gerados; já a proporção da mistura final afeta diretamente a performance e as emissões do motor (CÂMARA, 2025).

Já as simulações no software Diesel-RK tornam possível, com baixo custo, analisar diferentes cenários de mistura para identificar qual composição química dentre as utilizadas nos diferentes cenários apresenta melhor desempenho no motor (LEONE *et al*, 2020).

Justifica-se, assim, um estudo comparativo entre diferentes proporções de hidrogênio e biodiesel para tornar-se possível a escolha da tecnologia que mais se adequa a esse sistema de geração de hidrogênio a partir do biodiesel em veículos que possuem um motor de combustão interna a ignição por compressão.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Geral**

Avaliar computacionalmente os efeitos da adição de diferentes frações volumétricas de hidrogênio ao biodiesel de soja no desempenho, consumo e emissões de um motor de combustão interna de ignição por compressão.

#### **1.3.2. Específicos**

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre motores de combustão interna de ignição por compressão, biodiesel de óleo de soja e o uso do hidrogênio como combustível suplementar em motores Diesel;
- Descrever o modelo computacional adotado no software Diesel-RK, bem como as hipóteses, parâmetros de entrada e procedimentos de validação utilizados;

- Simular o funcionamento de um motor de ignição por compressão operando com diesel, biodiesel puro (B100) e misturas biodiesel–hidrogênio com diferentes frações volumétricas de  $H_2$ ;
- Avaliar os efeitos da adição de hidrogênio sobre indicadores de desempenho do motor, tais como torque, potência, eficiência térmica e pressão média efetiva;
- Analisar o impacto das diferentes frações volumétricas de hidrogênio no consumo específico de combustível e na razão ar–combustível equivalente;
- Investigar a influência da suplementação por hidrogênio nas emissões de  $NO_x$ , material particulado e  $CO_2$ , comparando os diferentes cenários simulados;
- Comparar os resultados obtidos para todos os cenários analisados, identificando tendências e limites operacionais associados ao aumento da fração volumétrica de hidrogênio;
- Apresentar conclusões a partir dos resultados obtidos e propor recomendações para trabalhos futuros.

#### **1.4. Estrutura do Trabalho**

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, subdivididos da forma como se segue. O primeiro capítulo apresenta a formulação do problema, a justificativa e os objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica utilizada para este trabalho. O terceiro capítulo trata da metodologia para a obtenção de indicadores e variáveis necessários para a avaliação computacional. O quarto capítulo aborda os resultados obtidos nesta avaliação. Por fim, o quinto capítulo aborda a conclusão acerca do desenvolvimento do trabalho, e recomendações para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esse capítulo possui o intuito de realizar uma revisão bibliográfica a respeito de motores de combustão interna (MCI) de ignição por compressão, assim como analisar os tipos de biodiesel obtidos a partir de plantas, destacar características sobre o hidrogênio, explicar o funcionamento da simulação no Diesel RK e por fim estudar tipos de reformadores de biodiesel para a geração de hidrogênio em veículos com MCI de ignição por compressão para viabilizar a utilização dessa tecnologia.

### **2.1. Motores de Combustão Interna**

Desde a sua criação, as máquinas térmicas têm um papel muito importante para o desenvolvimento e produtividade de diversos setores da sociedade, como por exemplo nos meios de transportes, nas indústrias e no dia a dia das pessoas (SILVA, 2017). Os motores de combustão, as turbinas e máquinas de refrigeração são exemplos de máquinas térmicas, as quais conseguem transformar calor em trabalho (BRUNETTI, 2012).

No entanto, como relatado por Ramos (2019), essa conversão possui duas classificações: motores de combustão interna e motores de combustão externa. De acordo com Brunetti (2012), fatores como ciclo de operação, tipo de combustível, de ignição, de injeção, dentre outros, influenciam diretamente no funcionamento dos motores de combustão interna. Além disso, esses fatores ajudam a classificar e caracterizar os motores de acordo com suas particularidades de funcionamento (BRUNETTI, 2012).

Segundo Vicente (2019), os motores de combustão interna surgiram como uma resposta às limitações dos motores a vapor, especialmente durante a Revolução Industrial, quando a demanda por máquinas mais eficientes e compactas aumentou.

A principal motivação para o desenvolvimento desses motores foi a necessidade de uma fonte de energia que não dependesse de um reservatório de água, o que tornava os motores a vapor menos práticos e mais pesados (VICENTE, 2019).

A utilização desse maquinário (MCI) teve o seu primeiro grande marco por volta do século XVIII, quando J. J. E. Lenoir criou um modelo que aspirava um gás e o ar durante a primeira metade do percurso do pistão, depois disso, essa mistura sofria ignição por meio de uma faísca, aumentando a pressão interna e fornecendo energia para retornar o pistão à posição inicial, finalizando o ciclo liberando os gases gerados (HEYWOOD, 1988), o modelo de Lenoir está representado pela Figura 1.

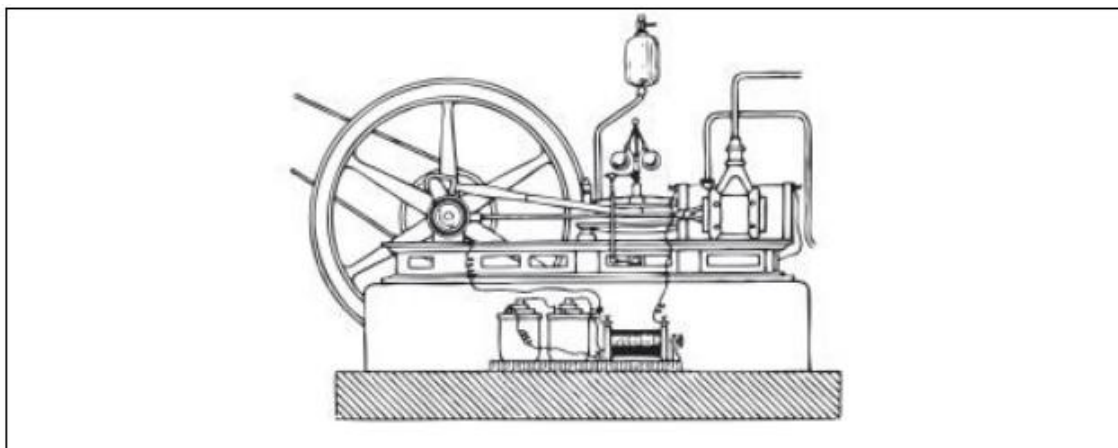


Figura 1 - Motor de Lenoir de 1860  
Fonte: TILLMANN, 2013

Alguns anos após a revolução industrial, meados do século XIX, Nikolas Otto, um engenheiro alemão, que desenvolveu um novo ciclo de funcionamento para os motores de combustão interna (ciclo Otto) a base de benzeno, com um funcionamento diferenciado, conhecido como o motor de quatro tempos (HEYWOOD, 1988), representado pela Figura 2. Segundo Çengel (2006), o motor de quatro tempos recebe essa denominação pois o eixo de manivelas necessita realizar duas revoluções para cada ciclo termodinâmico, ou seja, quatro cursos completos dentro do cilindro.

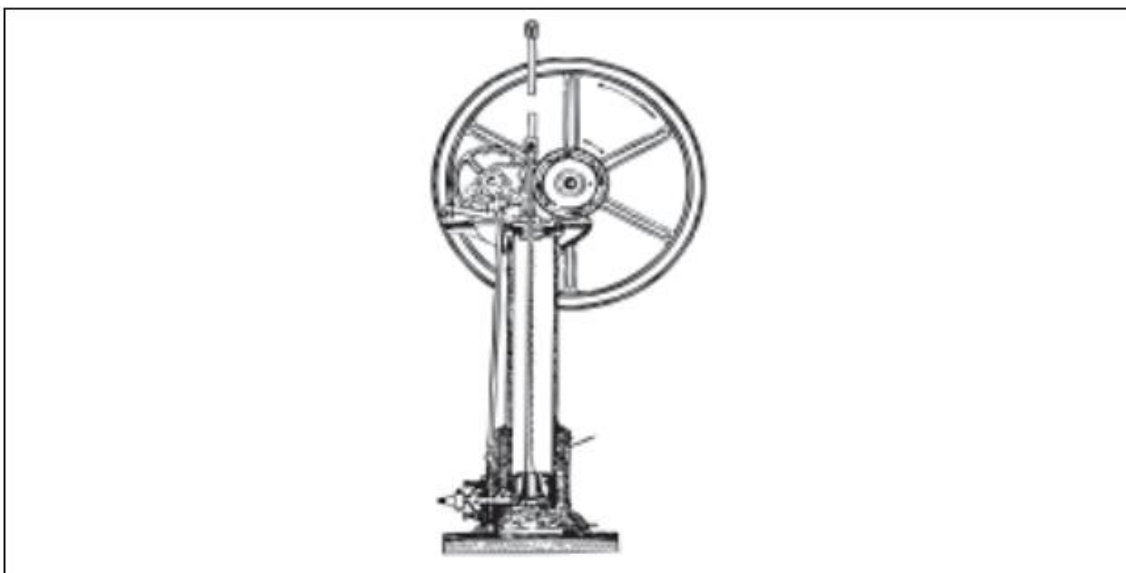


Figura 2 - Motor de Nicolaus Otto e Eugen Langen de 1867  
Fonte: TILLMANN, 2013

Como relata Carvalho (2011), posteriormente em 1897, o engenheiro alemão, Rudolf Diesel, criou o primeiro protótipo funcional de um novo modelo de motor de combustão interna, o qual utilizava o conceito de ignição por compressão, uma das principais diferenças em relação ao ciclo Otto, o qual possui ignição por centelha, esse motor Diesel utilizava o óleo de amendoim como combustível.

Relatada parte da história dos motores de combustão interna, é de suma importância saber quanto as classificações dele. De acordo com Martinelli (2003), os motores de combustão interna são classificados quanto aos itens a seguir.

- a) Otto e Diesel: Classificação quanto a propriedade do gás na admissão;
- b) Centelha e compressão: Classificação quanto ao tipo de ignição;
- c) Alternativo e rotativo: Classificação quanto a movimentação do pistão;
- d) Dois e quatro tempos: Classificação quanto ao ciclo de trabalho;
- e) Monocilíndrico e policilíndrico: Classificação quanto ao número de cilindros;
- f) Em linha, V e opostos ou em estrela: Classificação quanto a posição dos cilindros;
- g) Estacionário, industrial e veicular (marítimo e terrestre): Classificação quanto a utilização.

Conforme Brunetti (2018), o motor de combustão interna resulta da integração de diversos mecanismos projetados para viabilizar a conversão de energia química em energia mecânica. Na Figura 3 são apresentadas as principais partes que constituem esse tipo de motor. O bloco, o cabeçote, o cárter e os coletores de admissão e escape representam os componentes estacionários, enquanto os demais, como: a biela, o pistão, a árvore de manivelas, a camisa, as válvulas de admissão e escape representam os componentes móveis (RAMOS, 2019).

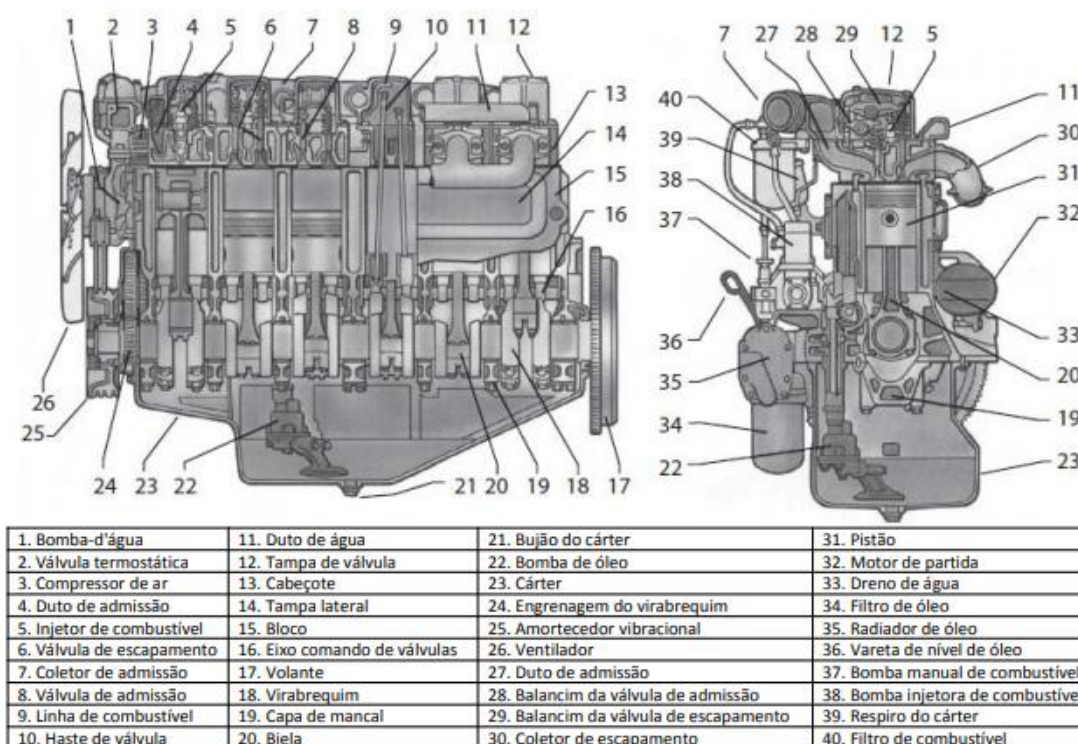


Figura 3 - Componentes do Motor de Combustão Interna  
Fonte: Brunetti, 2012

A transformação da energia química liberada pela combustão em trabalho mecânico depende fundamentalmente da operação coordenada entre esses diversos componentes móveis (HEYWOOD, 1988).

O pistão (representado na Figura 3 como número 31) constitui um dos elementos críticos neste sistema, atuando como intermediário entre a pressão dos gases em combustão e o sistema de transmissão de forças (BRUNETTI, 2012). Seu funcionamento baseado no movimento linear alternado, oscilando entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI), garante a sequência de eventos que caracteriza o ciclo termodinâmico do motor (KUMAR, 2018).

O deslocamento do pistão dentro do cilindro percorre uma distância fixa denominada curso, sendo o PMS a posição mais elevada e o PMI a posição mais rebaixada que o pistão atinge durante sua trajetória (HEYWOOD, 1988). Este movimento alternado é essencial para viabilizar as quatro fases do ciclo representadas na Figura 4: admissão da mistura ar-combustível, compressão, queima e exaustão dos gases residuais (BRUNETTI, 2012).

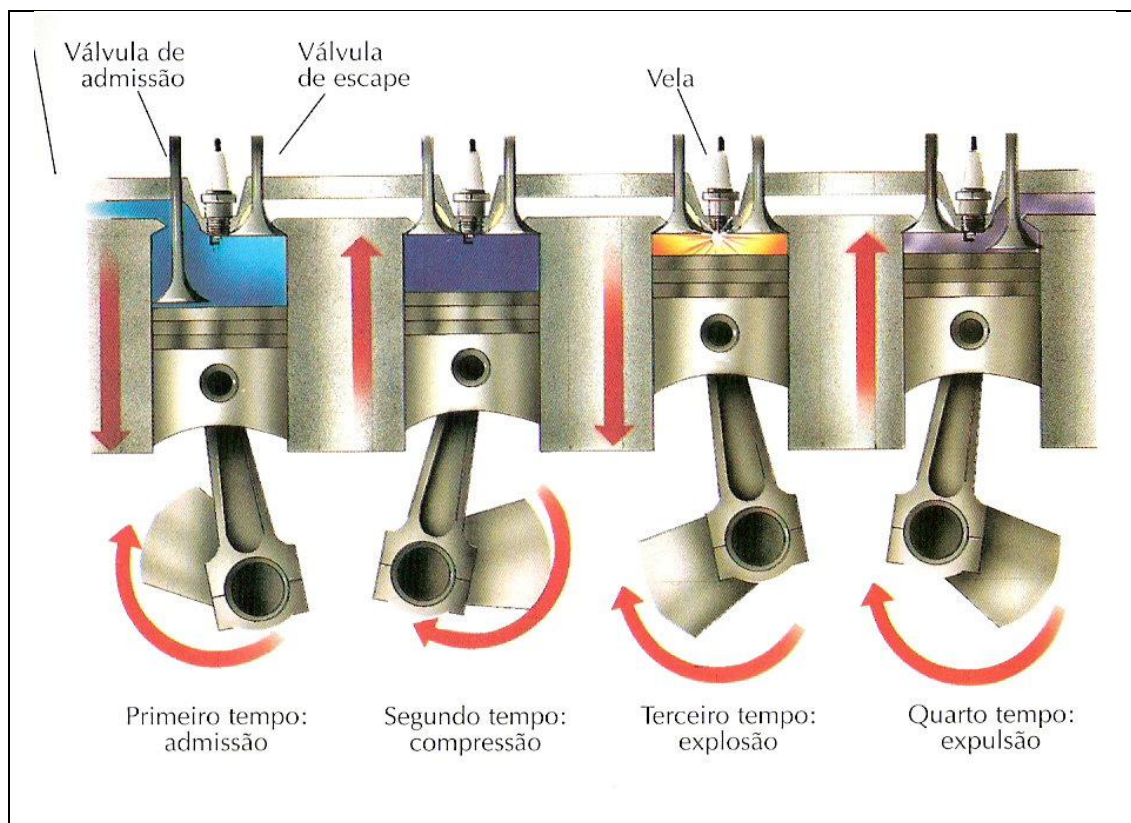


Figura 4 - Diagrama técnico em português dos quatro tempos do motor  
 Fonte: Adaptado de Brunetti, 2012

A biela (representada pelo número 20) funciona como um elemento de ligação mecânica, transmitindo as forças geradas pela expansão dos gases de combustão do pistão ao virabrequim (representado na Figura 3 como número 18), que representa a estrutura que recebe as forças transmitidas pela biela e as converte em movimento rotativo contínuo (THOMPSON, 2020).

A organização espacial dos cilindros dentro do motor é uma decisão de projeto que afeta significativamente características como compacidade, equilíbrio de forças, facilidade de manutenção e aplicabilidade (BRUNETTI, 2012).

Os motores em linha, nos quais os cilindros são dispostos sequencialmente em uma única fileira, apresentam como vantagens a simplicidade construtiva e acessibilidade para manutenção (RICARDO, 1923). Por outro lado, segundo o mesmo autor, as configurações em V, onde dois bancos de cilindros são posicionados em ângulo reto ou próximo, oferecem maior compacidade estrutural e um melhor equilíbrio dinâmico entre as forças atuantes, ambas as configurações representadas pela Figura 5.

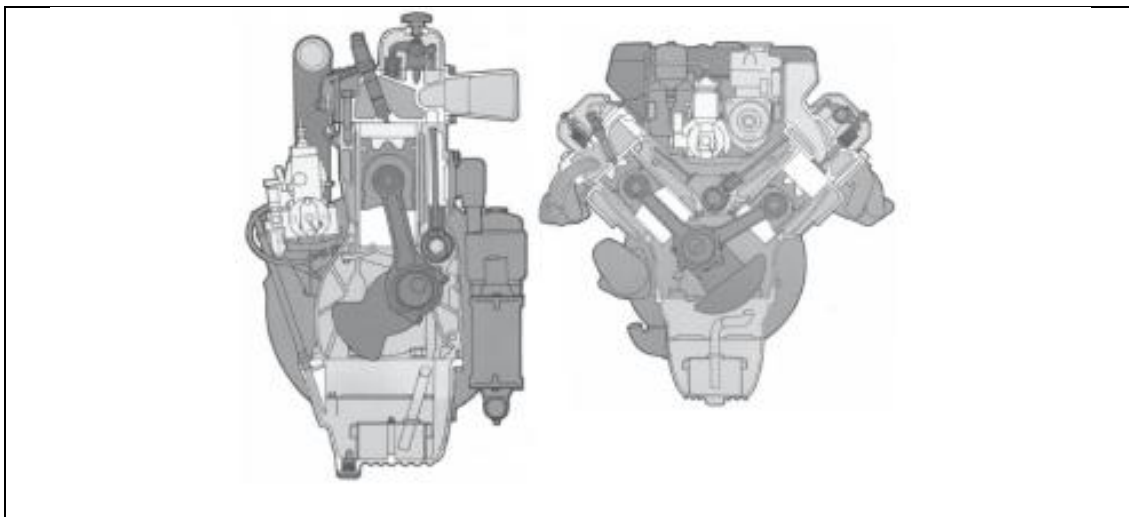


Figura 5 - Motores Ciclos Diesel nas Versões em Linha e V  
Fonte: Brunetti (2012, p. 40)

De acordo com a Figura 6 e como dito anteriormente, o Ponto Morto Superior (PMS) corresponde à posição mais alta que o pistão atinge dentro do cilindro, junto ao cabeçote, enquanto o Ponto Morto Inferior (PMI) é a posição mais baixa do pistão, afastando-se do cabeçote (SIMÊNCIO, 2019). O curso do pistão ( $S$ ) é a distância total percorrida pelo pistão entre o PMS e o PMI (BRUNETTI, 2012).

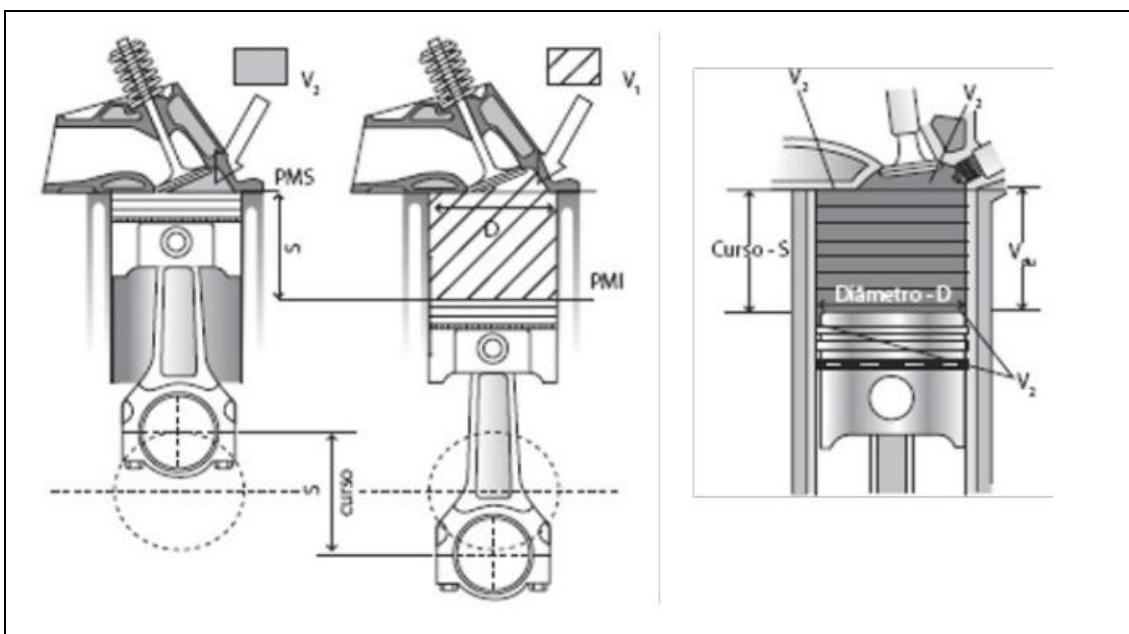


Figura 6 - Nomenclaturas adotadas para as diferentes posições do pistão  
Fonte: Simêncio (2019)

O volume total ( $V_1$ ) refere-se ao espaço entre a face superior do pistão e o cabeçote quando o pistão está no PMI (SIMÊNCIO, 2019). Já o volume morto ( $V_2$ ), também conhecido como volume da câmara de combustão, é o espaço remanescente entre a cabeça do pistão e o cabeçote quando o pistão está no PMS (FERGUSON, 2001).

A cilindrada unitária ( $V_{du}$ ) representado pela equação (1), ou deslocamento volumétrico, corresponde ao volume transportado pelo pistão em um ciclo completo, ou seja, do PMS ao PMI (PULKRABEK, 1997). O diâmetro interno de cada cilindro ( $D$ ) é utilizado no cálculo tanto do volume deslocado quanto da cilindrada unitária (STONE, 2012). O número de cilindros ( $z$ ) é uma característica definida durante o projeto do motor, influenciando seu desempenho e capacidade volumétrica total (BRUNETTI, 2012).

$$V_{du} = \frac{\pi * D^2}{4} * S \quad (1)$$

O volume deslocado total ( $V_d$ ) é o resultado da multiplicação da cilindrada unitária pelo número de cilindros, sendo um indicativo direto do potencial de trabalho do motor (SIMÊNCIO, 2019). Como na equação (2)

$$V_d = V_{du} * Z = \frac{\pi * D^2}{4} * S * Z \quad (2)$$

Motores com maior cilindrada tendem a gerar maior torque em regimes de rotação baixa, tornando-os ideais para aplicações em veículos e máquinas agrícolas (STONE, 2012). Inversamente, segundo o mesmo autor, os motores de cilindrada reduzida, frequentemente equipados com sistemas de turboalimentação, são capazes de fornecer elevada potência específica, adequando-se a aplicações automotivas de desempenho.

Nesse momento, é importante destacar que a razão entre o volume total e o volume morto (Equação 3) é conhecido como relação volumétrica ou relação de compressão ( $r_c$ ), e representa a quantidade de vezes que o  $V_1$  é reduzido. Este parâmetro adimensional exerce influência direta sobre a eficiência térmica do motor, uma vez que valores mais elevados permitem maior aproveitamento da energia disponível no combustível (FERGUSON, 2001). Assim, tem-se:

$$r_c = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_{du} + V_2}{V_2} = \frac{V_{du}}{V_2} + 1 \quad (3)$$

Em motores de ignição por compressão, a relação de compressão pode ser significativamente maior, variando de 14:1 a 22:1, uma vez que a natureza do ciclo diesel permite tal operação (HEYWOOD, 1988).

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

$$P = T * \omega \quad (4)$$

Em que: P é a potência mecânica, T é o torque e  $\omega$  é a velocidade angular.

O torque reflete a capacidade do motor em realizar trabalho contra resistências mecânicas e é primordialmente gerado pelas forças de pressão dos gases em expansão durante a combustão, onde a curva de torque em função da rotação caracteriza o comportamento do motor sob diferentes condições operacionais (BRUNETTI, 2012).

### **2.1.1. Motores de Combustão Interna de Ignição por Compressão**

Os motores de combustão interna de ignição por compressão, popularmente conhecidos como motores diesel, representam uma classe de propulsores que utilizam a elevação da temperatura do ar comprimido como mecanismo de autoignição do combustível (HEYWOOD, 1988). Diferentemente dos motores Otto, que dependem de ignição por centelha, os motores diesel dispensam velas de ignição, confiando na natureza térmica do ciclo para viabilizar a combustão (CARVALHO, 2011).

Como dito anteriormente, Rudolf Diesel, engenheiro alemão, patenteou em 1897 o primeiro protótipo funcional bem-sucedido deste motor revolucionário, que utilizava óleo de amendoim como combustível (CARVALHO, 2011). Essa inovação abriu perspectivas para o uso de óleos vegetais e posteriormente combustíveis minerais derivados do petróleo, consolidando a tecnologia como predominante em transporte pesado, máquinas agrícolas e geração de energia (TILLMANN, 2013).

### ***Princípios Termodinâmicos***

O ciclo diesel opera segundo processos termodinâmicos bem definidos, distintos do ciclo Otto (CENGEL, 2006). De acordo com a Figura 7 durante o primeiro tempo (admissão), apenas ar atmosférico é introduzido no cilindro por meio da válvula de

admissão, diferenciando-se radicalmente dos motores de ignição por centelha (BRUNETTI, 2012).

No segundo tempo (compressão), o ar é comprimido a pressões elevadas, tipicamente entre 20 e 30 bar, resultando em temperaturas superiores a 600°C (HEYWOOD, 1988). Esta elevada temperatura é suficiente para ignitar o combustível diesel quando injetado na câmara de combustão (FERGUSON, 2001).

No terceiro tempo (combustão e expansão), o combustível diesel é injetado diretamente na câmara de combustão através de injetores de alta pressão, ocorrendo autoignição praticamente instantânea (PULKRABEK, 1997). A combustão ocorre essencialmente a pressão constante, distinguindo-se do ciclo Otto onde a combustão se processa a volume aproximadamente constante (HEYWOOD, 1988). Esta característica confere aos motores diesel melhor aproveitamento da energia, resultando em maiores eficiências térmicas (FERGUSON, 2001).

No quarto tempo (exaustão), as válvulas de escape abrem-se permitindo expulsão dos gases residuais, completando o ciclo (TILLMANN, 2013).

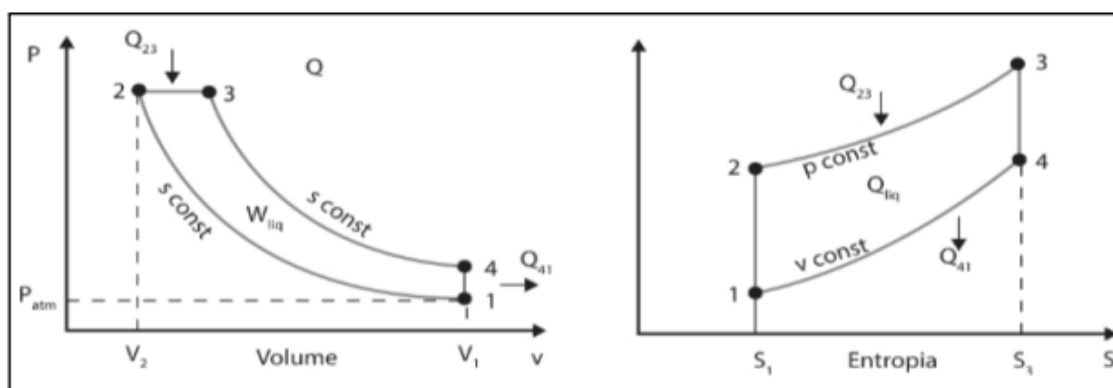


Figura 7 - Diagrama pressão-volume (PV) e temperatura-entropia (TS) do ciclo diesel  
Fonte: Brunetti (2018)

Segundo Brunetti (2018), os diagramas pressão-volume (P-V) e temperatura-entropia (T-S) do ciclo Diesel são gráficos essenciais para compreender o funcionamento desse tipo de motor. No gráfico P-V, a área interna aos quatro processos corresponde ao trabalho líquido ( $W_{liq}$ ) e pode ser obtida por meio da equação:

$$Q_{23} - Q_{41} = W_{liq} \quad (5)$$

Em que:  $Q_{23}$  – Calor adicionado ao sistema no processo 2→3 (kJ);  $Q_{41}$  – Calor rejeitado pelo sistema no processo 4→1 (kJ);  $W_c$  – Trabalho líquido do ciclo (kJ).

Aplicando-se a primeira lei da termodinâmica em motores tem-se:

$$Q_{23} - W_{23} = U_3 - U_2 \quad (6)$$

Em que:  $W_{23}$  é o Trabalho realizado no processo 2→3 (kJ);  $U_2$ ,  $U_3$  são as Energias internas nos estados 3 e 2 (kJ).

Segundo Brunetti (2018), a adição de calor ocorre a pressão constante, logo:

$$W_{23} = \int_2^3 P * dV = P * (V_3 - V_2) \quad (7)$$

Em que:  $P$  é a Pressão do gás (kPa);  $V_2$ ,  $V_3$  são os Volumes nos estados 3 e 2 ( $m^3$ ).

Ainda de acordo com Brunetti (2018), para um gás perfeito, a variação de entalpia pode ser expressa conforme mostra a equação:

$$\Delta H = m * C_p * \Delta T \quad (9)$$

Em que:  $\Delta H$  é a variação de entalpia (kJ);  $m$  é a massa do fluido (kg);  $C_p$  é o calor específico a pressão constante (kJ/kg·K);  $\Delta T$  é a variação de temperatura (K ou °C).

Por fim, considerando  $C_p$  e  $C_v$  como calores específicos médios avaliados nas temperaturas de interesse, a equação de calor adicionado ( $Q_{23}$ ) e rejeitado ( $Q_{41}$ ) no ciclo Diesel fica definida conforme as equações:

$$Q_{23} = m * C_p * (T_3 - T_2) \quad (10)$$

$$Q_{41} = m * C_v * (T_4 - T_1) \quad (11)$$

A eficiência térmica do ciclo Diesel ( $\eta_t$ ) pode ser determinada a partir das equações anteriores. Segundo Brunetti (2018), a relação matemática que define essa eficiência é dada pela equação:

$$\eta_t = 1 - \frac{m * C_v * (T_4 - T_1)}{m * C_p * (T_3 - T_2)} \quad (12)$$

Em que:  $\eta_t$  – Eficiência térmica do ciclo (adimensional ou %);  $m$  – Massa do fluido (kg);  $C_v$  – Calor específico a volume constante (kJ/kg·K);  $C_p$  – Calor específico a pressão constante (kJ/kg·K);  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – Temperaturas nos respectivos estados (K ou °C).

De acordo com Tukoff *apud* Leal (2022) a pressão média efetiva (pme) pode ser calculada como o quociente entre o trabalho líquido específico realizado pelo motor e a variação do volume específico do gás no ciclo. De acordo com Heywood (1988), a pressão média efetiva (PME) é uma grandeza essencial para a avaliação do desempenho de motores de combustão interna, pois representa a pressão média que, se aplicada sobre o pistão ao longo do curso, produziria o mesmo trabalho efetivo obtido no ciclo real do motor, onde a equação pode ser dada por:

$$PME = \frac{W_{líquido}}{V_d} = \frac{W_{líquido}}{V_1 - V_2} \quad (13)$$

Por fim, a potência indicada, a qual é representada pela equação 14, de um motor de combustão interna representa a potência teórica efetivamente transferida pelos gases de combustão para os pistões durante o ciclo de funcionamento do motor (BRUNETTI, 2012). É calculada considerando o trabalho realizado dentro dos cilindros, antes de serem descontadas as perdas por atrito e outros mecanismos internos, e normalmente é maior do que a potência disponível no eixo do motor, conhecida como potência efetiva ou útil (STONE, 2012).

$$P_i = PME * \frac{\pi * D^2}{4} * S * N_{cilindros} * \frac{n}{60} * \frac{1}{x} \quad (14)$$

Em que:  $D$  é o diâmetro do cilindro; PME é a pressão média efetiva;  $S$  é o curso do pistão;  $n$  é a rotação do motor;  $x$  é o fator de tempos;  $N_{cil}$  é o número de cilindros.

## 2.2. Biodiesel como Combustível Alternativo em Motores de Ignição por Compressão

O biodiesel constitui um biocombustível derivado de biomassa renovável, produzido através da reação química de transesterificação ou esterificação de óleos vegetais ou gorduras animais com álcool, metanol ou etanol, em presença de catalisadores apropriados (RAMOS et al., 2017).

A reação química resulta em ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, composição química que apresenta características adequadas para aplicação em motores de combustão interna que operam pelo sistema de ignição por compressão (GAMA *et all*, 2010).

A estrutura molecular característica do biodiesel, constituída por cadeias carbônicas de ésteres graxos, confere ao combustível propriedades físico-químicas semelhantes às do diesel mineral convencional (BIODIESELBR, 2006). Esta similaridade de propriedades viabiliza a utilização do biodiesel em estado puro, bem como em misturas com diesel convencional sem necessidade de alterações significativas nos motores (SOUZA *et all*, 2009).

A designação das misturas de biodiesel com diesel mineral segue uma nomenclatura padronizada de denominação BX, onde a letra B indica biodiesel e o número X representa o percentual volumétrico de biodiesel presente na mistura (VARGAS *et all*, 2017). A título de exemplificação, a designação B20 indica uma composição contendo 20% de biodiesel e 80% de diesel mineral em volume (ABIOVE, 2025).

A transesterificação é a reação química principal na produção de biodiesel, convertendo triglicerídeos de óleos vegetais e gorduras animais em monoésteres de ácidos graxos (biodiesel) e glicerol (GAMA *et all*, 2010). O processo reduz significativamente a viscosidade do óleo, tornando-o apropriado para uso em motores de ciclo diesel (DAFRATEC, 2025). A esterificação é um pré-tratamento necessário para matérias-primas com teor de ácidos graxos livres superior a 3%, evitando problemas durante a transesterificação (EMBRAPA, 2021). A qualidade da matéria-prima determina se é necessário pré-tratamento ácido ou se pode proceder-se diretamente à transesterificação (HIELSCHER, 2024).

Portanto para a produção do biodiesel tem-se as seguintes etapas: Preparação da matéria prima, reação de transesterificação, separação de fases, recuperação do álcool e a purificação da glicerina e ésteres (PARENTE, 2003.), representados pela Figura 8.

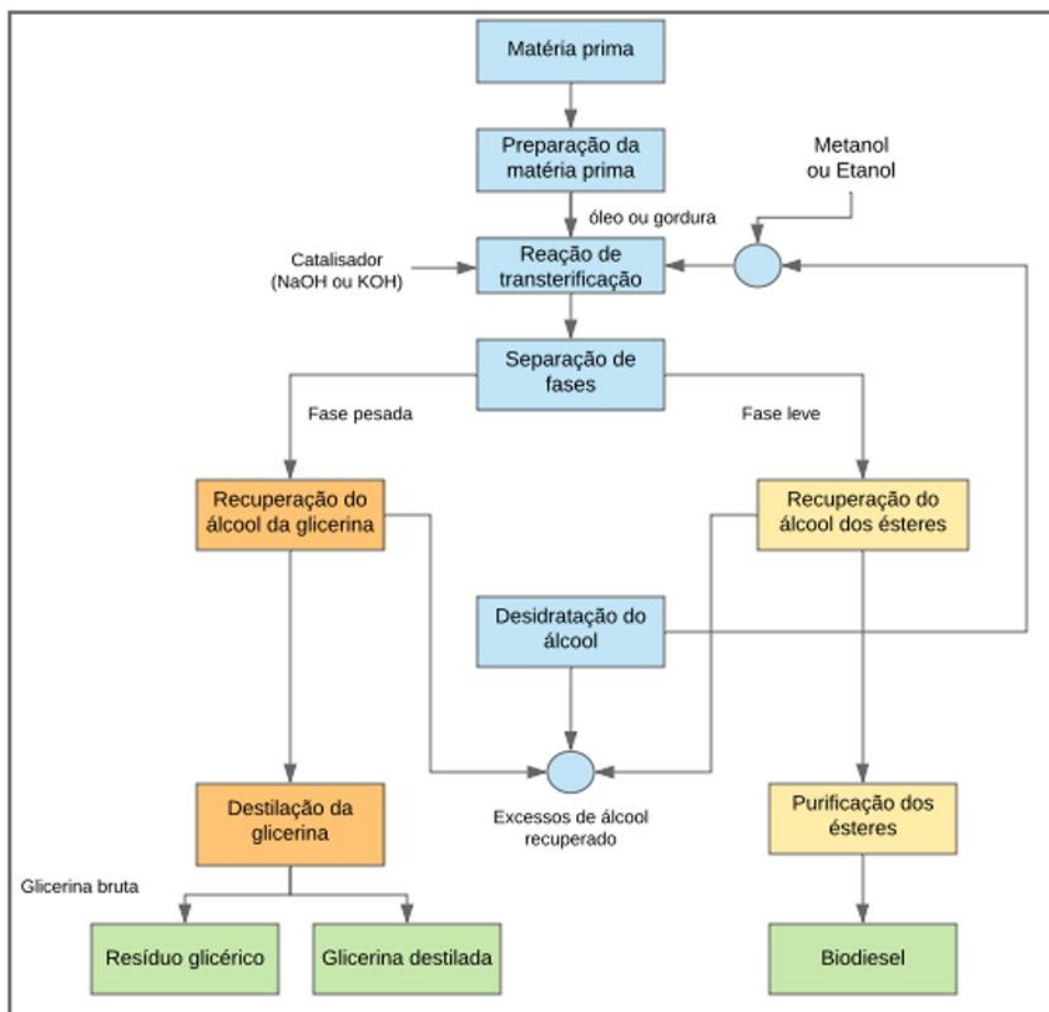


Figura 8 - Processo de Transesterificação para o meio básico.  
Fonte: PARENTE, (2003).

### 2.2.1. Matérias-Primas para Produção de Biodiesel

A versatilidade do biodiesel fundamenta-se na multiplicidade de matérias-primas utilizáveis para sua produção (RAMOS et al., 2017). Entre as matérias-primas de origem vegetal, destacam-se os óleos de soja, palma, girassol, canola, mamona, algodão e amendoim (RAMOS et al., 2017). As gorduras de origem animal, particularmente o sebo bovino e o óleo de peixe, constituem fontes alternativas e complementares de matéria-prima (ABIOVE, 2025).

A seleção da matéria-prima exerce influência determinante nas propriedades físico-químicas do biodiesel produzido (SOUZA et al., 2009). Parâmetros críticos como viscosidade, índice de cetano, estabilidade oxidativa e ponto de névoa são significativamente afetados pela sua escolha (GUARIEIRO, 2013).

Conforme dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a matriz de matérias-primas para biodiesel no Brasil apresenta composição distinta, com domínio absoluto de uma fonte específica (GOVERNO FEDERAL, 2015). O óleo de soja, que responde pela maior parcela da produção, seguido por gorduras animais e outras oleaginosas em proporções significativamente menores (RAIZEN, 2025). Essa disponibilidade regional de diferentes oleaginosas viabiliza a produção descentralizada de biodiesel em distintas regiões geográficas do Brasil (OLIVEIRA, 2012).

Como dito anteriormente, a soja constitui a principal matéria-prima para a fabricação de biodiesel no Brasil, correspondendo a aproximadamente 80% da produção total de biodiesel (RAIZEN, 2025). Esse grão é uma das culturas mais difundidas e consolidadas no Brasil, com estabilidade produtiva obtida através de investimentos tecnológicos significativos para tratamento e fortalecimento da planta (REVISTAIFSPSR, 2025). Estes fatores tecnológicos tornaram a soja uma das melhores opções para obtenção de óleo destinado à produção de biodiesel (REVISTAIFSPSR, 2025).

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor de soja do mundo, apresentando vantagens comparativas na produção e facilidade na colheita desta oleaginosa (ORBEN et al., 2019). Onde a produtividade média da soja brasileira alcança aproximadamente 3.000 kg por hectare, demonstrando elevado potencial de extração de óleo (ZANINI, 2022). Segundo o mesmo autor, na safra 2021/2022, a área plantada com soja no Brasil atingiu 39,196 milhões de hectares, totalizando uma produção de 122,431 milhões de toneladas.

O processamento de soja para extração de óleo é realizado em larga escala no Brasil, com tratamento de aproximadamente 40,5 milhões de toneladas de soja gerando 8,0 milhões de toneladas de óleo de soja (GOVERNO FEDERAL, 2015). Esse óleo de soja refinado apresenta características físico-químicas adequadas para transesterificação, resultando em biodiesel de qualidade conforme especificações da ANP (ORBEN et al., 2019). A taxa de conversão de ácidos graxos em ésteres durante a transesterificação do óleo de soja atinge aproximadamente 97,5% quando utilizado etanol como álcool transesterificante (BIODIESELBR, 2006).

A composição média do biodiesel produzido a partir de óleo de soja apresenta predominância de ésteres de ácidos graxos insaturados, particularmente ácido linoleico, correspondendo a aproximadamente 85% da composição total (BIODIESELBR, 2006).

De acordo com o mesmo autor, o teor de ésteres de ácidos graxos saturados no biodiesel de soja situa-se aproximadamente em 15%, conferindo estabilidade adequada para operação em motores.

O ponto de congelamento do biodiesel de soja é aproximadamente 6°C superior ao do diesel mineral, característica que pode influenciar operação em climas frios (ORBEN et al., 2019). A viscosidade cinemática do biodiesel de soja é aproximadamente 90,5% maior que a do diesel puro, sendo necessário considerar esta propriedade em aplicações com sistemas de injeção sensíveis à viscosidade (ORBEN et al., 2019).

Essa estabilidade de oferta de óleo de soja é considerada vantagem significativa em relação a outras oleaginosas brasileiras, garantindo continuidade na produção de biodiesel (REVISTAIFSPSR, 2025).

Por fim, uma limitação importante é que a soja constitui cultura sazonal, com colheita concentrada em três meses do ano, o que requer sistemas de armazenamento e processamento contínuo para viabilizar produção ininterrupta de biodiesel (REVISTAIFSPSR, 2025). Além disso, o óleo de soja apresenta tendência à oxidação acelerada quando exposto a oxigênio e altas temperaturas (BIODIESELBR, 2006) e a decomposição térmica do biodiesel de soja pode resultar em compostos poliméricos prejudiciais ao funcionamento do motor, demandando estabilizantes antioxidantes adequados (BIODIESELBR, 2006).

### **2.2.2. Propriedades Físico-Químicas do Biodiesel de Óleo de Soja**

Com o intuito de estabelecer uma comparação entre diferentes combustíveis, analisam-se a seguir as propriedades do biodiesel de óleo de soja em relação ao diesel mineral.

A viscosidade cinemática constitui a propriedade mais importante do biodiesel, devido ao seu papel fundamental no desempenho dos sistemas de injeção de motores diesel (UFPB, 2022). O biodiesel de óleo de soja apresenta viscosidade cinemática a 40 °C ligeiramente superior à do diesel mineral convencional, cuja faixa se situa entre 2,0 e 4,5 mm<sup>2</sup>/s (SOUZA et al., 2009). Esta maior viscosidade pode influenciar diretamente a qualidade da atomização do combustível (GUARIEIRO, 2013), contudo, proporciona maior lubricidade que o diesel mineral, resultando na redução do desgaste das partes móveis do sistema de alimentação (LÔBO et al., 2009).

A densidade do biodiesel é outra propriedade relevante, especialmente para a calibração de sistemas de injeção volumétrica (VARGAS et al., 2017). O biodiesel produzido a partir de óleo de soja apresenta massa específica média de 882 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C (SOUZA et al., 2009), enquanto a massa específica do diesel mineral varia entre 820 e 880 kg/m<sup>3</sup>, sendo, portanto, ligeiramente inferior (UNIAMERICA, 2019). Na prática, a maior densidade do biocombustível resulta em uma maior massa injetada por unidade de volume, afetando o consumo mássico do motor (VARGAS et al., 2017).

Quanto ao índice de cetano, este parâmetro relaciona-se à qualidade da combustão e à flamabilidade do combustível em partidas a frio (VARGAS et al., 2017). O biodiesel de soja apresenta índice médio de 57,8, enquanto o diesel mineral situa-se entre 45 e 52 (UNIAMERICA, 2019). Esse valor elevado favorece uma rápida autoignição, promovendo a diminuição do ruído do motor, menor consumo e a redução das emissões de óxidos de nitrogênio sob certas condições (UNIAMERICA, 2019; VARGAS et al., 2017).

Em termos energéticos, de acordo com Martini (2012), o poder calorífico inferior (PCI) do biodiesel de soja é de 37,5 MJ/kg. Em contrapartida, o PCI do diesel mineral é superior, variando entre 42 e 45 MJ/kg (GUARIEIRO, 2013). Essa diferença, que oscila entre 10% e 12%, implica em um ligeiro aumento do consumo específico de combustível quando o motor opera com biodiesel puro para manter a carga (CORRÊA et al., 2008).

Adicionalmente, destacam-se vantagens ambientais: o biodiesel de soja é livre de enxofre e compostos aromáticos (VARGAS et al., 2017). Seu teor médio de oxigênio, em torno de 11%, favorece uma combustão mais completa (VARGAS et al., 2017). Quanto à segurança, o ponto de fulgor superior a 130 °C, significativamente maior que o do diesel, reduz drasticamente os riscos de incêndio no armazenamento e transporte (BIODIESELBR, 2006).

Por fim, requisitos normativos devem ser observados: a estabilidade à oxidação deve atender ao limite mínimo de 13 horas a 110 °C, exigindo a adição de antioxidantes (ANP, 2022). O teor de água e sedimentos é estritamente limitado para prevenir a corrosão interna (INMETRO, 2022), assim como as cinzas sulfatadas, limitadas a 0,020% em massa para evitar depósitos prejudiciais na câmara de combustão (ANP, 2014).

Portanto, com o intuito de facilitar a análise da diferença entre as propriedades do diesel, biodiesel convencional e do biodiesel a partir do óleo de soja é possível formular a Tabela 1 para comparação.

Tabela 1 - Tabela Comparativa entre as Propriedades do Diesel, Biodiesel Convencional e do Biodiesel a partir do Óleo de Soja

| Propriedade                     | Unidade            | Diesel Mineral | Biodiesel de Óleo de Soja | Referências                           |
|---------------------------------|--------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Viscosidade Cinemática (40°C)   | mm <sup>2</sup> /s | 2,0 - 4,5      | 3,0 - 6,0                 | SOUZA et al., 2009; BIODIESELBR, 2006 |
| Densidade (20°C)                | kg/m <sup>3</sup>  | 820 - 880      | 877 (média)               | UNIAMERICA, 2019; SOUZA et al., 2013  |
| Índice de Cetano                | adimensional       | 45 - 52        | 57,8 (média)              | UNIAMERICA, 2019; BIODIESELBR, 2006   |
| Poder Calorífico Inferior       | MJ/kg              | 42 - 45        | 37,50                     | MARTINI, 2012; CORRÊA et al., 2008    |
| Ponto de Fulgor                 | °C                 | 100 - 130      | > 130                     | BIODIESELBR, 2006                     |
| Teor de Enxofre                 | %                  | até 0,05       | ~ 0,0                     | VARGAS et al., 2017                   |
| Teor de Oxigênio                | %                  | 0,00           | 11,00                     | VARGAS et al., 2017                   |
| Estabilidade à Oxidação (110°C) | horas              | N/A            | > 13                      | ANP, 2022; INMETRO, 2022              |
| Teor de Água e Sedimentos       | %                  | máx. 0,05      | máx. 0,05                 | INMETRO, 2022                         |
| Cinzas Sulfatadas               | % massa            | máx. 0,01      | máx. 0,02                 | ANP, 2014                             |

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

### 2.3. Hidrogênio

Com o aumento da necessidade de adoção de fontes energéticas de menor impacto ambiental, o hidrogênio tem se destacado como um vetor energético de baixo carbono no contexto da transição energética global (IEA, 2023).

A sua combustão não resulta na emissão direta de dióxido de carbono, o que o torna atrativo para aplicações energéticas, especialmente quando associado a sistemas que buscam redução de emissões (WANG; WAN; WANG, 2009). Entretanto, a sustentabilidade ambiental do hidrogênio está diretamente condicionada ao método empregado em sua produção, sendo imprescindível a análise das diferentes rotas tecnológicas disponíveis (EPBR, 2023).

Do ponto de vista físico-químico, o hidrogênio apresenta propriedades significativamente distintas dos combustíveis convencionais empregados em motores de combustão interna (PASINI, 2020). Destacam-se sua elevada velocidade de chama, ampla faixa de flamabilidade e alta temperatura de autoignição, características que

influenciam diretamente a taxa de liberação de calor, os níveis de pressão e temperatura no interior do cilindro e a formação de emissões (FAIZAL et al., 2019).

As figuras 9 a 11 apresentadas nesta seção ilustram essas diferenças em relação a combustíveis como metano e gasolina, fornecendo base técnica para a análise do comportamento do hidrogênio em motores de ignição por compressão.

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

Figura 9 - Temperatura de Autoignição para Diferentes Combustíveis  
Fonte: Adaptado de Faizal et al. (2019)

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

Figura 10 - Comparação das Propriedades Físico-Químicas do Hidrogênio com as dos Hidrocarbonetos, Metano e Gasolina

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

| Propriedades                                        | Hidrogênio | Metano     | Isso-octano |
|-----------------------------------------------------|------------|------------|-------------|
| Peso molecular (g/mol)                              | 2,016      | 16,043     | 114,236     |
| Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )                       | 0,08       | 0,65       | 692         |
| Difusidade mássica do ar ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) | 0,61       | 0,16       | ~ 0,07      |
| Energia de ignição mínima (mJ)                      | 0,02       | 0,28       | 0,25        |
| Distância mínima da temperatura (mm)                | 0,64       | 2,03       | 3,5         |
| Limite de inflamabilidade no ar (vol%)              | 4 – 75     | 5 – 15     | 1,1 – 6     |
| Limite de inflamabilidade ( $\lambda$ )             | 10 – 0,14  | 2 – 0,6    | 1,51 – 0,26 |
| Limite de inflamabilidade ( $\phi$ )                | 0,1 – 7,1  | 0,5 – 1,67 | 0,66 – 3,85 |
| Poder calorífero inferior (MJ/kg)                   | 120        | 50         | 44,3        |
| Poder calorífero superior (MJ/kg)                   | 142        | 55,5       | 47,8        |
| Relação estequiométrica ar/combustível (kg/kg)      | 34,2       | 17,1       | 15,0        |
| Relação estequiométrica ar/combustível (kmol/kmol)  | 2,387      | 9,547      | 59,666      |

Figura 11 - Comparação das Propriedades Físico-Químicas do Hidrogênio com as dos Hidrocarbonetos, Metano e Gasolina

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

A elevada velocidade de chama do hidrogênio possibilita a operação do motor com misturas ar–combustível mais pobres, o que pode resultar em maior eficiência térmica (VERHELST; WALLNER, 2009). Segundo o mesmo autor, por outro lado, sua elevada temperatura de autoignição permite que o combustível suporte altas taxas de compressão sem ignição prematura, característica relevante para motores Diesel. Entretanto, tais propriedades também podem provocar aumentos da pressão máxima no cilindro e favorecer a formação de óxidos de nitrogênio, exigindo avaliação cuidadosa das condições operacionais (FAIZAL et al., 2019).

Esses efeitos são representados esquematicamente na Figura 12, que compara as propriedades de inflamabilidade do hidrogênio com outros combustíveis.

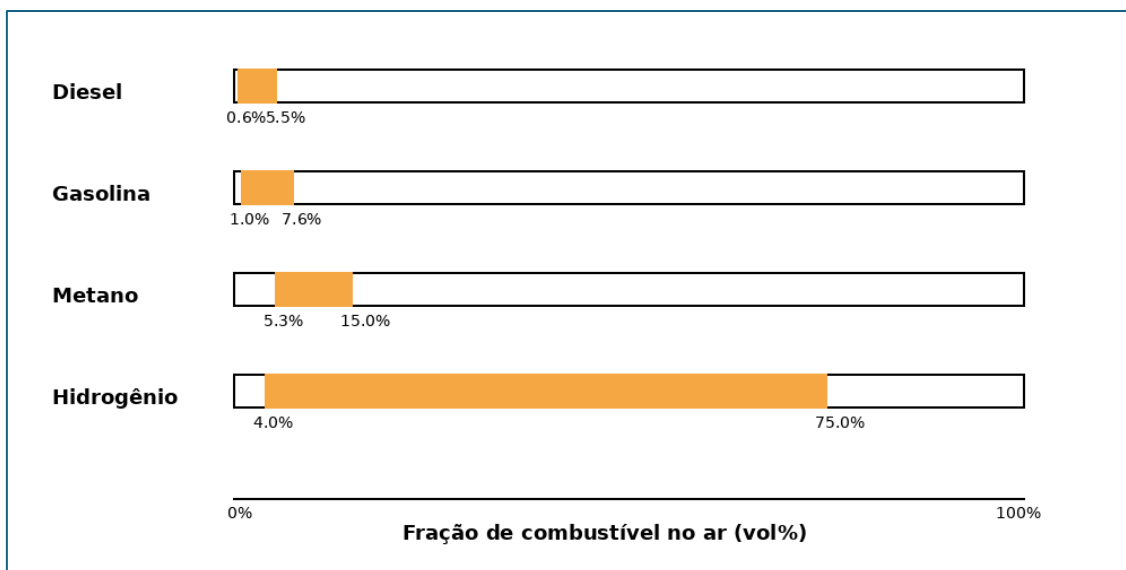


Figura 12 - Faixa de inflamabilidade e velocidade de chama do hidrogênio em comparação com combustíveis convencionais

Fonte: Adaptado de VERHELST, S.; WALLNER, T.

O hidrogênio não é encontrado livremente na natureza, estando sempre associado a outros elementos químicos. Dessa forma, sua classificação é realizada de acordo com o processo utilizado em sua obtenção, como hidrogênio cinza, azul, verde, turquesa, entre outros (EPBR, 2023).

Essa classificação pode, de acordo com EPBR (2023), ser:

- Hidrogênio Preto: produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem *Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS)*. Considerado uma fonte de energia não renovável e poluidora pois há a liberação de dióxido de carbono para a atmosfera na sua produção;
- Hidrogênio Marrom: semelhante ao hidrogênio preto, se diferenciando quanto ao carvão mineral que será gaseificado (hulha), sem *Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS)*, um carvão menos denso e com menor quantidade de carbono do que o antracito. Uma fonte de energia não renovável e poluidora;
- Hidrogênio Cinza: produzido por meio da reforma do vapor, sem *Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS)*, esse é o tipo de hidrogênio mais produzido na atualidade, nesse processo ocorre a reação do metano ( $\text{CH}_4$ ) com vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) em alta temperatura e pressão gerando o gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que assim como o preto e o marrom também é jogado

na atmosfera, e sua fonte de obtenção é não renovável, ou seja, é uma fonte de energia não renovável;

- Hidrogênio Azul: produzido utilizando-se a mesma tecnologia que o hidrogênio Cinza, a reforma do vapor, a diferença é que na produção do hidrogênio Azul o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) não será lançado na natureza, ele é capturado e pode ser utilizado pelas indústrias ou ser armazenado em reservatórios geológicos, como bacias sedimentares. Com *Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS)*, ou seja, é uma fonte de energia não poluidora, porém, ainda é considerada não renovável;
- Hidrogênio Turquesa: produzido por meio da pirólise do metano ( $\text{CH}_4$ ), nele o gás natural é submetido a altas temperaturas, ocorrendo a produção de  $\text{H}_2$  e carbono em estado sólido que pode ser utilizado por diferentes processos industriais, importante ressaltar que no hidrogênio turquesa não há a produção de  $\text{CO}_2$ , porém o hidrogênio só é considerado turquesa quando a energia utilizada na pirólise é de fontes renováveis, tornando o turquesa uma fonte de energia renovável e mais limpa;
- Hidrogênio Verde: O hidrogênio verde é produzido a partir da eletrólise da água, esse processo utiliza eletricidade para separar a água em moléculas de  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ , processo realizado colocando-se dois eletrodos na água e aplicando uma corrente elétrica proveniente de fontes de energia renováveis, um tipo de energia renovável e mais limpa que vem ganhando muito espaço no cenário mundial;
- Hidrogênio Musgo: Produzido por meio de biomassa ou biocombustíveis, utilizando-se processos como gaseificação, biodigestão anaeróbia e reformas catalíticas, nesse método não há a necessidade da utilização de *CCUS* para o  $\text{CO}_2$  uma vez que há a possibilidade de geração de carbono nulo ou negativo. Uma fonte de energia limpa e renovável;
- Hidrogênio Rosa: É o hidrogênio produzido por meio da eletrólise da água só que, diferente do hidrogênio verde, o rosa utiliza como fonte de energia a energia nuclear, importante perceber que não há a presença de carbono na água, logo essa se torna um dos focos de discussão quando se trata de energia mais limpa e não renovável;

- Hidrogênio Amarelo: Uma variação do hidrogênio verde na qual é produzido utilizando exclusivamente energia solar, uma fonte de energia mais limpa e renovável.

Dentre as diferentes rotas de obtenção, destaca-se o hidrogênio produzido a partir de biocombustíveis, como o biodiesel, por meio de processos de reforma termoquímica. Essa abordagem apresenta potencial alinhamento com os princípios de sustentabilidade e economia circular, ao integrar fontes renováveis de carbono com a geração de hidrogênio (MOREIRA et al., 2024).

As principais tecnologias de reforma aplicáveis ao biodiesel; reforma a vapor, reforma autotérmica e oxidação parcial; diferem significativamente quanto à eficiência de conversão, pureza do hidrogênio produzido, demanda energética e complexidade operacional (MARTIN; WÖRNER, 2011; MARTIN et al., 2015a).

## **2.4. Reforma de Biodiesel**

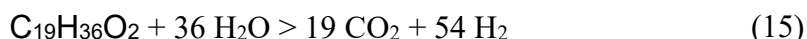
A transição para matrizes energéticas de baixo carbono estabeleceu os biocombustíveis como alternativas estratégicas para a redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes (MOREIRA et al., 2024). O biodiesel, em particular, destaca-se por sua capacidade de diversificar a matriz energética, permitindo a substituição gradual do diesel fóssil sem a necessidade de modificações estruturais profundas nos motores de ignição por compressão (MOREIRA et al., 2024).

No contexto da suplementação por hidrogênio, a reforma desses combustíveis líquidos surge como uma solução para a geração *on-board*, aproveitando a infraestrutura de armazenamento já existente e a alta densidade energética desses hidrocarbonetos (MARTIN et al., 2015).

### **2.4.1. Reforma a Vapor (*Steam Reforming* - SR)**

A reforma a vapor é a tecnologia mais consolidada comercialmente para a produção de hidrogênio, sendo responsável por mais de 50% da produção mundial de hidrogênio (MOREIRA et al., 2024). O processo consiste na reação fortemente endotérmica do combustível com vapor d'água sob elevadas temperaturas, tipicamente na faixa de 700 °C a 850 °C (MARTIN et al., 2015). Para o biodiesel, frequentemente

representado pelo metil-oleato ( $C_{19}H_{36}O_2$ ), a reação teórica de reforma é descrita pela Equação (15):



A tecnologia SR apresenta a maior eficiência de hidrogênio entre as rotas disponíveis, com rendimentos de conversão que podem alcançar de 70% a 100% em condições ótimas (MOREIRA et al., 2024). As concentrações de hidrogênio no gás de síntese (produto seco) situam-se entre 54% e 90%, dependendo da eficiência do catalisador e da temperatura de operação (SLINN et al., 2008).

Contudo, a natureza endotérmica do processo exige um fornecimento externo de calor. Em aplicações veiculares, embora parte desse calor possa ser recuperada dos gases de exaustão, as temperaturas de entrada do reformador devem ser mantidas acima de 750 °C para garantir a estabilidade operacional e evitar a desativação catalítica (MARTIN et al., 2015).

#### **2.4.2. Reforma Autotérmica (*Autothermal Reforming - ATR*)**

A reforma autotérmica integra as reações endotérmicas da reforma a vapor com a oxidação parcial exotérmica em um único reator (MARTIN et al., 2015). Esta combinação permite a operação autossustentável do ponto de vista térmico, eliminando a complexidade de trocadores de calor externos (MOREIRA et al., 2024). O processo opera geralmente entre 600 °C e 900 °C (MARTIN; WÖRNER, 2011).

Um parâmetro crítico para o biodiesel na ATR é a razão oxigênio/carbono ( $O_2/C$ ), que deve situar-se na faixa ótima de 0,30 a 0,40 para maximizar a produção de hidrogênio e minimizar a formação de subprodutos (SAIDI; MORADI, 2020). Embora apresente eficiências de hidrogênio ligeiramente inferiores à SR (65% a 75%), a ATR oferece uma resposta dinâmica superior a variações de carga, o que a torna altamente atrativa para sistemas embarcados em automóveis (MARTIN et al., 2015a).

#### **2.4.3. Oxidação Parcial (*Partial Oxidation - POX*)**

A oxidação parcial é um processo exotérmico que converte hidrocarbonetos em gás de síntese através de uma reação com quantidades subestequiométricas de oxigênio (DOU et al., 2014). Diferente das outras tecnologias, a POX não requer vapor d'água

como reagente, simplificando significativamente o sistema de alimentação (MARTIN; WÖRNER, 2011).

Entretanto, a POX opera em temperaturas mais elevadas (900 °C a 1000 °C) e apresenta rendimentos de hidrogênio limitados, situando-se entre 50% e 60% (MARTIN; WÖRNER, 2011). Além disso, as concentrações de hidrogênio no gás produto são reduzidas, variando entre 25% e 35% (MARTIN; WÖRNER, 2011). Outro desafio técnico significativo da POX é a elevada tendência à formação de coque (deposição de carbono) em comparação à reforma a vapor, o que pode comprometer a vida útil do catalisador e a estabilidade do fluxo gasoso (DOU et al., 2014).

#### **2.4.4. Tipos de Catalisadores para Reforma de Biodiesel**

A eficiência dos processos de reforma depende intrinsecamente da seleção do sistema catalítico, o qual deve promover a quebra das cadeias de hidrocarbonetos e favorecer a seletividade ao hidrogênio (MOREIRA et al., 2024).

##### ***Catalisadores à Base de Níquel***

Os catalisadores de níquel suportados em alumina (Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) são amplamente adotados em escala industrial devido ao seu baixo custo e alta disponibilidade comercial (SLINN et al., 2008). Em processos de reforma de biodiesel, esses materiais apresentam boa atividade catalítica inicial, com conversões situadas na faixa de 90% a 99% (SLINN et al., 2008). As seletividades para o hidrogênio geralmente oscilam entre 65% e 75% em temperaturas de operação típicas de 600 °C a 800 °C (MARTIN et al., 2015b).

Para mitigar limitações inerentes, a adição de promotores químicos é frequentemente empregada para aumentar a estabilidade e a atividade (SLINN et al., 2008). Metais como Cério (Ce), Magnésio (Mg) e Cobre (Cu) auxiliam na dispersão da fase ativa e na resistência à deposição de carbono (MARTIN et al., 2015b). Segundo o mesmo autor, o catalisador Ni-Ce/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, por exemplo, destaca-se por permitir a operação em temperaturas inferiores (550 °C a 750 °C). Isso devido à capacidade do óxido de cério em armazenar e liberar oxigênio, facilitando a oxidação contínua de depósitos carbonáceos na superfície catalítica (DOU et al., 2014).

**Vantagens:** Baixo custo, facilidade de escalabilidade e boa atividade para a quebra de cadeias lineares.

**Desvantagens:** Alta suscetibilidade ao envenenamento por enxofre e à desativação por coqueificação e sinterização em temperaturas elevadas.

### ***Catalisadores de Metais Nobres***

Catalisadores baseados em metais nobres, especificamente Platina (Pt) e Ródio (Rh), constituem a classe de materiais mais eficiente para a reforma de biodiesel em sistemas embarcados (MARTIN et al., 2015b). Segundo o mesmo autor, estes metais apresentam uma capacidade superior de adsorção e ativação das moléculas de hidrocarbonetos pesados, resultando em conversões de biodiesel de até 99% sob condições otimizadas.

De acordo com Martin et al. (2015), o uso de um catalisador de Ródio suportado em óxido misto de alumínio permitiu alcançar uma composição de gás estável e próxima ao equilíbrio termodinâmico por 100 horas de operação contínua. Segundo citado pelo mesmo autor, a seletividade para hidrogênio nesses sistemas é significativamente mais alta (70% a 90%) comparada aos catalisadores de níquel. No entanto, para Martin et al. (2015), a viabilidade técnica exige que a temperatura de entrada do reator seja mantida acima de 750 °C para prevenir a formação de depósitos de coque que levam à rápida desativação.

### **2.4.5. Desativação de Catalisadores**

Segundo Martin et al. (2015) a desativação representa o maior desafio para a aplicação comercial de reformadores veiculares, ocorrendo principalmente através de três mecanismos: formação de coque, sinterização e envenenamento por enxofre.

#### ***Mecanismo 1: Formação de Coque (Coqueificação)***

A deposição de carbono sólido na superfície ativa é o mecanismo predominante na reforma de combustíveis líquidos. Compostos aromáticos, presentes no diesel e em frações do biodiesel, são os principais precursores de coque devido à sua baixa reatividade e tendência à polimerização. A taxa de coqueificação aumenta drasticamente em temperaturas abaixo de 750 °C e em condições de altos fluxos mássicos, onde o tempo de residência é insuficiente para a gaseificação completa dos radicais de carbono.

### ***Mecanismo 2: Sinterização***

Consiste na degradação térmica estrutural onde as partículas metálicas ativas aglomeram-se, reduzindo a área superficial disponível para a reação. Embora observada principalmente em temperaturas acima de 800 °C, Martin et al. (2015) identificaram que a sinterização em monólitos metálicos ocorre predominantemente na entrada do catalisador, mas pode não ser fatal para a operação em curto prazo se houver controle rigoroso do perfil térmico.

### ***Mecanismo 3: Envenenamento por Enxofre***

O enxofre presente no combustível reage quimicamente com os sítios metálicos, formando sulfetos estáveis que bloqueiam permanentemente a atividade catalítica. Mesmo concentrações baixas (6,8 ppm) podem induzir a desativação a longo prazo. Para garantir a estabilidade do sistema, recomenda-se a dessulfurização profunda do combustível para níveis inferiores a 2 ppm antes da alimentação ao reformador.

### **3. METODOLOGIA**

Neste capítulo, é apresentada a metodologia da pesquisa, detalhando as ferramentas, métodos e tipos de pesquisa utilizados. Além disso, são definidas as variáveis e indicadores que foram utilizados para a análise dos dados.

#### **3.1. Tipo de Pesquisa**

Como é colocado por Trujillo Ferrari (1982), a pesquisa não se limita à busca por respostas específicas. Ela é um processo exploratório que busca compreender fenômenos, gerar novos conhecimentos e contribuir para o desenvolvimento de teorias.

A pesquisa pode ser compreendida como um procedimento sistemático voltado à obtenção, organização e análise de informações, cujo propósito é ampliar o conhecimento acerca de determinado fenômeno. Em sentido amplo, trata-se de uma atividade que envolve investigação criteriosa, exame detalhado de dados e aprofundamento teórico, caracterizando-se como processo essencial para a construção do saber científico (FERREIRA, 2015). Dessa maneira, o presente trabalho fundamenta-se na pesquisa como ferramenta metodológica indispensável, orientando a coleta, o tratamento e a interpretação das informações utilizadas no desenvolvimento do estudo.

Quanto à natureza da abordagem, a literatura metodológica distingue dois principais paradigmas investigativos: qualitativo e quantitativo. A perspectiva qualitativa enfatiza a compreensão interpretativa dos fenômenos, considerando dimensões subjetivas como valores, crenças, motivações e significados atribuídos pelos indivíduos ou contextos analisados, aspectos que nem sempre podem ser expressos numericamente (MINAYO, 2003). Assim, privilegia-se a análise descritiva e contextualizada dos processos sociais e técnicos.

Por outro lado, a abordagem quantitativa fundamenta-se na mensuração objetiva das variáveis por meio de métodos estatísticos, modelagens matemáticas e análises numéricas, possibilitando a obtenção de resultados mensuráveis e comparáveis (SILVA; MENEZES, 2004). Esse tipo de investigação mostra-se adequado quando o fenômeno pode ser representado por indicadores quantificados de forma sistemática, permitindo maior objetividade na análise dos dados (LAKATOS; MARCONI, 2006).

No que se refere aos objetivos da pesquisa, esta pode assumir caráter exploratório quando busca proporcionar maior familiaridade com o problema estudado, contribuindo

para o esclarecimento de conceitos, formulação de hipóteses e delimitação do objeto de análise (GIL, 2019). Além disso, pode apresentar natureza explicativa, quando procura identificar fatores determinantes ou condicionantes de determinados acontecimentos, possibilitando compreensão mais aprofundada das relações de causa e efeito envolvidas (GIL, 2019).

Em relação aos procedimentos técnicos, destaca-se a pesquisa bibliográfica, caracterizada pela análise crítica de produções científicas já consolidadas, como livros, artigos e teses, constituindo a base teórica do estudo (LAKATOS; MARCONI, 2006). Complementarmente, a pesquisa documental utiliza materiais e registros ainda não submetidos a tratamento analítico sistemático, extraídos de diferentes fontes institucionais ou técnicas (FONSECA, 2002). Há também abordagens baseadas em dados empíricos, como a pesquisa-ação, que envolve intervenção prática com vistas à solução de problemas específicos (LAKATOS; MARCONI, 2006), bem como a pesquisa experimental, na qual são estabelecidas condições de controle e observados os efeitos decorrentes da manipulação de variáveis sobre o objeto investigado (GIL, 2002).

Essa pesquisa caracteriza-se por uma abordagem mista, conjugando revisão bibliográfica, análise quantitativa e qualitativa. A revisão bibliográfica fornece a base teórica para a proposta de uma nova metodologia de otimização de motores a diesel. A análise quantitativa se baseia em simulações numéricas, enquanto a análise qualitativa envolve a comparação dos resultados obtidos com dados da literatura.

### **3.2. Materiais e Métodos**

A Figura 13 é um fluxograma que destaca os principais objetivos da pesquisa, facilitando o acompanhamento do leitor, fundamental para a compreensão da metodologia empregada neste trabalho. Ela apresenta, de forma visual e organizada, o passo a passo da análise de desempenho do motor a diesel suplementado por hidrogênio utilizando o software Diesel RK.

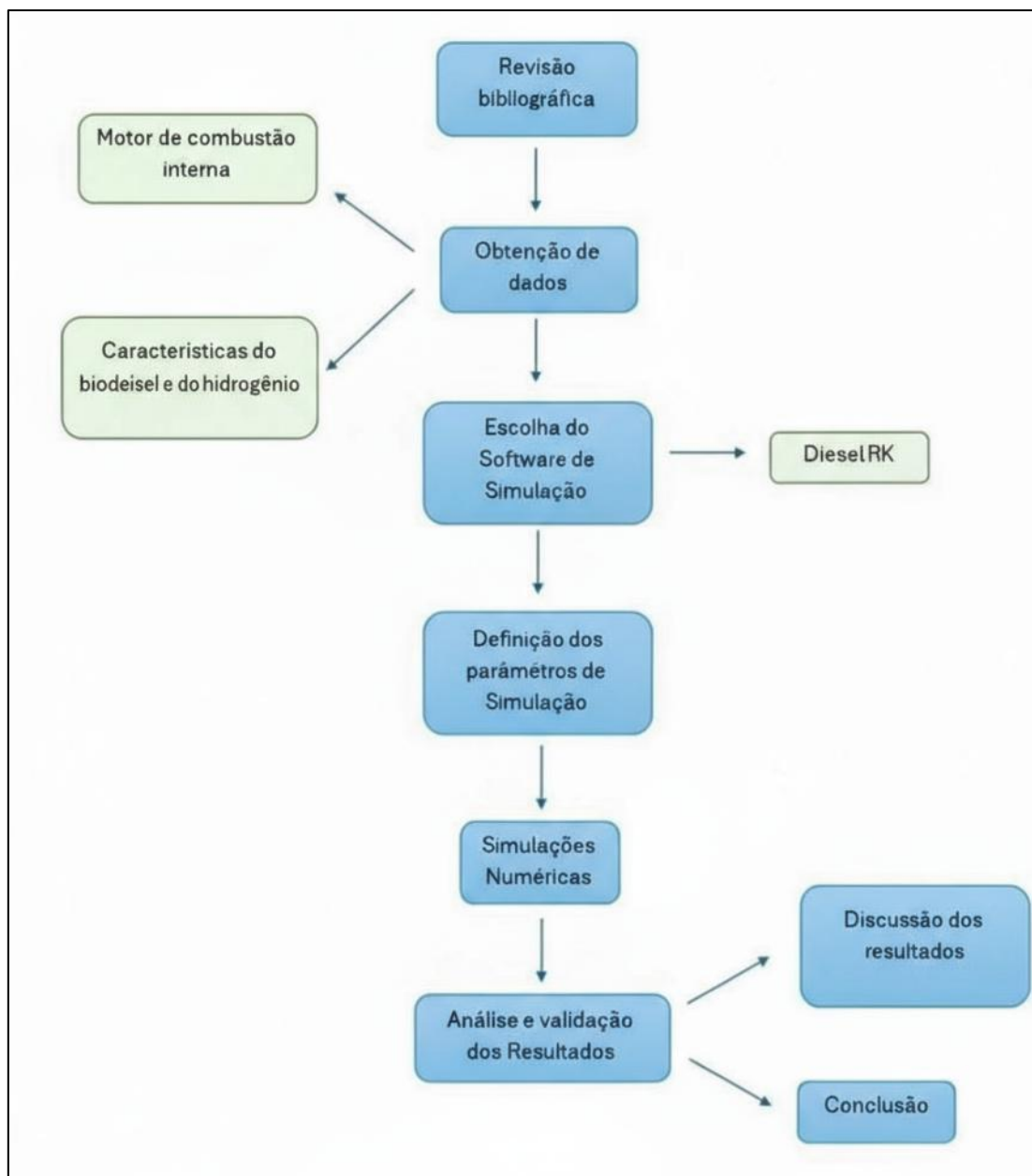


Figura 13 - fluxograma com os principais objetivos da pesquisa  
Fonte: Pesquisa Direta (2025)

Primeiramente, é realizada uma revisão bibliográfica a respeito do tema e de cada uma das palavras chaves deste trabalho, a fim de consolidar uma fundamentação teórica para facilitar o entendimento dessa pesquisa.

O segundo passo é destacar os principais pontos a respeito de cada palavra-chave que são obtidos a partir da revisão bibliográfica, caracterizando o motor analisado assim como os combustíveis.

Posteriormente é selecionado o software Diesel RK para realizar a simulação, utilizando os dados obtidos nos últimos passos como entrada, definindo-se os parâmetros da simulação. Feito isso, é realizada a simulação, possibilitando, por fim, a análise e validação dos resultados, assim como a discussão e a conclusão a respeito do que foi obtido nessa pesquisa.

Na simulação com o Diesel RK, inicialmente é utilizado o *Wizard*, que ajuda a realizar análises e estabelecer parâmetros preliminares para a simulação. Ao iniciar o *Wizard*, primeiramente é necessário selecionar o ciclo termodinâmico de funcionamento do motor, o combustível e o método de ignição como representado pela Figura 14.

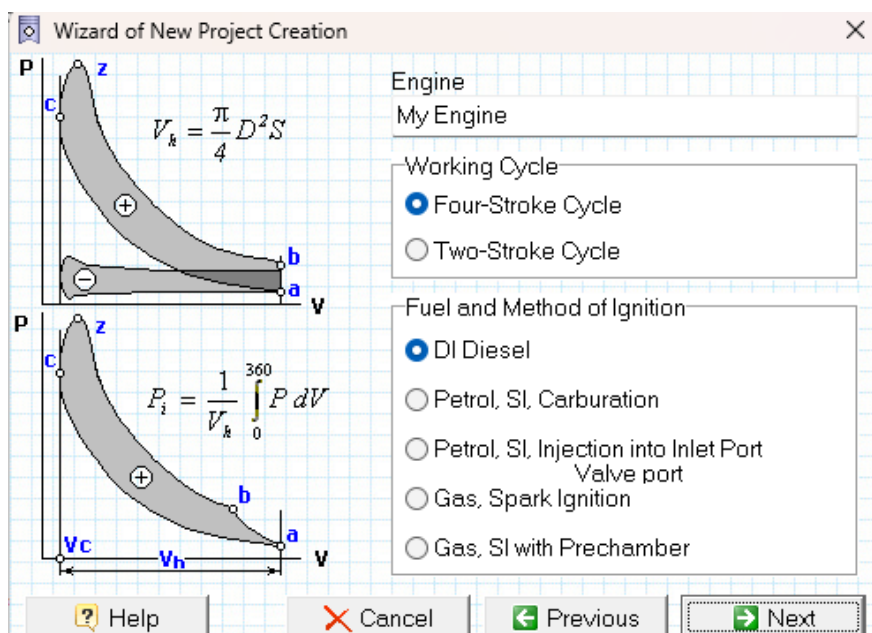


Figura 14 - Tela 1 de configuração do Diesel RK  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Feito isso, o próximo passo é selecionar o projeto do motor e o tipo de resfriamento utilizado por ele. A Figura 15 representa a página de configuração desses parâmetros.

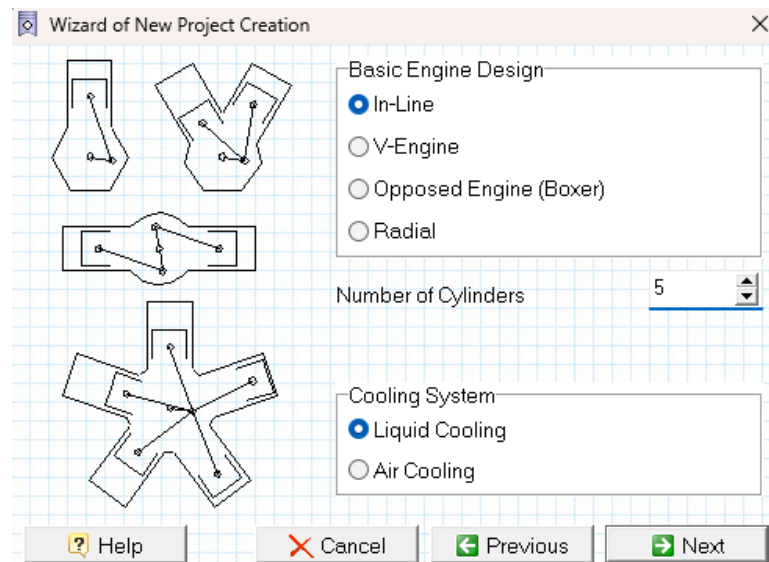


Figura 15 - Tela 2 de configuração do Diesel RK  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A próxima etapa é configurar o diâmetro do pistão, o curso do pistão, a rotação nominal do motor e a razão de compressão como representado pela Figura 16.

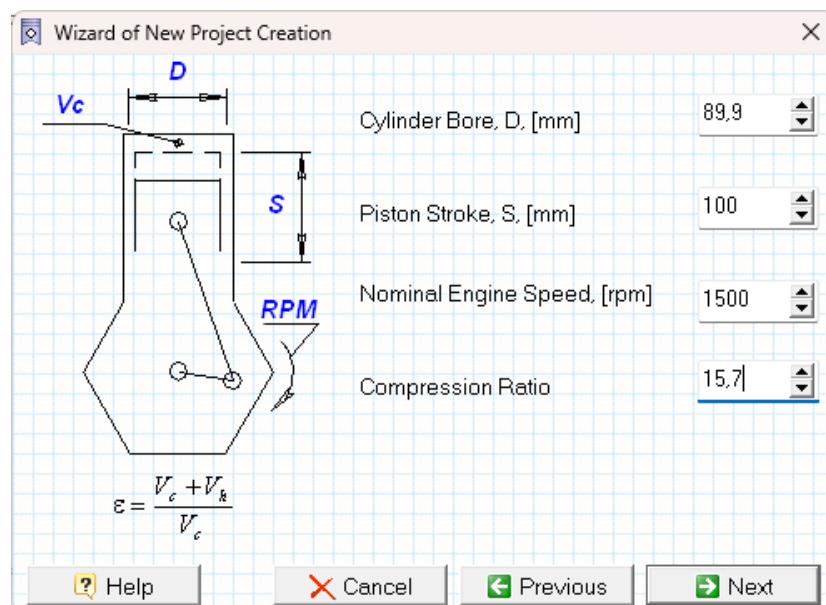


Figura 16 - Tela 3 de configuração do Diesel RK  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Depois do último passo é necessário inserir as informações a respeito da pressão, temperatura ambiente e o meio em que o motor é utilizado como mostrado na Figura 17.

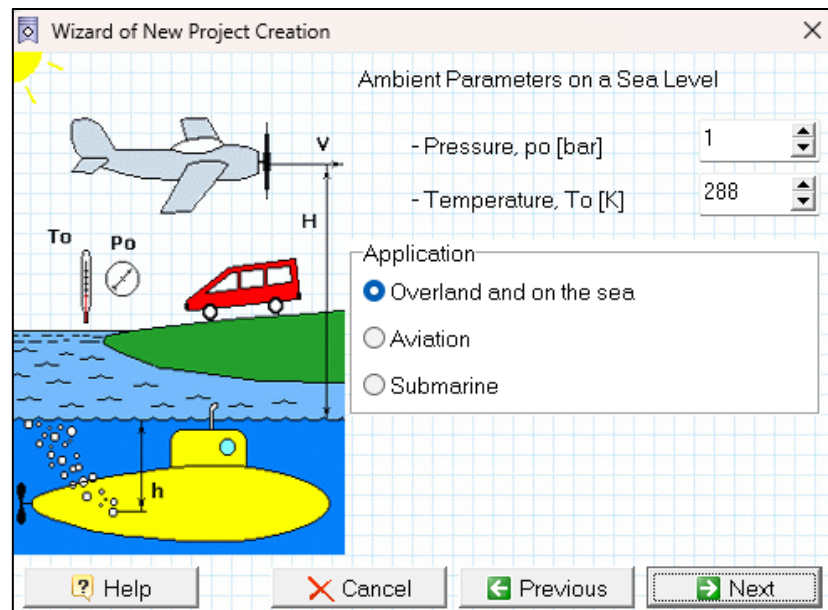


Figura 17 - Tela 4 de configuração do Diesel RK  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Por fim, deve-se configurar a última seção do *Wizard* que diz respeito a pressão do compressor do *Turbocharger* do motor, o número de válvulas ativas no motor e a pressão de injeção. Essa seção está representada pela Figura 18.

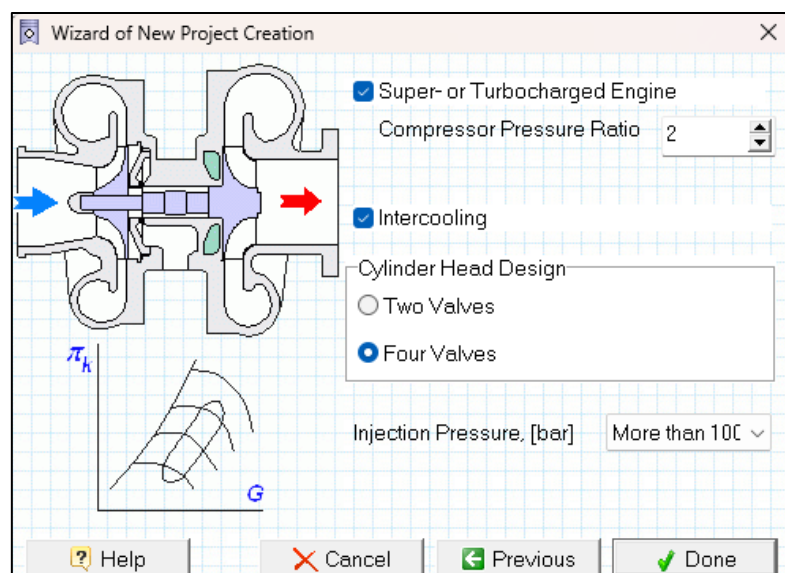


Figura 18 - Tela 5 de configuração do Diesel RK  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Durante a comparação dos dados são analisados os resultados em 3 blocos diferentes, parâmetros de potência e eficiência, o qual apresenta o torque, a potência e eficiência do motor, parâmetros de emissão, que comparam as emissões de CO<sub>2</sub>, formação de NO<sub>x</sub> e emissão de material particulado. Por fim, os resultados de consumo de combustível e perdas mecânicas, como o consumo específico de combustível por unidade de potência gerada, fator lambda total, massa de combustível por ciclo e pressão média de atrito. Essa metodologia permite avaliar os principais pontos de vantagens e desvantagens dos diferentes cenários.

### 3.3. Variáveis e Indicadores

Segundo Mita apud Gil (2020), as variáveis são elementos que podem ser medidos e analisados em uma pesquisa, elas podem ser de entrada (dados coletados) ou de saída (resultados obtidos após um processo) e sua importância reside na possibilidade de testar hipóteses e estabelecer relações entre diferentes fenômenos. Além disso, há, também, os indicadores, que são medidas quantitativas ou qualitativas que representam um fenômeno e permitem avaliar a hipótese da pesquisa e sua escolha depende de sua capacidade de refletir sobre os aspectos mais relevantes da hipótese (MITA apud WALLIMAN, 2020).

A Tabela 2 a seguir apresenta as principais variáveis e indicadores utilizados nesse trabalho.

Tabela 2 - Principais Variáveis e Indicadores Utilizados nesse Trabalho

| Variáveis                                            | Indicadores                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Motor de Combustão Interna de Ignição por Compressão | Torque, Potência, Eficiência Térmica, Consumo de Combustível, Relação Ar-Combustível, Pressão Média de Atrito, Formação de NO <sub>x</sub> , Emissão de Material Particulado e Emissão de CO <sub>2</sub> |
| Biodiesel                                            | Propriedades Físico-Químicas, Porcentagem em Volume                                                                                                                                                       |
| Hidrogênio                                           | Propriedades Físico-Químicas, Porcentagem em Volume                                                                                                                                                       |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

### 3.4. Instrumentos de Coleta de Dados

A presente pesquisa combina a simulação computacional com a revisão bibliográfica como instrumentos utilizados para a coleta de dados. A simulação, realizada no software Diesel-RK, fornece os dados primários sobre o desempenho do motor, provendo alguns dos pontos citados anteriormente, que são complementados e validados pelos dados secundários obtidos nas literaturas nas quais se baseia no capítulo de revisão bibliográfica deste trabalho.

### 3.5. Tabulação de dados

A simulação realizada no software Diesel RK fornece os resultados a respeito da utilização do hidrogênio e do biodiesel como combustíveis, que em conjunto com as informações obtidas na revisão bibliográfica, possibilita a análise da viabilidade da utilização de um reformador de hidrogênio, utilizado em um MCI, que possui o biodiesel como matéria prima. O software Microsoft Excel também é utilizado, com o intuito de organizar os dados e deixá-los de uma forma que facilite a compreensão dos resultados.

Vale ressaltar que devido às limitações do *software* na versão gratuita as misturas de biodiesel e hidrogênio são consideradas como apenas um combustível líquido, ou seja, as proporções volumétricas de hidrogênio são inseridas no combustível alterando-se as porcentagens de hidrogênio presentes em sua composição. Após a adição do hidrogênio fez-se necessária, para todos os cenários, a alteração dos parâmetros de poder calorífico inferior do combustível (MJ/kg), número de cetano, massa específica do combustível a 323 K ( $\text{kg/m}^3$ ), energia de ativação aparente para o processo de autoignição por compressão ou detonação em motores SI (kJ/mol), tensão superficial do combustível a 323 K (N/m), coeficiente de viscosidade dinâmica do combustível a 323 K ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), calor específico de vaporização (kJ/kg), capacidade térmica do combustível na temperatura do injetor [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ], massa molecular do combustível, fator de difusão em condições atmosféricas, temperatura do combustível (K), Pressão de vapor saturado em baixa temperatura (bar), Pressão de vapor saturado  $P_v$  na temperatura crítica (bar).

Esses parâmetros são inseridos no software na seção de configuração do combustível para os cenários B97,5H2,5, B95H5, B92,5H7,5 e B90H10 de acordo com as Figuras 19, 20, 21 e 22 respectivamente.

| Project Fuel Library                                                                          |            |         |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|--------------|
| Fuel Title                                                                                    | Fuel Group | Class   |              |
| Biofuel SME B 97,5 H2 5                                                                       | meu grupo  | Diese ▾ |              |
| Substance                                                                                     | SME        | H2      |              |
| % Volume                                                                                      | 97,5       | 2,5     | 0            |
|                                                                                               |            |         | 0            |
|                                                                                               |            |         | Check, apply |
| Composition (mass fractions)                                                                  |            |         |              |
| C                                                                                             | H          | O       |              |
| 0,771                                                                                         | 0,121      | 0,108   |              |
| Low Heating Value of fuel, [MJ/kg]                                                            |            |         | 37,2         |
| Apparent Activation Energy for Compression Autoignition process, or for SI Knocking, [kJ/mol] |            |         | 11           |
| Cetane Number                                                                                 |            |         | 53           |
| Density of fuel at 323 K, [kg/m <sup>3</sup> ]                                                |            |         | 875          |
| Surface Tension Factor of fuel at 323 K, [N/m]                                                |            |         | 0,042        |
| Dynamic Viscosity Coefficient of fuel at 323 K, [Pa s]                                        |            |         | 0,0043       |
| Specific Vaporization Heat, [kJ/kg]                                                           |            |         | 310          |
| Fuel Thermal Capacity at temperature of injector, [J/(kg*K)]                                  |            |         | 1900         |
| Molecular Mass of fuel                                                                        |            |         | 280          |
| Diffusion factor at atmospheric conditions Dpo, [s]                                           |            |         | 3,5E-10      |
| Fuel temperature, [K]                                                                         |            |         | 380          |
| Saturated vapour pressure at low T, bar                                                       |            |         | 465 K 0,001  |
| Saturated vapour pressure Pv at critical temperature, bar                                     |            |         | 786 K 1,576  |

Figura 19 - Configuração Mistura B97,5H2,5  
Fonte: Pesquisa Direta

| Project Fuel Library                                                                          |            |         |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|--------------|
| Fuel Title                                                                                    | Fuel Group | Class   |              |
| Biofuel SME B 95 H2 5                                                                         | meu grupo  | Diese ▾ |              |
| Substance                                                                                     | SME        | H2      |              |
| % Volume                                                                                      | 95         | 5       | 0            |
|                                                                                               |            |         | 0            |
|                                                                                               |            |         | Check, apply |
| Composition (mass fractions)                                                                  |            |         |              |
| C                                                                                             | H          | O       |              |
| 0,7731                                                                                        | 0,1188     | 0,1081  |              |
| Low Heating Value of fuel, [MJ/kg]                                                            |            |         | 38,2         |
| Apparent Activation Energy for Compression Autoignition process, or for SI Knocking, [kJ/mol] |            |         | 10           |
| Cetane Number                                                                                 |            |         | 54,5         |
| Density of fuel at 323 K, [kg/m <sup>3</sup> ]                                                |            |         | 865          |
| Surface Tension Factor of fuel at 323 K, [N/m]                                                |            |         | 0,041        |
| Dynamic Viscosity Coefficient of fuel at 323 K, [Pa s]                                        |            |         | 0,004        |
| Specific Vaporization Heat, [kJ/kg]                                                           |            |         | 295          |
| Fuel Thermal Capacity at temperature of injector, [J/(kg*K)]                                  |            |         | 1950         |
| Molecular Mass of fuel                                                                        |            |         | 268          |
| Diffusion factor at atmospheric conditions Dpo, [s]                                           |            |         | 3,9E-10      |
| Fuel temperature, [K]                                                                         |            |         | 380          |
| Saturated vapour pressure at low T, bar                                                       |            |         | 465 K 0,001  |
| Saturated vapour pressure Pv at critical temperature, bar                                     |            |         | 786 K 1,576  |

Figura 20 - Configuração Mistura B95H5  
Fonte: Pesquisa Direta

| Project Fuel Library                                                                          |        |            |        |                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------|--------|--------------------------------------------------|
| Fuel Title                                                                                    |        | Fuel Group | Class  |                                                  |
| Biofuel SME B 92.5 H2 7.5                                                                     |        | meu grupo  | Diesel |                                                  |
| Substance                                                                                     | SME    | H2         |        | <input checked="" type="checkbox"/> Check, apply |
| % Volume                                                                                      | 92.5   | 7.5        | 0      |                                                  |
| —                                                                                             |        |            |        |                                                  |
| Composition (mass fractions)                                                                  |        |            |        |                                                  |
| C                                                                                             | H      | O          |        |                                                  |
| 0.7731                                                                                        | 0.1188 | 0.1081     |        |                                                  |
| Low Heating Value of fuel, [MJ/kg]                                                            |        |            |        | 39.2                                             |
| Apparent Activation Energy for Compression Autoignition process, or for SI Knocking, [kJ/mol] |        |            |        | 9                                                |
| Cetane Number                                                                                 |        |            |        | 56                                               |
| Density of fuel at 323 K, [kg/m <sup>3</sup> ]                                                |        |            |        | 855                                              |
| Surface Tension Factor of fuel at 323 K, [N/m]                                                |        |            |        | 0.04                                             |
| Dynamic Viscosity Coefficient of fuel at 323 K, [Pa s]                                        |        |            |        | 0.0037                                           |
| Specific Vaporization Heat, [kJ/kg]                                                           |        |            |        | 280                                              |
| Fuel Thermal Capacity at temperature of injector, [J/(kg*K)]                                  |        |            |        | 2000                                             |
| Molecular Mass of fuel                                                                        |        |            |        | 256                                              |
| Diffusion factor at atmospheric conditions Dpo, [s]                                           |        |            |        | 4.3E-10                                          |
| Fuel temperature, [K]                                                                         |        |            |        | 380                                              |
| Saturated vapour pressure at low T, bar                                                       |        |            |        | 465 K 0.001                                      |
| Saturated vapour pressure Pv at critical temperature, bar                                     |        |            |        | 786 K 1.576                                      |

Figura 21 - Configuração Mistura B92,5H7,5  
Fonte: Pesquisa Direta

| Project Fuel Library                                                                          |        |            |        |                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------|--------|--------------------------------------------------|
| Fuel Title                                                                                    |        | Fuel Group | Class  |                                                  |
| Biofuel SME B 90 H2 10                                                                        |        | meu grupo  | Diesel |                                                  |
| Substance                                                                                     | SME    | H2         |        | <input checked="" type="checkbox"/> Check, apply |
| % Volume                                                                                      | 90     | 10         | 0      |                                                  |
| —                                                                                             |        |            |        |                                                  |
| Composition (mass fractions)                                                                  |        |            |        |                                                  |
| C                                                                                             | H      | O          |        |                                                  |
| 0.7731                                                                                        | 0.1188 | 0.1081     |        |                                                  |
| Low Heating Value of fuel, [MJ/kg]                                                            |        |            |        | 40.2                                             |
| Apparent Activation Energy for Compression Autoignition process, or for SI Knocking, [kJ/mol] |        |            |        | 8                                                |
| Cetane Number                                                                                 |        |            |        | 57.5                                             |
| Density of fuel at 323 K, [kg/m <sup>3</sup> ]                                                |        |            |        | 845                                              |
| Surface Tension Factor of fuel at 323 K, [N/m]                                                |        |            |        | 0.039                                            |
| Dynamic Viscosity Coefficient of fuel at 323 K, [Pa s]                                        |        |            |        | 0.0034                                           |
| Specific Vaporization Heat, [kJ/kg]                                                           |        |            |        | 265                                              |
| Fuel Thermal Capacity at temperature of injector, [J/(kg*K)]                                  |        |            |        | 2050                                             |
| Molecular Mass of fuel                                                                        |        |            |        | 244                                              |
| Diffusion factor at atmospheric conditions Dpo, [s]                                           |        |            |        | 4.7E-10                                          |
| Fuel temperature, [K]                                                                         |        |            |        | 380                                              |
| Saturated vapour pressure at low T, bar                                                       |        |            |        | 465 K 0.001                                      |
| Saturated vapour pressure Pv at critical temperature, bar                                     |        |            |        | 786 K 1.576                                      |

Figura 22 - Configuração Mistura B90H10  
Fonte: Pesquisa Direta

## 4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através da simulação computacional do sistema motor, a qual foi conduzida utilizando o *software* Diesel RK com dois combustíveis distintos. Primeiramente, realiza-se a modelagem com óleo diesel puro, etapa para validar a confiabilidade do modelo matemático, subsequentemente empregado nas análises posteriores. Em seguida, procede-se com a simulação utilizando uma combinação de hidrogênio e biodiesel, permitindo avaliar o desempenho do sistema quando alimentado pela mistura proposta.

Os processos de simulação numérica são executados integralmente no ambiente computacional Diesel RK, sendo os dados gerados processados e organizados através de ferramentas integradas do próprio software combinadas com planilhas eletrônicas. Finalmente, é realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos entre os diferentes cenários simulados, estratégia que possibilita uma interpretação visual e quantitativa do desempenho do motor sob as diferentes condições operacionais testadas.

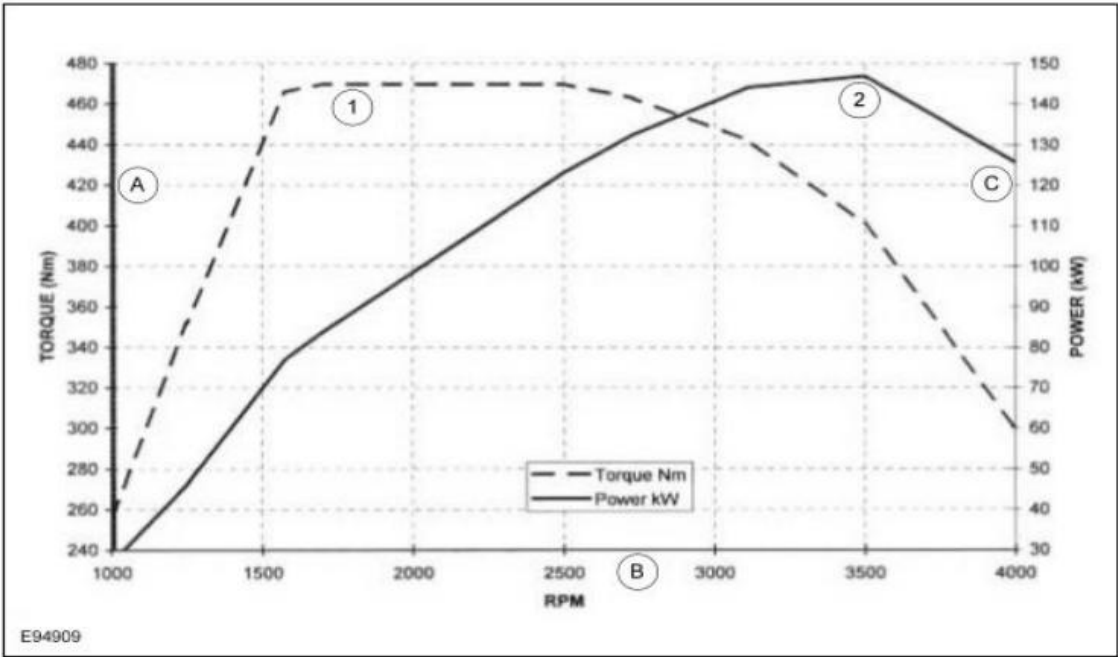
### 4.1. Validação do Software DIESEL-RK

Esta parte apresenta análise comparativa entre os dados experimentais do fabricante e os resultados obtidos através da simulação numérica. Inicialmente, apresenta-se o gráfico técnico, na Figura 23, que ilustra as curvas características de desempenho do motor, especificamente as variações de torque e potência em relação à rotação do motor. Esse gráfico, do catálogo da Ford, serve como referência para validação e calibração do modelo computacional desenvolvido.

#### 4.1.1. Características técnicas do motor avaliado

A figura 23 representa as curvas características de Torque e Potência em função da rotação fornecidas no catálogo da Ford.

Segundo o catálogo do fabricante, também se pode ter as informações técnicas do motor, como modelo, número de cilindros, tipo de arranjo, tipo de aspiração, rotação e potência máximos entre outros dados a respeito desse motor. Essas informações são apresentadas na Tabela 3.



| ITEM | DESCRIÇÃO         |
|------|-------------------|
| A    | Torque - (Nm)     |
| B    | Rotação - (RPM)   |
| C    | Potência - (Kw)   |
| 1    | Curva de Torque   |
| 2    | Curva de Potência |

Figura 23 - Ford Ranger 3.2 TDCi Oficial (original x modificado)  
Fonte: FORD MOTOR COMPANY (2024)

Tabela 3 - Parâmetros do Motor P5AT / Duratorq 3.2 TDCi- Ford Ranger 3.2 Duratorq TDCI (2015-2022)

| Parâmetro                            | Valor / descrição                                                       |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Código do motor                      | P5AT                                                                    |
| Arquitetura                          | 5 cilindros em linha (I5)                                               |
| Deslocamento (cilindrada)            | 3.198 cm <sup>3</sup> (3,2 L)                                           |
| Diâmetro (bore)                      | 89,9 mm                                                                 |
| Curso (stroke)                       | 100,7 mm                                                                |
| Taxa de compressão                   | 15,5:1                                                                  |
| Comando / cabeçote                   | DOHC (duplo comando no cabeçote)                                        |
| Nº de válvulas                       | 20 válvulas (4 por cilindro)                                            |
| Sistema de injeção                   | Diesel common-rail (injeção direta)                                     |
| Sobrealimentação                     | Turbo (turbocompressor) / “turbo-diesel” (varia por calibração/mercado) |
| Potência máxima                      | 143,5 KW @ 3000 rpm (típico 2015+)                                      |
| Torque máximo                        | 470 N·m @ 1750–2500 rpm (típico 2015+)                                  |
| Faixa de rotação (redline/limitador) | Pode variar por ECU/mercado                                             |
| Condição de operação                 | Full load                                                               |

Fonte: Adaptado de Ford Motor Company (2024).

#### 4.1.2. Procedimento de validação do modelo computacional

A validação do modelo computacional é realizada por meio da comparação direta entre os resultados obtidos no software Diesel-RK e os dados reais fornecidos pelo catálogo técnico oficial do fabricante para o motor 3.2L Duratorq TDCi.

A condição de operação adotada é carga plena (*full load*), uma vez que as curvas oficiais de torque e potência são fornecidas nessas condições, permitindo comparação direta e consistente. A validação é conduzida ao longo de uma faixa de rotação

compreendida entre 1250 rpm e 3500 rpm, correspondente à faixa operacional do motor em regime de carga máxima.

#### 4.1.3. Comparação entre torque real e torque simulado

Após a realização da simulação para a faixa de rotação de 1250 a 3500 rpm é possível obter as Tabelas 4 e 5 que apresentam, respectivamente, os dados obtidos a respeito do torque e potência para as diferentes rotações e os compara com os dados reais aproximados retirados da Figura 11.

Tabela 4 - Comparação entre torque real e torque simulado

| Rotação do Motor (RPM) | Torque Simulado (Nm) | Torque Real (Nm) | Erro  |
|------------------------|----------------------|------------------|-------|
| 1250                   | 341,03               | 340,00           | 0,30% |
| 1500                   | 441,37               | 440,00           | 0,31% |
| 1750                   | 467,65               | 470,00           | 0,50% |
| 2000                   | 474,87               | 470,00           | 1,04% |
| 2250                   | 468,47               | 470,00           | 0,33% |
| 2500                   | 462,47               | 470,00           | 1,60% |
| 2750                   | 452,55               | 460,00           | 1,62% |
| 3000                   | 451,18               | 450,00           | 0,26% |
| 3250                   | 419,27               | 430,00           | 2,50% |
| 3500                   | 389,60               | 400,00           | 2,60% |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A análise dos resultados indica que o modelo computacional apresenta boa concordância com os dados reais, especialmente na faixa de rotação correspondente ao pico de torque do motor.

Tabela 5 - Comparação entre potência real e potência simulada

| Rotação do Motor (RPM) | Potência Simulada (KW) | Potência Real (KW) | Erro  |
|------------------------|------------------------|--------------------|-------|
| 1250                   | 44,64                  | 45,00              | 0,80% |
| 1500                   | 69,33                  | 70,00              | 0,96% |
| 1750                   | 85,7                   | 85,00              | 0,82% |
| 2000                   | 99,45                  | 100,00             | 0,55% |
| 2250                   | 110,37                 | 110,00             | 0,34% |
| 2500                   | 121,07                 | 120,00             | 0,89% |
| 2750                   | 130,31                 | 130,00             | 0,24% |
| 3000                   | 141,73                 | 140,00             | 1,24% |
| 3250                   | 142,68                 | 143,00             | 0,22% |
| 3500                   | 142,79                 | 143,50             | 0,49% |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Os resultados mostram que a potência máxima simulada apresenta erro inferior a 3%, indicando adequada calibração das perdas mecânicas e do balanço energético global do modelo. A forma da curva de potência simulada reproduz corretamente o comportamento do motor real, com pico ocorrendo na faixa de rotação esperada.

#### 4.1.4. Métricas globais de erro

Os erros observados permanecem, em sua maioria, inferiores a 3% ao longo da faixa útil de operação do motor, sendo considerados aceitáveis para estudos computacionais de validação preliminar. As maiores discrepâncias concentram-se em regimes de baixa rotação, atribuídas à ausência de modelagem explícita das estratégias de controle eletrônico presentes no motor real. A Tabela 6 apresenta as métricas globais de validação do *software*.

Tabela 6 - Métricas globais de validação do modelo

| Grandeza | Erro Máx | Erro Médio | Erro no Pico |
|----------|----------|------------|--------------|
| Potência | 1,24%    | 0,66%      | 0,49%        |
| Torque   | 2,60%    | 1,11%      | 1,60%        |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Dessa forma, conclui-se que o modelo desenvolvido no *software* Diesel-RK reproduz satisfatoriamente o comportamento do motor real, estando validado para a realização de análises comparativas entre diferentes combustíveis e misturas, objetivo central deste trabalho.

#### **4.2. Cenário Diesel (Referência Comparativa)**

Nessa etapa inicial das simulações é apresentada a base comparativa do estudo, correspondente à simulação do motor operando com combustível diesel convencional. O objetivo principal desta etapa é estabelecer um referencial técnico consistente para a avaliação posterior do desempenho, da eficiência energética e das emissões quando o mesmo motor é alimentado com biodiesel B100, biodiesel 100 e 2,5%, 5%, 7% e 10% em volume de hidrogênio. Dessa forma, todos os resultados obtidos para os demais cenários são analisados de maneira relativa, tomando-se o funcionamento com diesel como condição de referência.

As simulações são realizadas utilizando o mesmo modelo termodinâmico do motor, mantendo-se inalterados os parâmetros geométricos, construtivos e operacionais, tais como taxa de compressão, sistema de injeção, condições de admissão e condições ambientais. A única variável alterada nesta etapa corresponde às propriedades físico-químicas do combustível, garantindo que as diferenças observadas nos resultados sejam atribuídas exclusivamente ao tipo de combustível empregado.

A análise do motor a diesel é conduzida em uma faixa de rotação compreendida entre 1250 e 3500 rpm, abrangendo condições típicas de operação em regimes de baixa, média e alta rotação. Para cada ponto de rotação, são avaliados parâmetros fundamentais de desempenho, eficiência e emissões, incluindo torque efetivo, potência efetiva, consumo específico de combustível, eficiência térmica do motor, pressão média efetiva (FMEP), razão ar-combustível equivalente ( $\lambda$ ), massa de combustível injetada por ciclo e emissões específicas de poluentes, esses dados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da Simulação do Cenário a Diesel

| RPM                                                        | 1250   | 1500   | 1750   | 2000   | 2250   | 2500   | 2750   | 3000   | 3250   | 3500   |
|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TORQUE SIMULADO (Nm)                                       | 341,03 | 441,37 | 467,65 | 474,87 | 468,47 | 462,47 | 452,55 | 451,18 | 419,27 | 389,60 |
| POTÊNCIA SIMULADA (KW)                                     | 44,64  | 69,33  | 85,70  | 99,45  | 110,37 | 121,07 | 130,31 | 141,73 | 142,68 | 142,79 |
| CONSUMO ESPECÍFICO POR UNIDADE DE POTÊNCIA GERADA (kg/kWh) | 0,23   | 0,23   | 0,22   | 0,22   | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,22   | 0,22   | 0,23   |
| EFICIÊNCIA DO MOTOR                                        | 0,38   | 0,37   | 0,38   | 0,39   | 0,39   | 0,40   | 0,40   | 0,38   | 0,38   | 0,38   |
| PRESSÃO MÉDIA DE ATRITO (bar)                              | 1,46   | 1,78   | 1,95   | 2,13   | 2,27   | 2,37   | 2,50   | 2,50   | 2,54   | 2,58   |
| LAMBDA TOTAL                                               | 1,34   | 1,18   | 1,22   | 1,32   | 1,41   | 1,44   | 1,52   | 1,34   | 1,40   | 1,46   |
| MASSA DE COMBUSTÍVEL POR CICLO (g/ciclo)                   | 0,05   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,06   |
| CONCENTRAÇÃO DE NOx NO GÁS DE ESCAPE SECO (ppm)            | 0,54   | 0,01   | 0,01   | 0,39   | 5,28   | 10,76  | 53,60  | 0,80   | 4,13   | 12,84  |
| MATERIAL PARTICULADO (g/kWh)                               | 0,55   | 0,73   | 0,66   | 0,43   | 0,28   | 0,24   | 0,22   | 0,54   | 0,44   | 0,36   |
| EMISSÃO DE CO2 (g/kWh)                                     | 727,64 | 729,45 | 714,70 | 698,13 | 691,39 | 690,48 | 689,88 | 715,01 | 718,35 | 725,37 |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Os resultados obtidos para o torque e a potência indicam o comportamento esperado de um motor diesel, com crescimento progressivo do torque até a região de rotações intermediárias, seguido por redução gradual em regimes mais elevados, enquanto a potência efetiva apresenta aumento contínuo ao longo da faixa analisada.

O consumo específico de combustível apresenta tendência de redução à medida que o motor se aproxima da faixa de maior eficiência, atingindo valores mínimos em rotações intermediárias, e voltando a crescer em regimes elevados, em função do aumento das perdas mecânicas e da redução da eficiência volumétrica. Consequentemente, a eficiência térmica do motor acompanha esse comportamento, apresentando valores máximos próximos à região de torque máximo.

A pressão média efetiva aumenta progressivamente com a rotação do motor, refletindo o crescimento das perdas por atrito nos componentes móveis, como pistões, anéis, mancais e sistema de válvulas. Esse parâmetro é fundamental para a análise comparativa, pois influencia diretamente a eficiência global e a potência efetiva disponível no eixo do motor.

Em relação à mistura ar–combustível, os valores de lambda total permanecem consistentemente acima da unidade ao longo de toda a faixa de operação, caracterizando o funcionamento típico de motores diesel com mistura pobre. A massa de combustível injetada por ciclo varia de acordo com a rotação e a carga do motor, sendo ajustada de forma a atender à demanda de torque e potência em cada condição simulada.

No que se refere às emissões, observa-se que as emissões de material particulado (PM) apresentam tendência de redução em rotações intermediárias, associada à melhora na qualidade da combustão, voltando a crescer levemente em regimes mais elevados. As emissões específicas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) acompanham o comportamento do consumo específico de combustível, refletindo diretamente a eficiência energética do motor. Em relação às emissões de  $\text{NO}_x$ , a estimativa desse poluente software, na versão gratuita, é calculada exclusivamente pelo mecanismo térmico de Zeldovich. Por isso, os valores de  $\text{NO}_x$  obtidos devem ser interpretados com cautela, pois essa abordagem pode superestimar as emissões de  $\text{NO}_x$  do motor Diesel, especialmente na condição de 2750 rpm, quando a modelagem tende a ficar mais sensível aos picos de temperatura e ao tempo disponível para formação térmica de NO.

Dessa forma, o conjunto de resultados obtidos para o motor operando com diesel estabelece uma referência coerente para a análise comparativa desenvolvida nos cenários subsequentes. Como próximos passos, esses mesmos parâmetros serão avaliados para o motor, permitindo uma comparação direta e técnica dos efeitos do combustível renovável sobre o desempenho, a eficiência e as emissões do motor.

#### **4.3. Cenário 1 (Biodiesel 100)**

Neste cenário são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da simulação do motor operando com biodiesel puro (B100). O objetivo desta etapa é avaliar o impacto da substituição do diesel convencional pelo biodiesel B100 sobre o desempenho, a eficiência energética e as emissões do motor, mantendo-se inalteradas todas as demais condições de operação e parâmetros do modelo.

Assim como no cenário de referência, as simulações são realizadas para uma faixa de rotação compreendida entre 1250 e 3500 rpm, contemplando regimes de baixa, média e alta rotação na Tabela 8. Todos os parâmetros geométricos, construtivos e operacionais do motor foram preservados, garantindo que as diferenças observadas nos resultados sejam atribuídas exclusivamente às propriedades físico-químicas do biodiesel.

Tabela 8 - Resultado da Simulação do Cenário B100

| RPM                                                        | 1250   | 1500   | 1750   | 2000   | 2250   | 2500   | 2750   | 3000   | 3250   | 3500   |
|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TORQUE SIMULADO (Nm)                                       | 326,30 | 426,54 | 452,60 | 458,91 | 452,96 | 446,16 | 435,27 | 437,15 | 405,83 | 377,12 |
| POTÊNCIA SIMULADA (KW)                                     | 42,71  | 67,00  | 82,94  | 96,11  | 106,72 | 116,80 | 125,34 | 137,32 | 138,11 | 138,21 |
| CONSUMO ESPECÍFICO POR UNIDADE DE POTÊNCIA GERADA (kg/kWh) | 0,27   | 0,27   | 0,26   | 0,26   | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,26   | 0,26   | 0,27   |
| EFICIÊNCIA DO MOTOR                                        | 0,37   | 0,37   | 0,38   | 0,39   | 0,39   | 0,39   | 0,39   | 0,38   | 0,38   | 0,37   |
| PRESSÃO MÉDIA DE ATRITO (bar)                              | 1,43   | 1,76   | 1,94   | 2,12   | 2,27   | 2,36   | 2,51   | 2,52   | 2,56   | 2,59   |
| LAMBDA TOTAL                                               | 1,34   | 1,18   | 1,22   | 1,32   | 1,41   | 1,44   | 1,52   | 1,34   | 1,40   | 1,46   |
| MASSA DE COMBUSTÍVEL POR CICLO (g/ciclo)                   | 0,06   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,07   | 0,07   |
| CONCENTRAÇÃO DE NOx NO GÁS DE ESCAPE SECO (ppm)            | 5,68   | 0,08   | 0,33   | 8,51   | 95,34  | 164,45 | 610,45 | 21,16  | 91,17  | 226,59 |
| MATERIAL PARTICULADO (g/kWh)                               | 0,66   | 0,76   | 0,65   | 0,37   | 0,20   | 0,17   | 0,09   | 0,37   | 0,29   | 0,23   |
| EMIÇÃO DE CO <sub>2</sub> (g/kWh)                          | 774,32 | 768,02 | 751,41 | 734,85 | 727,25 | 727,74 | 728,56 | 749,76 | 754,09 | 761,97 |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

#### 4.3.1. Comparação com o Cenário Diesel

Nesta subseção são apresentados os parâmetros de desempenho mecânico do motor, compreendendo torque efetivo, potência efetiva e eficiência térmica. A comparação direta entre o diesel convencional e o biodiesel puro (B100) permite avaliar os impactos energéticos da substituição do combustível fóssil por uma alternativa renovável, verificando possíveis alterações na capacidade de geração de trabalho útil e no rendimento do ciclo termodinâmico.

A Tabela 9 apresenta a comparação dos parâmetros de desempenho com o cenário do diesel e as Figuras 24, 25 e 26 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 9 - Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B100)

| RPM  | Torque Diesel (Nm) | Torque B100 (Nm) | Potência Diesel (kW) | Potência B100 (kW) | Eficiência Diesel | Eficiência B100 |
|------|--------------------|------------------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| 1250 | 341,03             | 326,30           | 44,64                | 42,71              | 0,38              | 0,37            |
| 1500 | 441,37             | 426,54           | 69,33                | 67,00              | 0,37              | 0,37            |
| 1750 | 467,65             | 452,60           | 85,70                | 82,94              | 0,38              | 0,38            |
| 2000 | 474,87             | 458,91           | 99,45                | 96,11              | 0,39              | 0,39            |
| 2250 | 468,47             | 452,96           | 110,37               | 106,72             | 0,39              | 0,39            |
| 2500 | 462,47             | 446,16           | 121,07               | 116,80             | 0,40              | 0,39            |
| 2750 | 452,55             | 435,27           | 130,31               | 125,34             | 0,40              | 0,39            |
| 3000 | 451,18             | 437,15           | 141,73               | 137,32             | 0,38              | 0,38            |
| 3250 | 419,27             | 405,83           | 142,68               | 138,11             | 0,38              | 0,38            |
| 3500 | 389,60             | 377,12           | 142,79               | 138,21             | 0,38              | 0,37            |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Os resultados de torque e potência efetiva indicam que o motor operando com biodiesel B100 apresenta comportamento global semelhante ao observado com o diesel, porém com valores absolutos ligeiramente inferiores em praticamente toda a faixa de rotação. Esse comportamento está diretamente associado ao menor poder calorífico do biodiesel, o que exige maior massa de combustível para a geração da mesma quantidade de energia útil.

O torque efetivo apresenta crescimento progressivo até as rotações intermediárias, seguido por redução gradual em regimes mais elevados, reproduzindo a tendência típica de motores a diesel. A potência efetiva, por sua vez, cresce de forma contínua com o aumento da rotação, atingindo valores máximos próximos ao regime de 3500 rpm. Apesar da redução em relação ao diesel, os valores obtidos demonstram que o biodiesel B100 é capaz de sustentar níveis de potência compatíveis com a aplicação do motor analisado.

A eficiência térmica do motor operando com B100 apresenta valores próximos aos obtidos com diesel, com leve redução em alguns pontos de operação. Esse comportamento indica que, embora seja necessária uma maior massa de combustível para compensar o menor poder calorífico, o processo de combustão do biodiesel mantém um bom aproveitamento da energia química disponível.

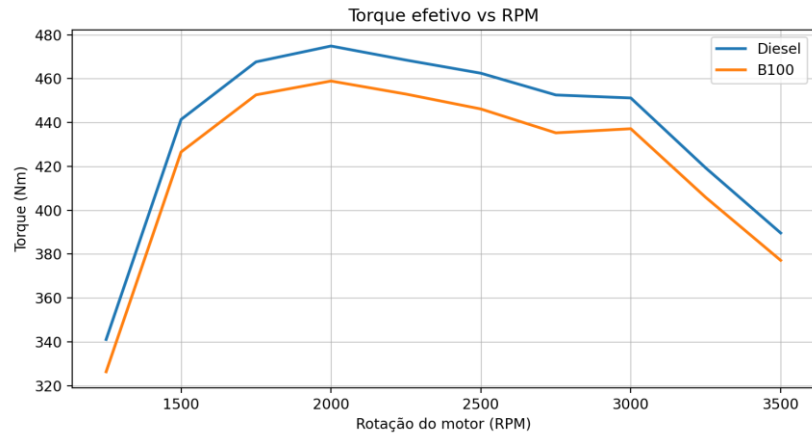


Figura 24 - Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

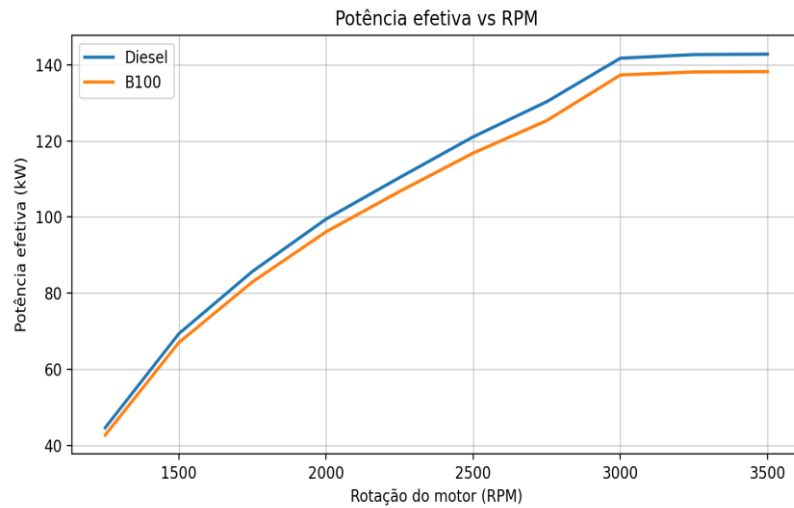


Figura 25 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

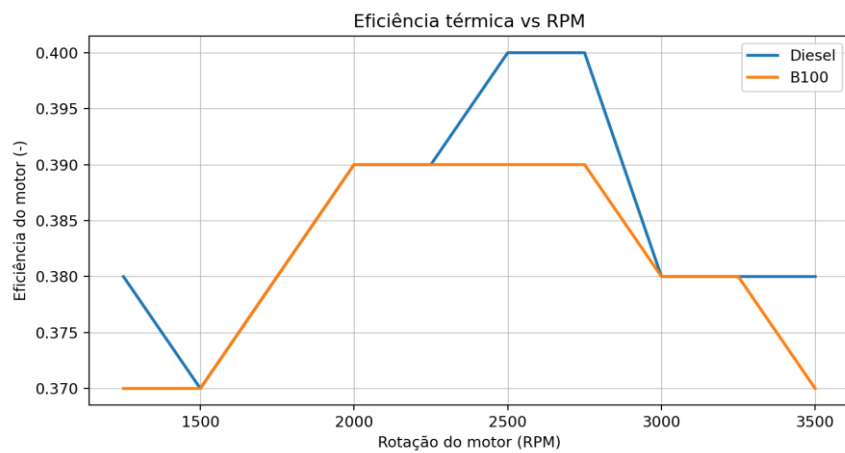


Figura 26 - Gráfico Comparativo de Eficiência Térmica (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 10 apresenta a comparação dos parâmetros de consumo e perdas com o cenário do diesel e as Figuras 27, 28 e 29 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 10 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B100)

| RPM  | Consumo esp. Diesel (kg/kWh) | Consumo esp. B100 (kg/kWh) | $\lambda$ Diesel (-) | $\lambda$ B100 (-) | PMA Diesel (bar) | PMA B100 (bar) |
|------|------------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|------------------|----------------|
| 1250 | 0,23                         | 0,27                       | 1,34                 | 1,34               | 1,46             | 1,43           |
| 1500 | 0,23                         | 0,27                       | 1,18                 | 1,18               | 1,78             | 1,76           |
| 1750 | 0,22                         | 0,26                       | 1,22                 | 1,22               | 1,95             | 1,94           |
| 2000 | 0,22                         | 0,26                       | 1,32                 | 1,32               | 2,13             | 2,12           |
| 2250 | 0,21                         | 0,25                       | 1,41                 | 1,41               | 2,27             | 2,27           |
| 2500 | 0,21                         | 0,25                       | 1,44                 | 1,44               | 2,37             | 2,36           |
| 2750 | 0,21                         | 0,25                       | 1,52                 | 1,52               | 2,50             | 2,51           |
| 3000 | 0,22                         | 0,26                       | 1,34                 | 1,34               | 2,50             | 2,52           |
| 3250 | 0,22                         | 0,26                       | 1,40                 | 1,40               | 2,54             | 2,56           |
| 3500 | 0,23                         | 0,27                       | 1,46                 | 1,46               | 2,58             | 2,59           |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

O consumo específico de combustível corrigido apresenta valores superiores aos observados no modelo a diesel, refletindo diretamente o menor conteúdo energético do biodiesel. Observa-se, contudo, que o perfil do consumo específico ao longo da faixa de rotação permanece coerente, com valores mínimos concentrados na região de rotações intermediárias, onde o motor opera com maior eficiência global.

A pressão média efetiva apresenta crescimento com o aumento da rotação, comportamento consistente com o observado no modelo a diesel. Isso indica que a substituição do combustível não altera de forma significativa as perdas mecânicas internas do motor, uma vez que estas estão majoritariamente associadas aos componentes mecânicos e ao regime de operação, que se mantêm os mesmos para todos os cenários.

Os valores da razão ar-combustível equivalente ( $\lambda$ ) permanecem com valores acima de um em toda a faixa de operação. Nota-se, portanto, que o biodiesel permite operar com valores ligeiramente mais elevados de  $\lambda$ , resultado da presença de oxigênio no combustível, o que contribui para uma combustão mais completa.

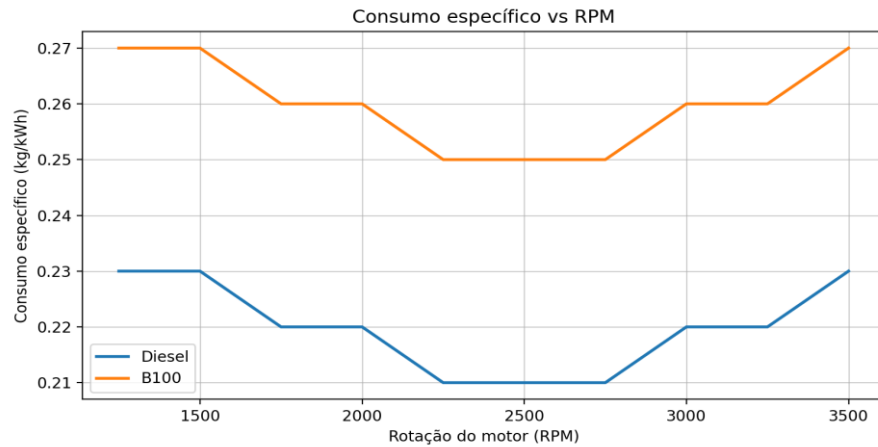


Figura 27 - Gráfico Comparativo de Consumo Específico (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

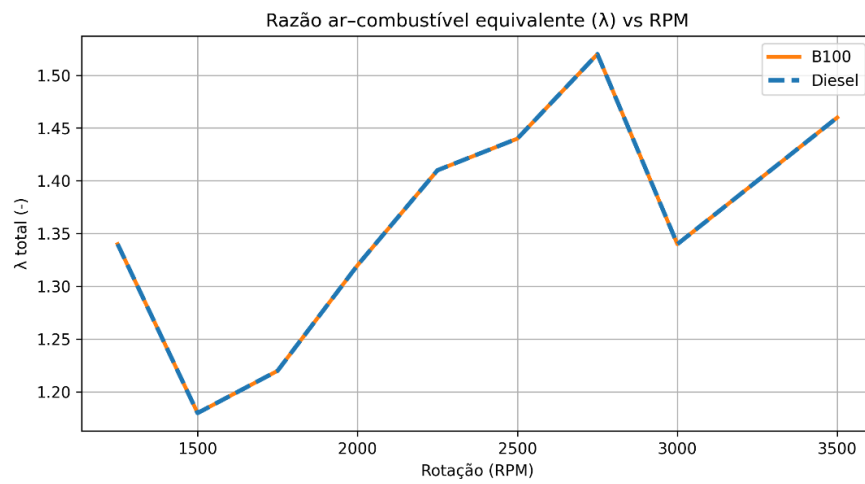


Figura 28 - Gráfico Comparativo de Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

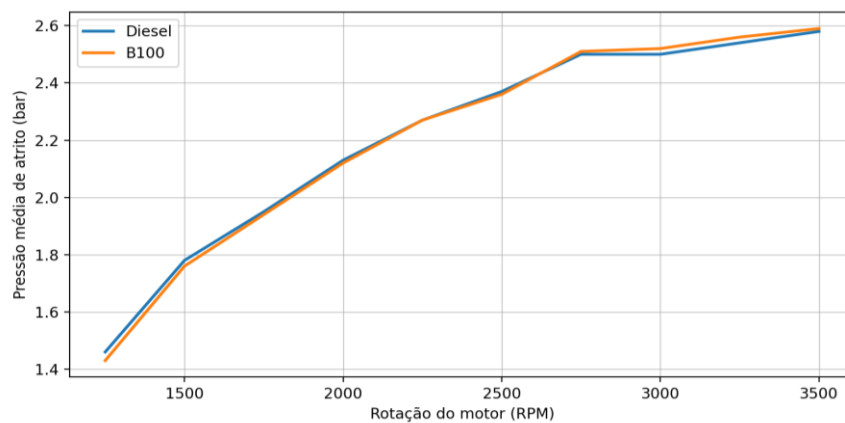


Figura 29 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 11 apresenta a comparação dos parâmetros de emissão com o cenário do diesel e as Figuras 30, 31 e 32 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 11 - Comparação dos Resultados das Emissões do Motor (Diesel X B100)

| RPM  | NOx Diesel (ppm) | NOx B100 (ppm) | MP Diesel (g/kWh) | MP B100 (g/kWh) | CO <sub>2</sub> Diesel (g/kWh) | CO <sub>2</sub> B100 (g/kWh) |
|------|------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1250 | 0,54             | 5,68           | 0,55              | 0,66            | 727,64                         | 774,32                       |
| 1500 | 0,01             | 0,08           | 0,73              | 0,76            | 729,45                         | 768,02                       |
| 1750 | 0,01             | 0,33           | 0,66              | 0,65            | 714,70                         | 751,41                       |
| 2000 | 0,39             | 8,51           | 0,43              | 0,37            | 698,13                         | 734,85                       |
| 2250 | 5,28             | 95,34          | 0,28              | 0,20            | 691,39                         | 727,25                       |
| 2500 | 10,76            | 164,45         | 0,24              | 0,17            | 690,48                         | 727,74                       |
| 2750 | 53,60            | 610,45         | 0,22              | 0,09            | 689,88                         | 728,56                       |
| 3000 | 0,80             | 21,16          | 0,54              | 0,37            | 715,01                         | 749,76                       |
| 3250 | 4,13             | 91,17          | 0,44              | 0,29            | 718,35                         | 754,09                       |
| 3500 | 12,84            | 226,59         | 0,36              | 0,23            | 725,37                         | 761,97                       |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

No que se refere às emissões, o biodiesel B100 apresenta comportamento distinto em relação ao diesel. As emissões de material particulado mostram redução significativa em praticamente toda a faixa de rotação atribuídas ao caráter oxigenado do combustível e à melhor oxidação da fuligem.

Em contrapartida, observou-se um aumento expressivo nas emissões de NO<sub>x</sub>, especialmente nas rotações entre 2500 e 3000 rpm, com destaque para 2750 rpm. Tal comportamento está associado às maiores temperaturas locais de combustão e à maior disponibilidade de oxigênio. Ressalta-se que, na versão gratuita do software, a formação de NO<sub>x</sub> é modelada exclusivamente pelo mecanismo térmico de Zeldovich, o que pode levar à superestimação dos valores previstos, particularmente para o B100.

As emissões específicas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) apresentam valores próximos aos observados no diesel, com pequenas variações. Embora o CO<sub>2</sub> emitido na combustão do biodiesel possa ser considerado neutro do ponto de vista do ciclo de carbono, sua quantificação permanece relevante para a análise energética e comparativa entre os diferentes combustíveis.

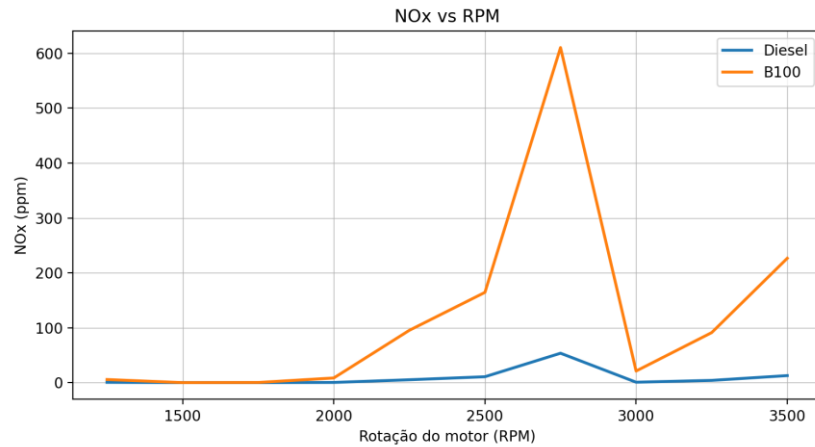


Figura 30 - Gráfico Comparativo de Emissão de NOx (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

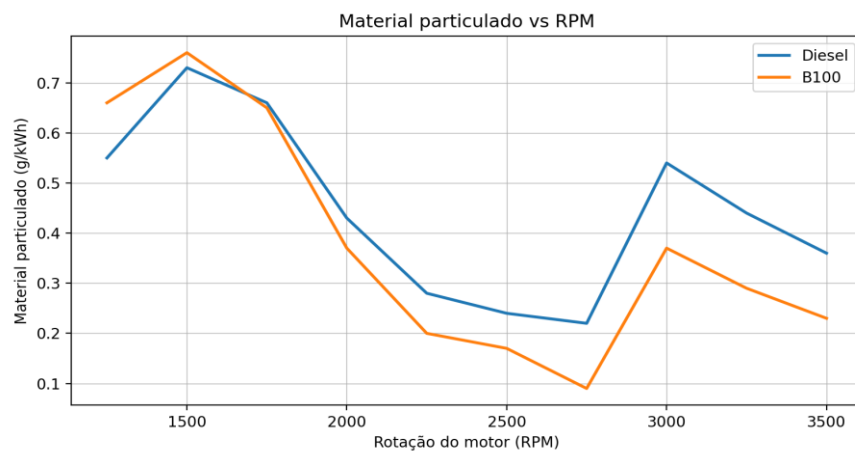


Figura 31 - Gráfico Comparativo da Emissão de Material Particulado (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

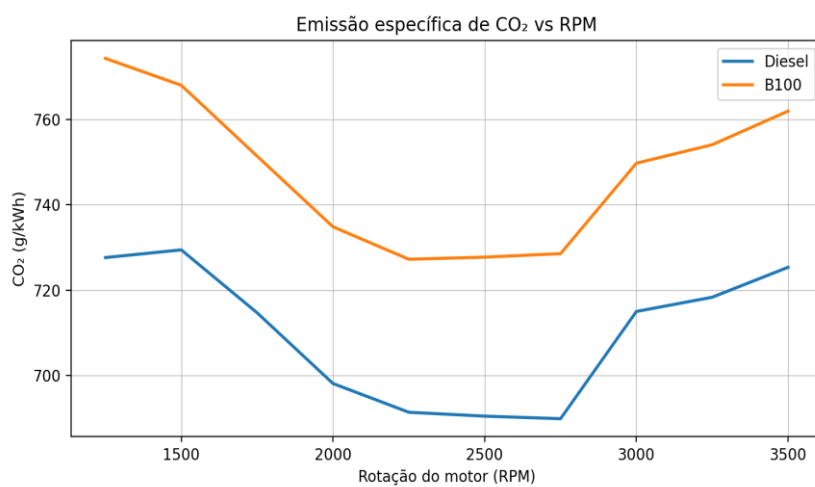


Figura 32 - Gráfico Comparativo da Emissão Específica de CO<sub>2</sub> (Diesel X B100)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Por fim, os resultados obtidos demonstram que o biodiesel B100 pode ser utilizado como combustível em motores diesel convencionais com desempenho global satisfatório, porém ainda menor quando comparado com o diesel mineral, mantendo níveis adequados de torque, potência e eficiência.

Nesse contexto, a adição de hidrogênio ao biodiesel surge como uma alternativa promissora para melhorar a eficiência da combustão e mitigar algumas das limitações observadas. Nas próximas seções deste capítulo são apresentados os resultados das simulações do motor operando com misturas de biodiesel B100 e diferentes percentuais de hidrogênio, permitindo uma avaliação progressiva e comparativa dos efeitos dessa estratégia.

#### **4.4. Cenário 2 (Biodiesel 97,5% + hidrogênio 2,5% - B97,5H2,5)**

Neste cenário são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação do motor operando com uma mistura composta por 97,5% de biodiesel e 2,5% de hidrogênio (B97,5H2,5) em base energética, com o objetivo de avaliar os efeitos da adição de pequenas frações de hidrogênio sobre o desempenho termodinâmico, o consumo de combustível e as emissões do motor.

Assim como nos blocos precedentes, as simulações são realizadas para a faixa de rotação entre 1250 e 3500 rpm, contemplando regimes de baixa, média e alta rotação. Todos os parâmetros geométricos, construtivos e operacionais do motor são mantidos inalterados, incluindo taxa de compressão, estratégia de injeção, condições de admissão e modelos de perdas mecânicas, garantindo que as diferenças observadas sejam atribuídas exclusivamente à alteração na composição do combustível.

A Tabela 12 apresenta os valores simulados de torque, potência efetiva, consumo específico de combustível, eficiência do motor, pressão média de atrito, razão ar-combustível equivalente ( $\lambda$ ), massa de combustível injetada por ciclo e emissões de NO<sub>x</sub>, material particulado e CO<sub>2</sub> para cada ponto de operação.

Tabela 12 – Resultado da Simulação do Cenário B97,5H2,5

| RPM                                                        | 1250   | 1500   | 1750   | 2000   | 2250   | 2500   | 2750   | 3000   | 3250   | 3500   |
|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TORQUE SIMULADO (Nm)                                       | 335,33 | 437,18 | 463,91 | 470,10 | 464,13 | 457,65 | 446,12 | 448,04 | 416,17 | 387,23 |
| POTÊNCIA SIMULADA (kW)                                     | 43,89  | 68,67  | 85,01  | 98,45  | 109,35 | 119,80 | 128,46 | 140,75 | 141,63 | 141,92 |
| CONSUMO ESPECÍFICO POR UNIDADE DE POTÊNCIA GERADA (kg/kWh) | 0,26   | 0,26   | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,26   | 0,26   |
| EFICIÊNCIA DO MOTOR                                        | 0,37   | 0,37   | 0,38   | 0,39   | 0,39   | 0,39   | 0,39   | 0,38   | 0,38   | 0,38   |
| PRESSÃO MÉDIA DE ATRITO (bar)                              | 1,45   | 1,78   | 1,96   | 2,14   | 2,29   | 2,38   | 2,53   | 2,54   | 2,58   | 2,61   |
| LAMBDA TOTAL                                               | 1,34   | 1,18   | 1,22   | 1,32   | 1,41   | 1,44   | 1,52   | 1,34   | 1,41   | 1,46   |
| MASSA DE COMBUSTÍVEL POR CICLO (g/ciclo)                   | 0,06   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,07   | 0,07   |
| CONCENTRAÇÃO DE NOx NO GÁS DE ESCAPE SECO (ppm)            | 11,98  | 0,22   | 0,78   | 16,18  | 160,47 | 262,82 | 835,38 | 38,49  | 146,97 | 344,00 |
| MATERIAL PARTICULADO (g/kWh)                               | 0,59   | 0,71   | 0,60   | 0,34   | 0,18   | 0,15   | 0,08   | 0,34   | 0,26   | 0,20   |
| EMIÇÃO DE CO2 (g/kWh)                                      | 748,15 | 743,83 | 727,62 | 711,99 | 704,48 | 704,26 | 705,69 | 726,19 | 729,98 | 736,64 |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

#### 4.4.1. Comparação com o Cenário Diesel

A Tabela 13 apresenta a comparação dos parâmetros de desempenho com o cenário do diesel e as Figuras 33, 34 e 35 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 13 – Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B97,5H2,5)

| RPM  | Torque Diesel | Torque B97,5H2,5 | Potência Diesel | Potência B97,5H2,5 | Eficiência Diesel | Eficiência B97,5H2,5 |
|------|---------------|------------------|-----------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| 1250 | 341,03        | 335,33           | 44,64           | 43,89              | 0,38              | 0,37                 |
| 1500 | 441,37        | 437,18           | 69,33           | 68,67              | 0,37              | 0,37                 |
| 1750 | 467,65        | 463,91           | 85,70           | 85,01              | 0,38              | 0,38                 |
| 2000 | 474,87        | 470,10           | 99,45           | 98,45              | 0,39              | 0,39                 |
| 2250 | 468,47        | 464,13           | 110,37          | 109,35             | 0,39              | 0,39                 |
| 2500 | 462,47        | 457,65           | 121,07          | 119,80             | 0,40              | 0,39                 |
| 2750 | 452,55        | 446,12           | 130,31          | 128,46             | 0,40              | 0,39                 |
| 3000 | 451,18        | 448,04           | 141,73          | 140,75             | 0,38              | 0,38                 |
| 3250 | 419,27        | 416,17           | 142,68          | 141,63             | 0,38              | 0,38                 |
| 3500 | 389,60        | 387,23           | 142,79          | 141,92             | 0,38              | 0,38                 |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Os resultados de desempenho indicam que a adição de 2,5% de hidrogênio ao biodiesel mantém o comportamento global do motor semelhante ao observado nos cenários anteriores, preservando o formato típico das curvas características de motores diesel. O torque apresenta crescimento progressivo até a região intermediária de rotação, atingindo valores máximos próximos de 470 N.m, seguido de redução gradual em regimes mais elevados.

A potência efetiva cresce de forma contínua com o aumento da rotação, alcançando valores superiores a 140 kW nas maiores rotações avaliadas. Esse comportamento confirma que a pequena fração de hidrogênio não compromete a capacidade de geração de trabalho útil do motor, contribuindo para a manutenção do desempenho energético global.

A eficiência térmica do motor apresenta valores próximos de 0,38–0,39, com discretos ganhos em comparação ao cenário somente com biodiesel.

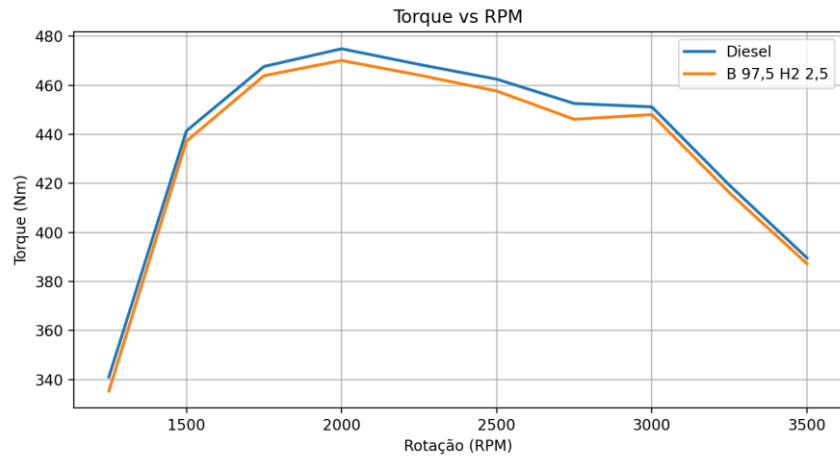


Figura 33 – Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

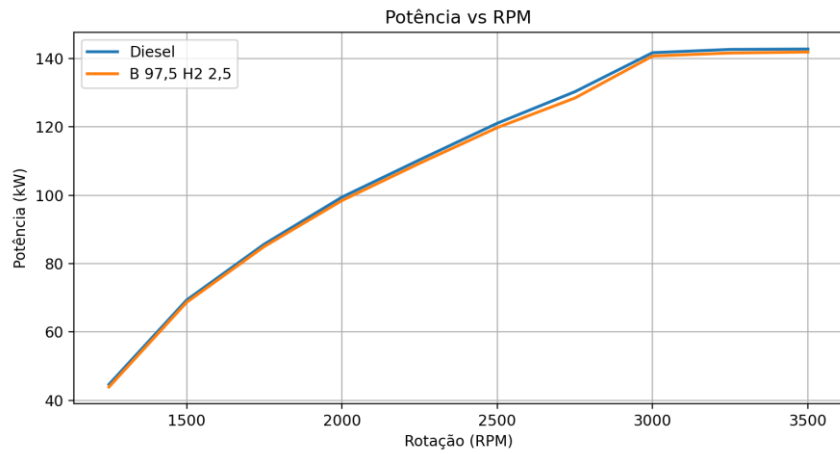


Figura 34 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

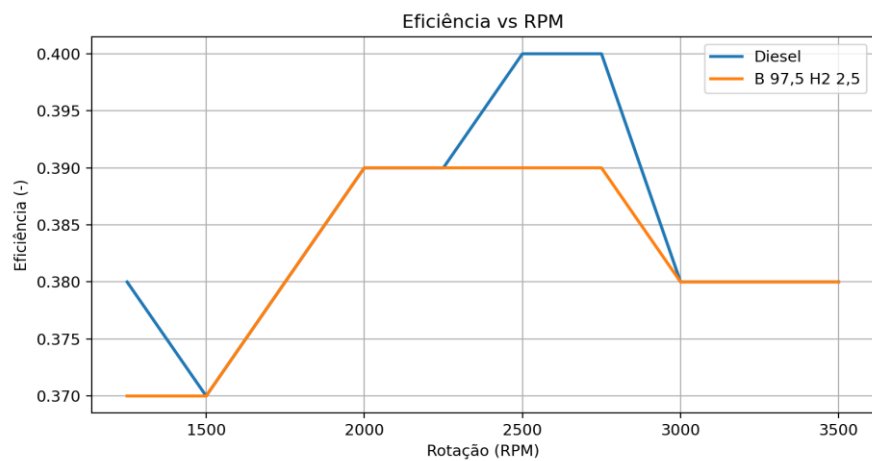


Figura 35 - Gráfico Comparativo de Eficiência (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 14 apresenta a comparação dos parâmetros de consumo e perdas com o cenário do diesel e as Figuras 36, 37 e 38 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 14 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B97,5H2,5)

| RPM  | Consumo Diesel | Consumo B97,5H2,5 | $\lambda$ Diesel | $\lambda$ B97,5H2,5 | PMA Diesel | PMA B97,5H2,5 |
|------|----------------|-------------------|------------------|---------------------|------------|---------------|
| 1250 | 0,23           | 0,26              | 1,34             | 1,34                | 1,46       | 1,45          |
| 1500 | 0,23           | 0,26              | 1,18             | 1,18                | 1,78       | 1,78          |
| 1750 | 0,22           | 0,25              | 1,22             | 1,22                | 1,95       | 1,96          |
| 2000 | 0,22           | 0,25              | 1,32             | 1,32                | 2,13       | 2,14          |
| 2250 | 0,21           | 0,25              | 1,41             | 1,41                | 2,27       | 2,29          |
| 2500 | 0,21           | 0,25              | 1,44             | 1,44                | 2,37       | 2,38          |
| 2750 | 0,21           | 0,25              | 1,52             | 1,52                | 2,50       | 2,53          |
| 3000 | 0,22           | 0,25              | 1,34             | 1,34                | 2,50       | 2,54          |
| 3250 | 0,22           | 0,26              | 1,40             | 1,41                | 2,54       | 2,58          |
| 3500 | 0,23           | 0,26              | 1,46             | 1,46                | 2,58       | 2,61          |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

O consumo específico de combustível mantém valores relativamente estáveis ao longo da faixa de operação, situando-se em torno de 0,25–0,26 kg/kWh, comportamento semelhante ao observado com biodiesel puro. Entretanto, observa-se leve tendência de redução nas rotações intermediárias, o que pode ser associado à melhora do processo de combustão promovida pelo hidrogênio, resultando em maior aproveitamento da energia química disponível.

A pressão média efetiva mantém crescimento progressivo com o aumento da rotação, evidenciando que as perdas mecânicas permanecem predominantemente dependentes do regime operacional, não sendo significativamente influenciadas pela composição do combustível.

A razão ar–combustível equivalente ( $\lambda$ ) permanece superior a um em toda a faixa de operação.

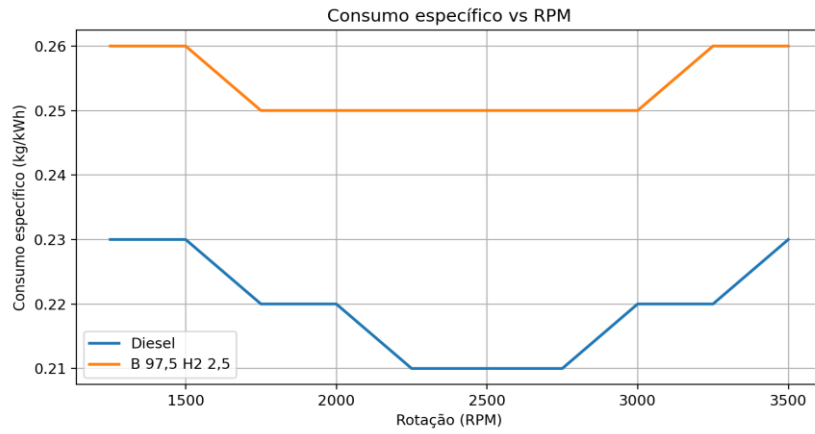


Figura 36 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

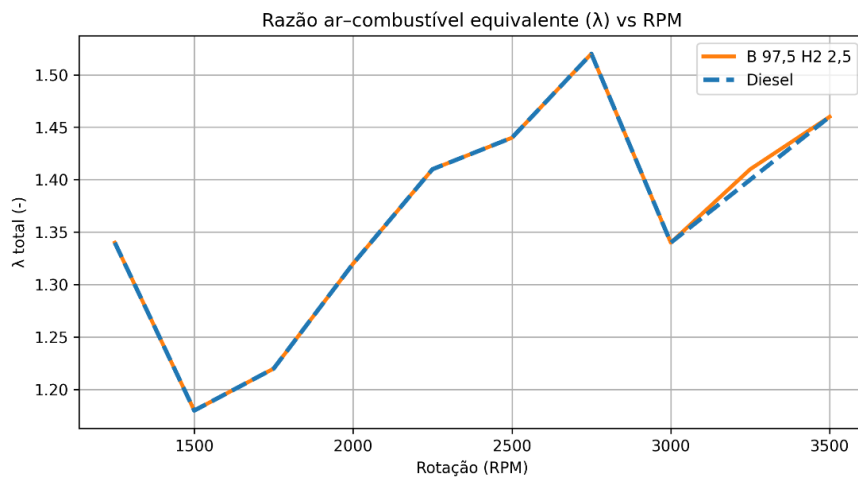


Figura 37 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

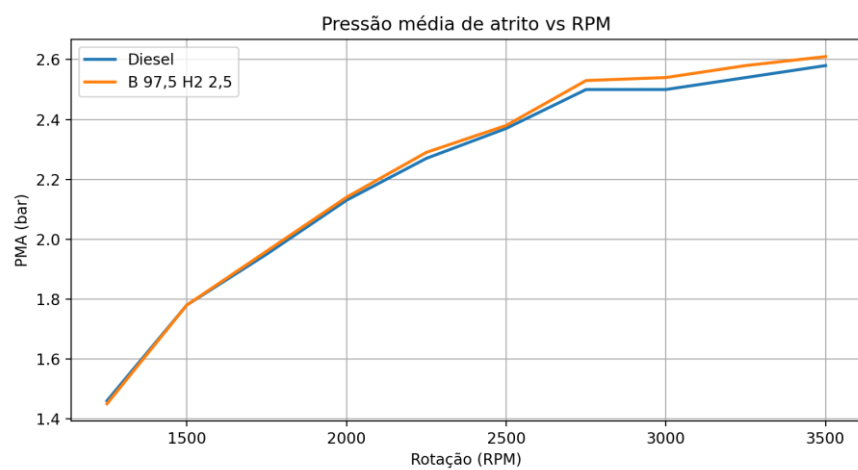


Figura 38 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 15 apresenta a comparação dos parâmetros de emissões com o cenário do diesel e as Figuras 39, 40 e 41 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 15 - Comparação dos Resultados das Emissões do Motor (Diesel X B97,5H2,5)

| RPM  | NOx Diesel | NOx B97,5H2,5 | MP Diesel | MP B97,5H2,5 | CO <sub>2</sub> Diesel | CO <sub>2</sub> B97,5H2,5 |
|------|------------|---------------|-----------|--------------|------------------------|---------------------------|
| 1250 | 0,54       | 11,98         | 0,55      | 0,59         | 727,64                 | 748,15                    |
| 1500 | 0,01       | 0,22          | 0,73      | 0,71         | 729,45                 | 743,83                    |
| 1750 | 0,01       | 0,78          | 0,66      | 0,60         | 714,70                 | 727,62                    |
| 2000 | 0,39       | 16,18         | 0,43      | 0,34         | 698,13                 | 711,99                    |
| 2250 | 5,28       | 160,47        | 0,28      | 0,18         | 691,39                 | 704,48                    |
| 2500 | 10,76      | 262,82        | 0,24      | 0,15         | 690,48                 | 704,26                    |
| 2750 | 53,60      | 835,38        | 0,22      | 0,08         | 689,88                 | 705,69                    |
| 3000 | 0,80       | 38,49         | 0,54      | 0,34         | 715,01                 | 726,19                    |
| 3250 | 4,13       | 146,97        | 0,44      | 0,26         | 718,35                 | 729,98                    |
| 3500 | 12,84      | 344,00        | 0,36      | 0,20         | 725,37                 | 736,64                    |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Em relação às emissões, observa-se redução consistente do material particulado, resultado esperado devido à ausência de carbono na molécula de hidrogênio e à melhoria da oxidação do combustível líquido. Por outro lado, verifica-se tendência de elevação das emissões de NOx.

As emissões específicas de CO<sub>2</sub> apresentam variações discretas ao longo da faixa de operação.

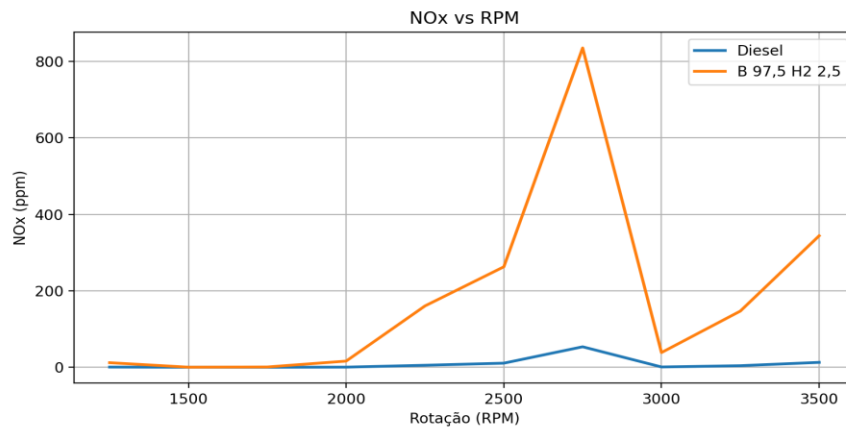


Figura 39 - Gráfico Comparativo da Emissão de NOx (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

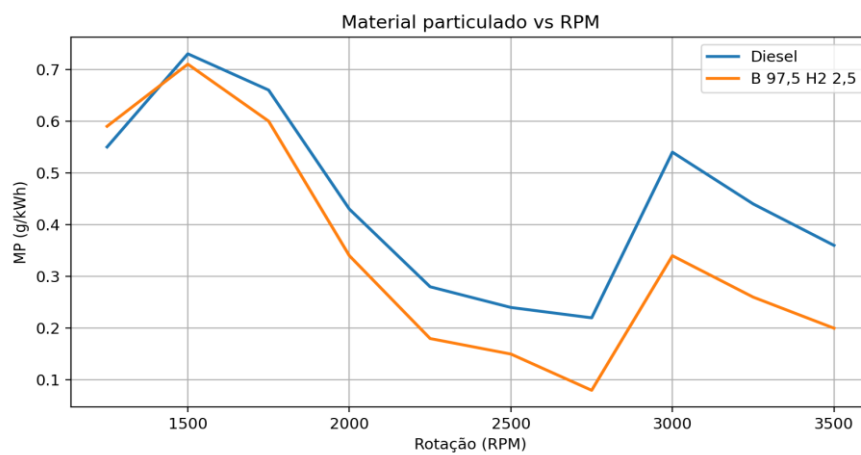


Figura 40 - Gráfico Comparativo da Emissão de Material Particulado (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

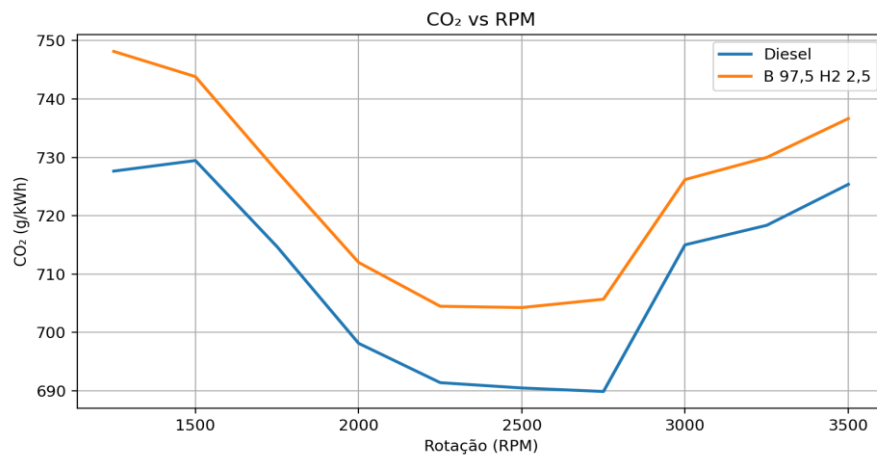


Figura 41 - Gráfico Comparativo da Emissão de CO2 (Diesel X B97,5H2,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

De forma geral, os resultados indicam que a adição de 2,5% de hidrogênio ao biodiesel promove melhora moderada na eficiência da combustão e redução de material particulado, sem prejuízo ao desempenho mecânico do motor, configurando-se como estratégia viável para otimização ambiental com impacto energético mínimo. Nos próximos cenários serão avaliadas frações crescentes de hidrogênio, permitindo analisar de forma progressiva os ganhos de desempenho e as possíveis limitações associadas ao aumento da participação desse combustível gasoso.

#### **4.5. Cenário 3 (Biodiesel 95% + H2 5% - B95H5)**

Neste cenário são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação do motor operando com uma mistura composta por 95% de biodiesel e 5% de hidrogênio (B95H5) em base energética, com o objetivo de investigar os efeitos do aumento da fração de hidrogênio sobre o desempenho termodinâmico, o consumo específico de combustível e o comportamento das emissões.

As simulações são conduzidas para a mesma faixa de rotação compreendida entre 1250 e 3500 rpm, abrangendo regimes de baixa, média e alta rotação. Todos os parâmetros geométricos, construtivos e operacionais do motor são mantidos constantes, garantindo que as variações observadas estejam associadas exclusivamente à modificação da composição do combustível.

A Tabela 16 apresenta os valores simulados de torque, potência efetiva, consumo específico de combustível, eficiência térmica, pressão média de atrito, razão ar-combustível equivalente ( $\lambda$ ), massa de combustível injetada por ciclo e emissões de NOx, material particulado e CO<sub>2</sub> para cada ponto de operação.

Tabela 16 - Resultado da Simulação do Cenário B95H5

| RPM                                                        | 1250   | 1500   | 1750   | 2000   | 2250   | 2500   | 2750    | 3000   | 3250   | 3500   |
|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| TORQUE SIMULADO (Nm)                                       | 347,15 | 451,24 | 478,93 | 485,61 | 479,75 | 473,25 | 461,47  | 463,30 | 430,62 | 401,24 |
| POTÊNCIA SIMULADA (kW)                                     | 45,44  | 70,88  | 87,76  | 101,70 | 113,03 | 123,89 | 132,88  | 145,54 | 146,54 | 147,05 |
| CONSUMO ESPECÍFICO POR UNIDADE DE POTÊNCIA GERADA (kg/kWh) | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,24   | 0,24   | 0,24   | 0,24    | 0,25   | 0,25   | 0,25   |
| EFICIÊNCIA DO MOTOR                                        | 0,37   | 0,37   | 0,38   | 0,39   | 0,39   | 0,39   | 0,39    | 0,38   | 0,38   | 0,38   |
| PRESSÃO MÉDIA DE ATRITO (bar)                              | 1,47   | 1,80   | 1,98   | 2,16   | 2,31   | 2,41   | 2,55    | 2,56   | 2,60   | 2,63   |
| LAMBDA TOTAL                                               | 1,34   | 1,18   | 1,22   | 1,32   | 1,41   | 1,44   | 1,52    | 1,34   | 1,41   | 1,46   |
| MASSA DE COMBUSTÍVEL POR CICLO (g/ciclo)                   | 0,06   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08    | 0,08   | 0,07   | 0,07   |
| CONCENTRAÇÃO DE NOx NO GÁS DE ESCAPE SECO (ppm)            | 42,05  | 1,02   | 2,98   | 48,79  | 367,59 | 552,95 | 1354,70 | 104,34 | 344,64 | 677,51 |
| MATERIAL PARTICULADO (g/kWh)                               | 0,52   | 0,65   | 0,55   | 0,30   | 0,15   | 0,12   | 0,07    | 0,32   | 0,24   | 0,17   |
| EMIÇÃO DE CO2 (g/kWh)                                      | 727,21 | 725,14 | 709,18 | 693,57 | 685,83 | 685,31 | 686,56  | 706,76 | 709,98 | 715,67 |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

#### 4.5.1. Comparação com o Cenário Diesel

A Tabela 17 apresenta a comparação dos parâmetros de desempenho com o cenário do diesel e as Figuras 42, 43 e 44 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 17 - Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B95H5)

| RPM  | Torque Diesel | Torque B95H5 | Potência Diesel | Potência B95H5 | Eficiência Diesel | Eficiência B95H5 |
|------|---------------|--------------|-----------------|----------------|-------------------|------------------|
| 1250 | 341,03        | 347,15       | 44,64           | 45,44          | 0,38              | 0,37             |
| 1500 | 441,37        | 451,24       | 69,33           | 70,88          | 0,37              | 0,37             |
| 1750 | 467,65        | 478,93       | 85,70           | 87,76          | 0,38              | 0,38             |
| 2000 | 474,87        | 485,61       | 99,45           | 101,70         | 0,39              | 0,39             |
| 2250 | 468,47        | 479,75       | 110,37          | 113,03         | 0,39              | 0,39             |
| 2500 | 462,47        | 473,25       | 121,07          | 123,89         | 0,40              | 0,39             |
| 2750 | 452,55        | 461,47       | 130,31          | 132,88         | 0,40              | 0,39             |
| 3000 | 451,18        | 463,30       | 141,73          | 145,54         | 0,38              | 0,38             |
| 3250 | 419,27        | 430,62       | 142,68          | 146,54         | 0,38              | 0,38             |
| 3500 | 389,60        | 401,24       | 142,79          | 147,05         | 0,38              | 0,38             |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Os resultados de torque efetivo demonstram que o motor operando com a mistura B95 + 5% H<sub>2</sub> mantém o comportamento característico de motores de ignição por compressão, apresentando elevação progressiva do torque até a região intermediária de rotação, onde são observados valores máximos próximos de 480–486 Nm, seguidos de redução gradual em altas rotações.

A potência efetiva apresenta crescimento contínuo com o aumento da rotação, atingindo valores próximos de 147 kW a 3500 rpm. Esse resultado evidencia que o acréscimo de hidrogênio contribui positivamente para a geração de trabalho útil, mantendo ou elevando ligeiramente o desempenho do motor, especialmente em regimes de maior carga.

A eficiência térmica do motor permanece na faixa de 0,38 a 0,39, com discretos ganhos nos pontos de maior eficiência, confirmando o efeito benéfico da suplementação com hidrogênio sobre o rendimento global do ciclo termodinâmico.

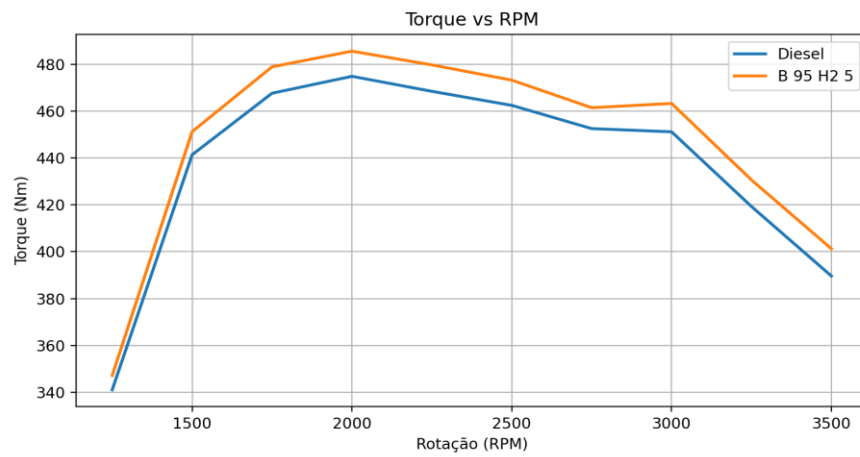


Figura 42 - Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

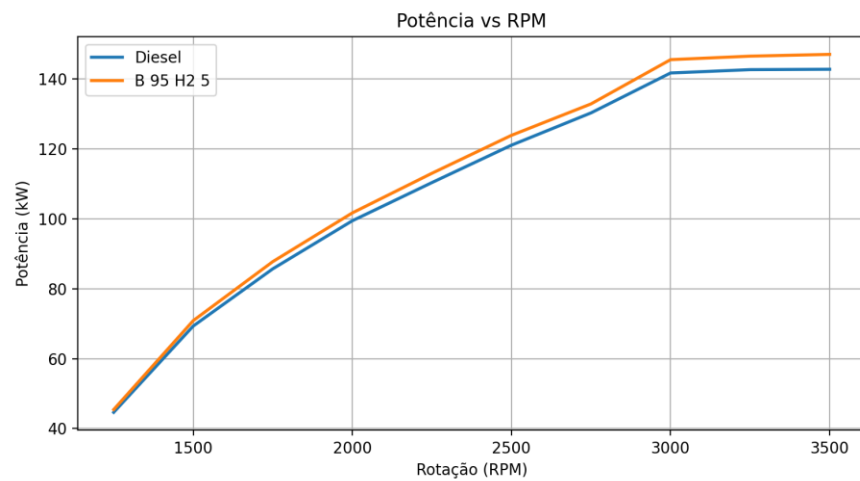


Figura 43 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

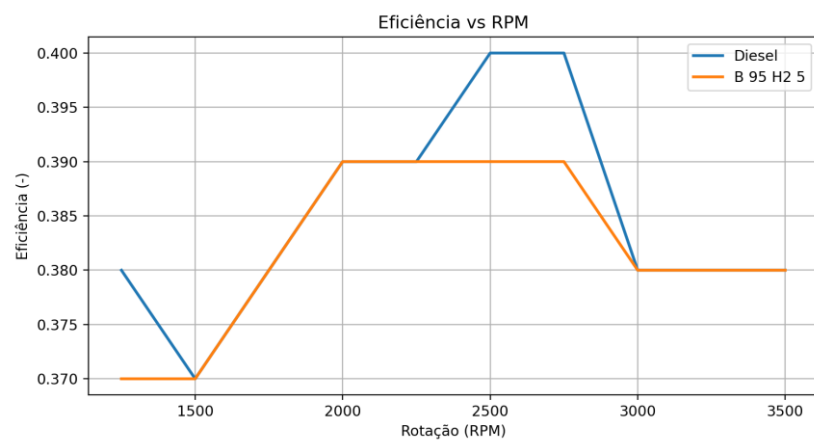


Figura 44 - Gráfico Comparativo de Eficiência (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 18 apresenta a comparação dos parâmetros de consumo e perdas com o cenário do diesel e as Figuras 45, 46 e 47 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 18 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B95H5)

| RPM  | Consumo Diesel | Consumo B95H5 | $\lambda$ Diesel | $\lambda$ B95H5 | PMA Diesel | PMA B95H5 |
|------|----------------|---------------|------------------|-----------------|------------|-----------|
| 1250 | 0,23           | 0,25          | 1,34             | 1,34            | 1,46       | 1,47      |
| 1500 | 0,23           | 0,25          | 1,18             | 1,18            | 1,78       | 1,80      |
| 1750 | 0,22           | 0,25          | 1,22             | 1,22            | 1,95       | 1,98      |
| 2000 | 0,22           | 0,24          | 1,32             | 1,32            | 2,13       | 2,16      |
| 2250 | 0,21           | 0,24          | 1,41             | 1,41            | 2,27       | 2,31      |
| 2500 | 0,21           | 0,24          | 1,44             | 1,44            | 2,37       | 2,41      |
| 2750 | 0,21           | 0,24          | 1,52             | 1,52            | 2,50       | 2,55      |
| 3000 | 0,22           | 0,25          | 1,34             | 1,34            | 2,50       | 2,56      |
| 3250 | 0,22           | 0,25          | 1,40             | 1,41            | 2,54       | 2,60      |
| 3500 | 0,23           | 0,25          | 1,46             | 1,46            | 2,58       | 2,63      |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

O consumo específico de combustível apresenta leve redução nas rotações intermediárias, com valores mínimos próximos de 0,24 kg/kWh, inferiores aos observados nos cenários anteriores.

A pressão média efetiva mantém tendência crescente com a rotação, comportamento semelhante aos demais cenários, demonstrando que as perdas mecânicas continuam predominantemente dependentes do regime de operação, sem influência significativa da alteração do combustível.

A razão ar–combustível equivalente ( $\lambda$ ) permanece superior à unidade em toda a faixa de operação.

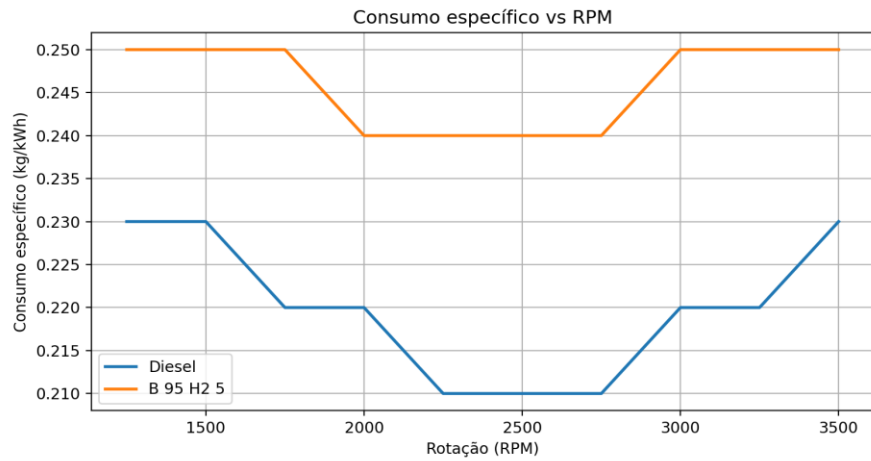


Figura 45 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

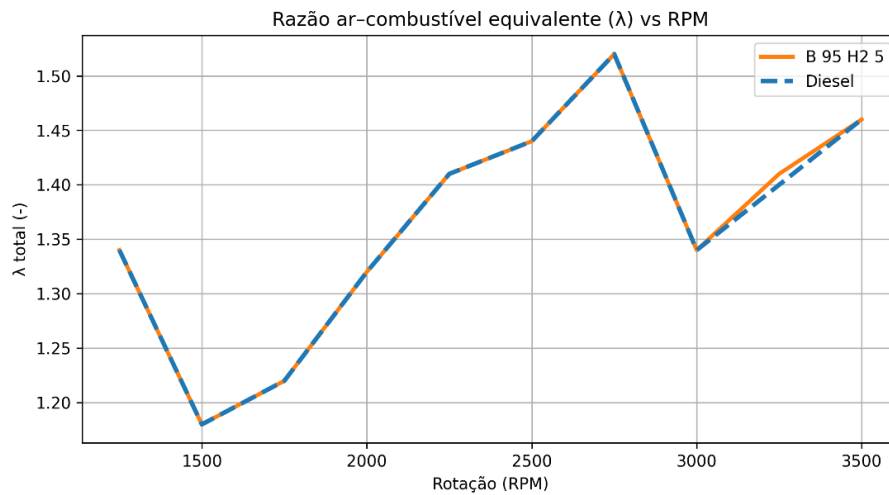


Figura 46 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

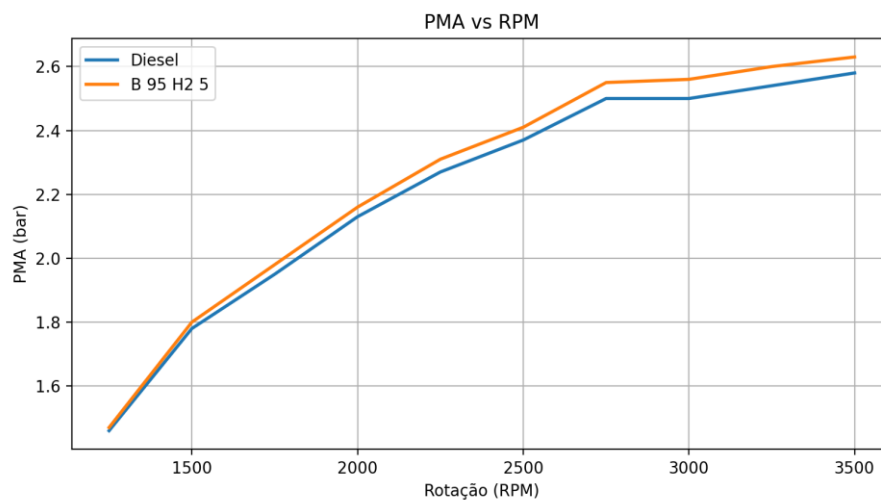


Figura 47 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 19 apresenta a comparação dos parâmetros de emissão com o cenário do diesel e as Figuras 48, 49 e 50 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 19 - Comparação dos Resultados de Emissões do Motor (Diesel X B95H5)

| RPM  | NOx Diesel | NOx B95H5 | MP Diesel | MP B95H5 | CO <sub>2</sub> Diesel | CO <sub>2</sub> B95H5 |
|------|------------|-----------|-----------|----------|------------------------|-----------------------|
| 1250 | 0,54       | 42,05     | 0,55      | 0,52     | 727,64                 | 727,21                |
| 1500 | 0,01       | 1,02      | 0,73      | 0,65     | 729,45                 | 725,14                |
| 1750 | 0,01       | 2,98      | 0,66      | 0,55     | 714,70                 | 709,18                |
| 2000 | 0,39       | 48,79     | 0,43      | 0,30     | 698,13                 | 693,57                |
| 2250 | 5,28       | 367,59    | 0,28      | 0,15     | 691,39                 | 685,83                |
| 2500 | 10,76      | 552,95    | 0,24      | 0,12     | 690,48                 | 685,31                |
| 2750 | 53,60      | 1354,70   | 0,22      | 0,07     | 689,88                 | 686,56                |
| 3000 | 0,80       | 104,34    | 0,54      | 0,32     | 715,01                 | 706,76                |
| 3250 | 4,13       | 344,64    | 0,44      | 0,24     | 718,35                 | 709,98                |
| 3500 | 12,84      | 677,51    | 0,36      | 0,17     | 725,37                 | 715,67                |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

No que se refere às emissões, observa-se redução adicional do material particulado em comparação aos cenários anteriores, resultado da menor fração de carbono disponível para formação de fuligem e da melhoria na qualidade da combustão. Em contrapartida, verifica-se aumento das emissões de NOx.

As emissões específicas de CO<sub>2</sub> apresentam leve tendência de redução em parte da faixa de operação.

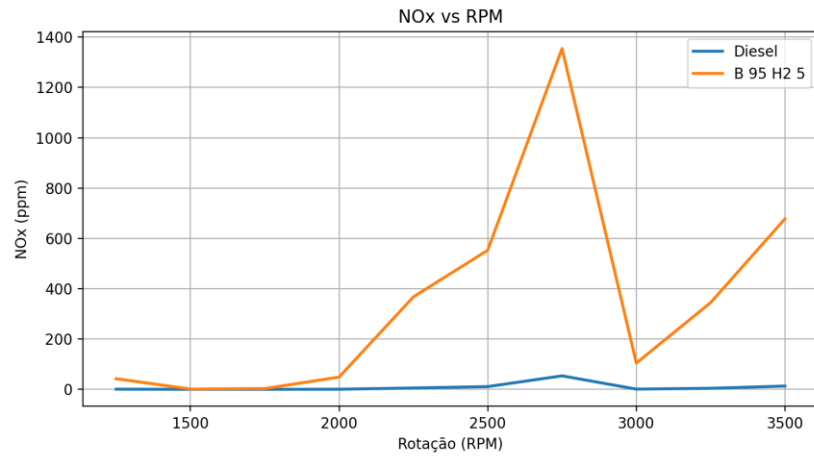


Figura 48 - Gráfico Comparativo das Emissões de NOx (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

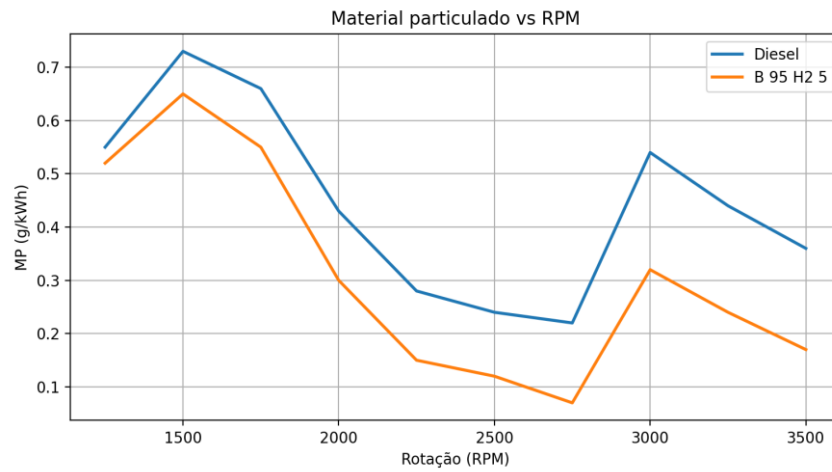


Figura 49 - Gráfico Comparativo das Emissões de Material Particulado (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

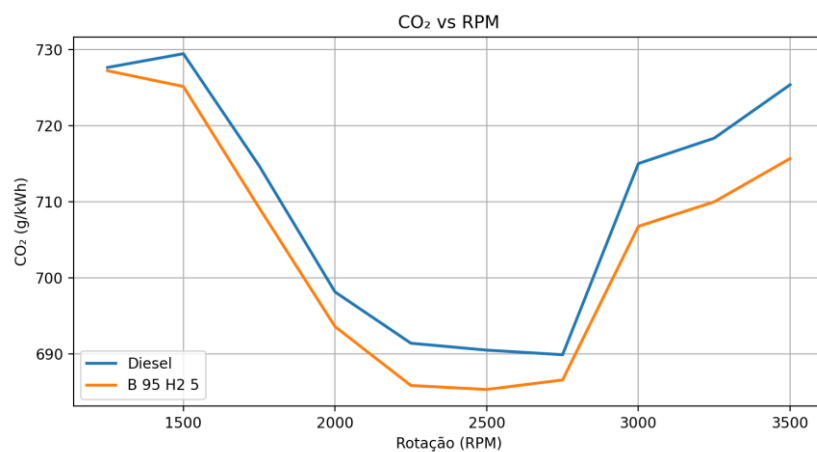


Figura 50 - Gráfico Comparativo das Emissões de CO2 (Diesel X B95H5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

De forma geral, os resultados indicam que a adição de 5% de hidrogênio ao biodiesel promove ganhos mais pronunciados de eficiência e desempenho quando comparada ao cenário com 2,5%, além de redução mais significativa do material particulado. Entretanto, há um aumento das emissões de NOx.

#### **4.6. Cenário 4 (Biodiesel 92,5% + H2 7,5% - B92,5H7,5)**

Neste cenário são apresentados os resultados da simulação do motor operando com uma mistura composta por 92,5% de biodiesel e 7,5% de hidrogênio em base energética, com o objetivo de avaliar os efeitos do aumento progressivo da fração de hidrogênio sobre o desempenho mecânico, a eficiência térmica, o consumo específico de combustível e as emissões atmosféricas.

Assim como nos cenários anteriores, as simulações são realizadas para a faixa de rotação entre 1250 e 3500 rpm, contemplando condições de baixa, média e alta carga. Todos os parâmetros geométricos, construtivos e operacionais do motor são mantidos constantes, incluindo taxa de compressão, condições de admissão, estratégias de injeção e modelos de perdas mecânicas, assegurando que as diferenças observadas nos resultados sejam decorrentes exclusivamente da modificação da composição do combustível.

A Tabela 20 apresenta os valores simulados de torque efetivo, potência efetiva, consumo específico de combustível, eficiência do motor, pressão média de atrito, razão ar-combustível equivalente ( $\lambda$ ), massa de combustível injetada por ciclo e emissões de NOx, material particulado e CO<sub>2</sub> para cada ponto de operação.

Tabela 20 - Resultado da Simulação do Cenário B92,55H7,5

| RPM                                                        | 1250   | 1500   | 1750   | 2000   | 2250   | 2500   | 2750    | 3000   | 3250   | 3500    |
|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| TORQUE SIMULADO (Nm)                                       | 357,13 | 462,95 | 491,75 | 498,85 | 492,76 | 486,81 | 474,76  | 476,77 | 443,12 | 413,30  |
| POTÊNCIA SIMULADA (kW)                                     | 46,75  | 72,71  | 90,11  | 104,47 | 116,10 | 127,44 | 136,71  | 149,77 | 150,80 | 151,47  |
| CONSUMO ESPECÍFICO POR UNIDADE DE POTÊNCIA GERADA (kg/kWh) | 0,25   | 0,25   | 0,24   | 0,24   | 0,23   | 0,23   | 0,23    | 0,24   | 0,24   | 0,24    |
| EFICIÊNCIA DO MOTOR                                        | 0,37   | 0,37   | 0,38   | 0,39   | 0,39   | 0,39   | 0,39    | 0,38   | 0,38   | 0,38    |
| PRESSÃO MÉDIA DE ATRITO (bar)                              | 1,48   | 1,82   | 2,00   | 2,18   | 2,34   | 2,43   | 2,57    | 2,58   | 2,62   | 2,65    |
| LAMBDA TOTAL                                               | 1,34   | 1,18   | 1,22   | 1,32   | 1,41   | 1,44   | 1,52    | 1,34   | 1,41   | 1,46    |
| MASSA DE COMBUSTÍVEL POR CICLO (g/ciclo)                   | 0,06   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08    | 0,08   | 0,07   | 0,07    |
| CONCENTRAÇÃO DE NOx NO GÁS DE ESCAPE SECO (ppm)            | 98,33  | 2,89   | 7,95   | 104,94 | 623,09 | 859,07 | 1755,20 | 206,07 | 578,22 | 1005,30 |
| MATERIAL PARTICULADO (g/kWh)                               | 0,47   | 0,61   | 0,51   | 0,27   | 0,14   | 0,11   | 0,06    | 0,30   | 0,22   | 0,16    |
| EMISSÃO DE CO2 (g/kWh)                                     | 706,53 | 706,22 | 690,17 | 674,66 | 667,23 | 665,97 | 667,09  | 686,60 | 689,75 | 694,61  |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

#### 4.6.1. Comparação com o Cenário Diesel

A Tabela 21 apresenta a comparação dos parâmetros de desempenho com o cenário do diesel e as Figuras 51, 52 e 53 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 21 - Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B92,55H7,5)

| RPM  | Torque Diesel | Torque B92,5H7,5 | Potência Diesel | Potência B92,5H7,5 | Eficiência Diesel | Eficiência B92,5H7,5 |
|------|---------------|------------------|-----------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| 1250 | 341,03        | 357,13           | 44,64           | 46,75              | 0,38              | 0,37                 |
| 1500 | 441,37        | 462,95           | 69,33           | 72,71              | 0,37              | 0,37                 |
| 1750 | 467,65        | 491,75           | 85,70           | 90,11              | 0,38              | 0,38                 |
| 2000 | 474,87        | 498,85           | 99,45           | 104,47             | 0,39              | 0,39                 |
| 2250 | 468,47        | 492,76           | 110,37          | 116,10             | 0,39              | 0,39                 |
| 2500 | 462,47        | 486,81           | 121,07          | 127,44             | 0,40              | 0,39                 |
| 2750 | 452,55        | 474,76           | 130,31          | 136,71             | 0,40              | 0,39                 |
| 3000 | 451,18        | 476,77           | 141,73          | 149,77             | 0,38              | 0,38                 |
| 3250 | 419,27        | 443,12           | 142,68          | 150,80             | 0,38              | 0,38                 |
| 3500 | 389,60        | 413,30           | 142,79          | 151,47             | 0,38              | 0,38                 |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Os resultados de torque efetivo evidenciam aumento adicional do desempenho mecânico em relação aos cenários com menores teores de hidrogênio. Observa-se crescimento do torque até a região intermediária de rotação, atingindo valores máximos próximos de 500 Nm, superiores aos obtidos com biodiesel puro e com as misturas anteriores.

A potência efetiva acompanha essa tendência, apresentando elevação contínua com a rotação e alcançando valores superiores a 150 kW nas maiores rotações avaliadas. Tal aumento confirma que a adição de 7,5% de hidrogênio contribui para maior conversão de energia química em trabalho mecânico, resultando em ganho de desempenho global do motor.

A eficiência térmica do motor permanece na faixa de 0,38 a 0,39, com discretos aumentos nos pontos de maior carga, sugerindo melhor aproveitamento do calor liberado na combustão.

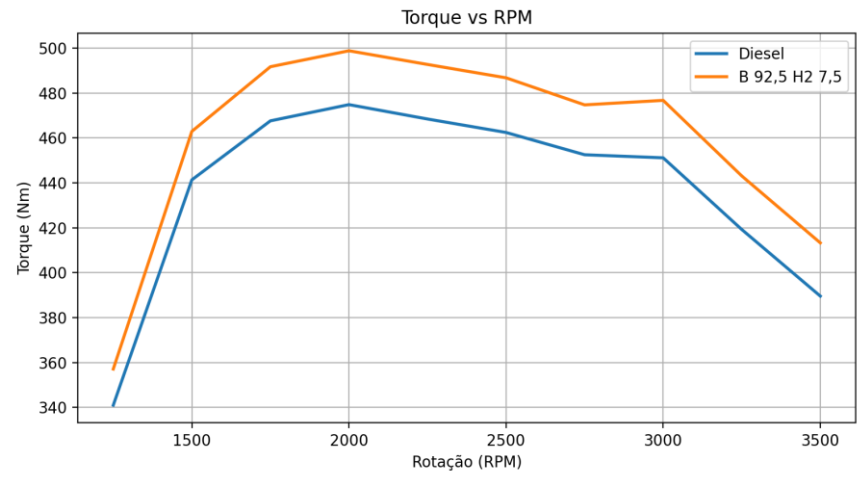


Figura 51 - Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

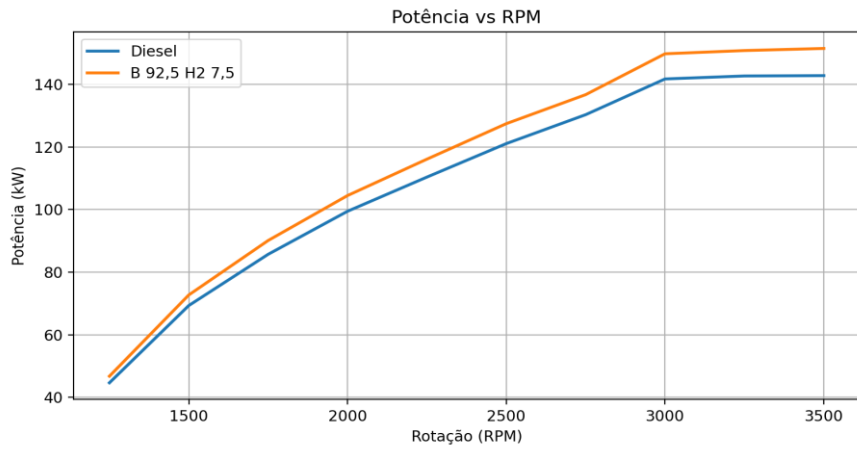


Figura 52 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

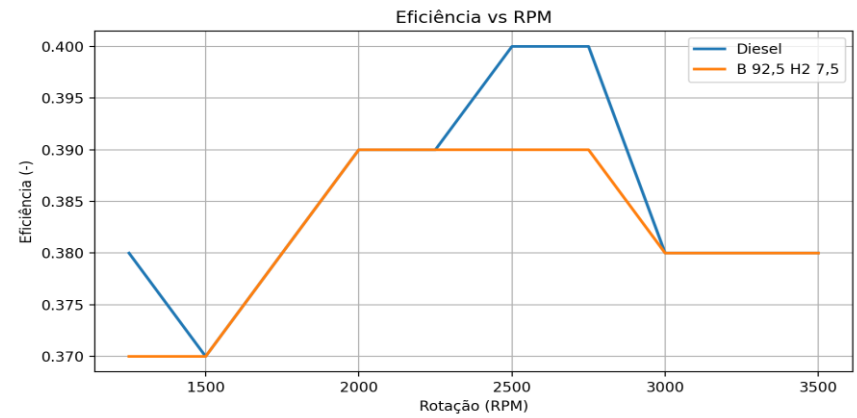


Figura 53 - Gráfico Comparativo de Eficiência (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 22 apresenta a comparação dos parâmetros de consumo e perdas com o cenário do diesel e as Figuras 54, 55 e 56 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 22 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B92,55H7,5)

| RPM  | Consumo Diesel | Consumo B92,5H7,5 | $\lambda$ Diesel | $\lambda$ B92,5H7,5 | PMA Diesel | PMA B92,5H7,5 |
|------|----------------|-------------------|------------------|---------------------|------------|---------------|
| 1250 | 0,23           | 0,25              | 1,34             | 1,34                | 1,46       | 1,48          |
| 1500 | 0,23           | 0,25              | 1,18             | 1,18                | 1,78       | 1,82          |
| 1750 | 0,22           | 0,24              | 1,22             | 1,22                | 1,95       | 2,00          |
| 2000 | 0,22           | 0,24              | 1,32             | 1,32                | 2,13       | 2,18          |
| 2250 | 0,21           | 0,23              | 1,41             | 1,41                | 2,27       | 2,34          |
| 2500 | 0,21           | 0,23              | 1,44             | 1,44                | 2,37       | 2,43          |
| 2750 | 0,21           | 0,23              | 1,52             | 1,52                | 2,50       | 2,57          |
| 3000 | 0,22           | 0,24              | 1,34             | 1,34                | 2,50       | 2,58          |
| 3250 | 0,22           | 0,24              | 1,40             | 1,41                | 2,54       | 2,62          |
| 3500 | 0,23           | 0,24              | 1,46             | 1,46                | 2,58       | 2,65          |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

O consumo específico de combustível apresenta redução mais evidente nas rotações intermediárias, com valores mínimos próximos de 0,23 kg/kWh, inferiores aos observados nos cenários anteriores. Esse resultado evidencia melhoria da eficiência energética do sistema.

A pressão média efetiva mantém comportamento crescente com a rotação, semelhante aos demais cenários, demonstrando, mais uma vez que as perdas mecânicas continuam essencialmente dependentes das condições operacionais do motor e não da composição do combustível.

Os valores da razão ar–combustível equivalente ( $\lambda$ ) permanecem superiores à um em toda a faixa de operação.

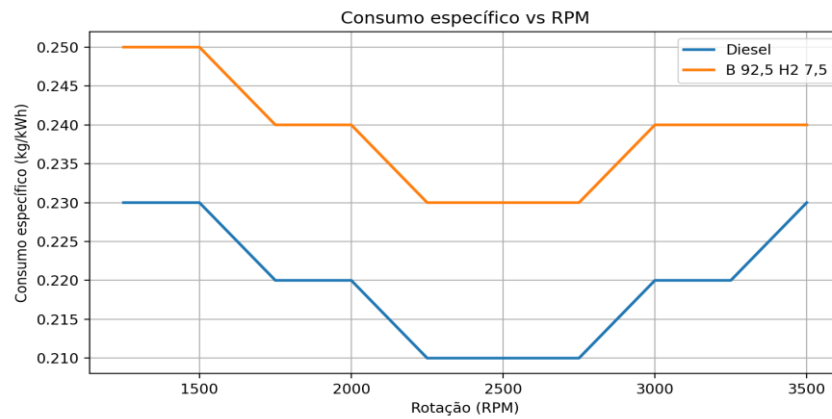


Figura 54 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

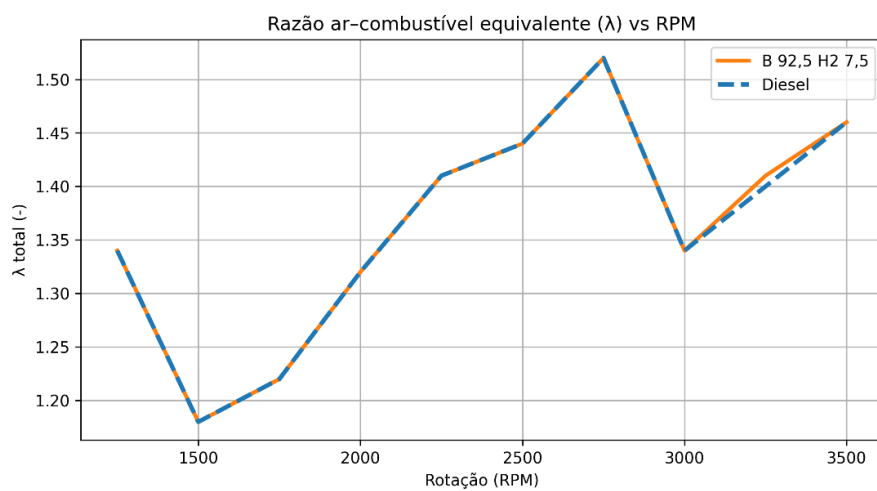


Figura 55 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

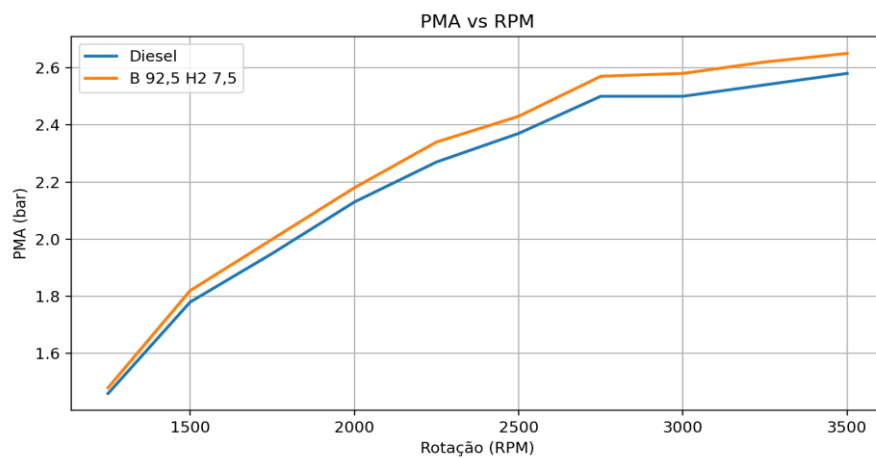


Figura 56 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 23 apresenta a comparação dos parâmetros de emissão com o cenário do diesel e as Figuras 57, 58 e 59 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 23 -Comparação dos Resultados de Emissões do Motor (Diesel X B92,55H7,5)

| RPM  | NOx Diesel | NOx B92,5H7,5 | MP Diesel | MP B92,5H7,5 | CO <sub>2</sub> Diesel | CO <sub>2</sub> B92,5H7,5 |
|------|------------|---------------|-----------|--------------|------------------------|---------------------------|
| 1250 | 0,54       | 98,33         | 0,55      | 0,47         | 727,64                 | 706,53                    |
| 1500 | 0,01       | 2,89          | 0,73      | 0,61         | 729,45                 | 706,22                    |
| 1750 | 0,01       | 7,95          | 0,66      | 0,51         | 714,70                 | 690,17                    |
| 2000 | 0,39       | 104,94        | 0,43      | 0,27         | 698,13                 | 674,66                    |
| 2250 | 5,28       | 623,09        | 0,28      | 0,14         | 691,39                 | 667,23                    |
| 2500 | 10,76      | 859,07        | 0,24      | 0,11         | 690,48                 | 665,97                    |
| 2750 | 53,60      | 1755,20       | 0,22      | 0,06         | 689,88                 | 667,09                    |
| 3000 | 0,80       | 206,07        | 0,54      | 0,30         | 715,01                 | 686,60                    |
| 3250 | 4,13       | 578,22        | 0,44      | 0,22         | 718,35                 | 689,75                    |
| 3500 | 12,84      | 1005,30       | 0,36      | 0,16         | 725,37                 | 694,61                    |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

No que se refere às emissões, observa-se redução significativa do material particulado, alcançando valores mínimos nas rotações intermediárias.

Por outro lado, verifica-se aumento expressivo das emissões de NOx, especialmente em regimes de maior carga.

As emissões específicas de CO<sub>2</sub> apresentam leve redução média quando comparadas aos cenários com maior teor de biodiesel.

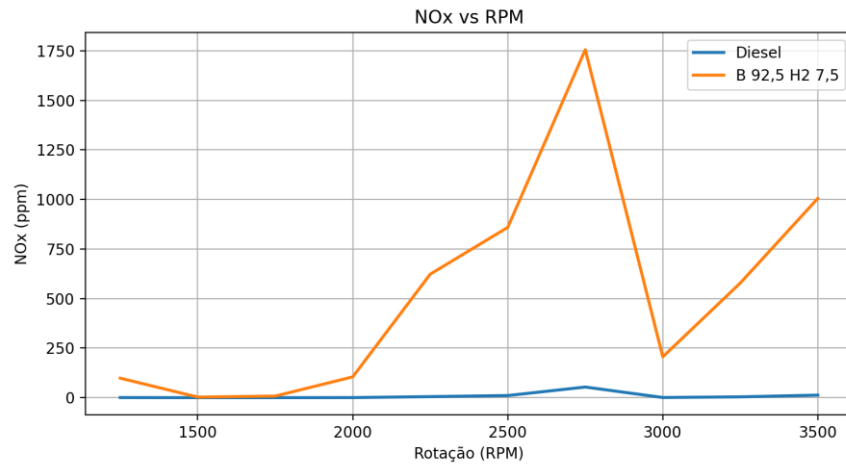


Figura 57 - Gráfico Comparativo das Emissões de NOx (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

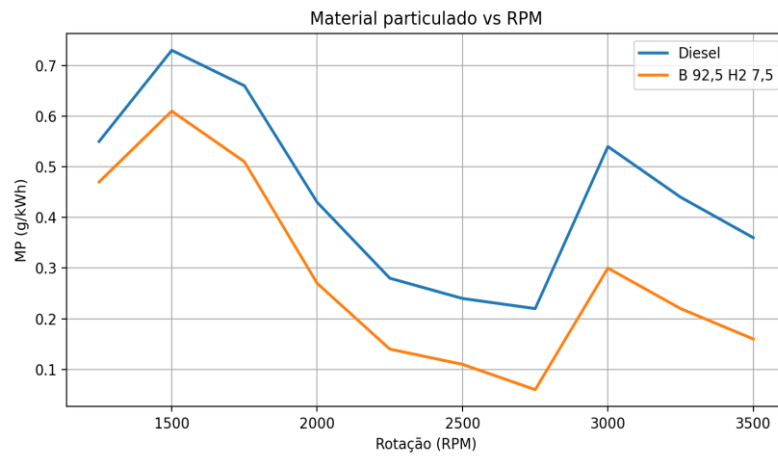


Figura 58 - Gráfico Comparativo das Emissões de Material Particulado (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

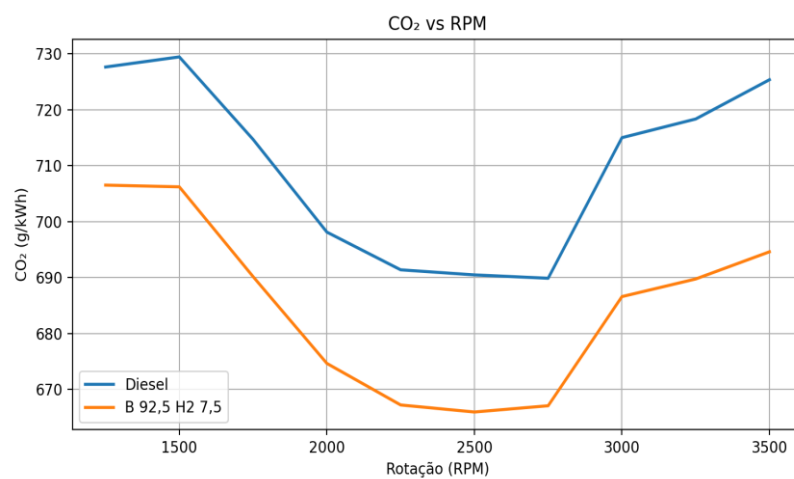


Figura 59 - Gráfico Comparativo das Emissões de CO2 (Diesel X B92,55H7,5)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

De modo geral, os resultados indicam que a adição de 7,5% de hidrogênio promove ganhos mais pronunciados de torque, potência e eficiência, acompanhados de redução do material particulado, evidenciando benefícios energéticos e ambientais relevantes. Entretanto, nota-se o aumento simultâneo das emissões de NO<sub>x</sub>.

#### **4.7. Cenário 5 (Biodiesel 90% + H<sub>2</sub> 10% - B90H10)**

Neste cenário são apresentados os resultados da simulação do motor operando com uma mistura composta por 90% de biodiesel e 10% de hidrogênio em base energética, representando o maior teor de hidrogênio avaliado neste estudo. O objetivo desta etapa é investigar os efeitos de uma participação mais elevada do hidrogênio sobre o desempenho termodinâmico, a eficiência de conversão energética, o consumo específico de combustível e o comportamento das emissões.

As simulações são realizadas na mesma faixa de rotação entre 1250 e 3500 rpm, mantendo-se inalterados todos os parâmetros geométricos, construtivos e operacionais do motor, incluindo condições de admissão, taxa de compressão, estratégias de injeção e modelos de perdas mecânicas. Dessa forma, garante-se que as variações observadas nos resultados sejam atribuídas exclusivamente à alteração da composição do combustível.

A Tabela 24 apresenta os valores simulados de torque efetivo, potência efetiva, consumo específico de combustível, eficiência térmica, pressão média de atrito, razão ar-combustível equivalente ( $\lambda$ ), massa de combustível injetada por ciclo e emissões de NO<sub>x</sub>, material particulado e CO<sub>2</sub> para cada condição de operação.

Tabela 24 - Resultado da Simulação do Cenário B90H10

| RPM                                                         | 1250   | 1500   | 1750   | 2000   | 2250   | 2500    | 2750    | 3000   | 3250   | 3500    |
|-------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|
| TORQUE SIMULADO (Nm)                                        | 366,53 | 474,83 | 504,32 | 511,99 | 506,09 | 500,13  | 487,84  | 489,46 | 455,59 | 424,99  |
| POTÊNCIA SIMULADA (kW)                                      | 47,98  | 74,58  | 92,42  | 107,22 | 119,24 | 130,92  | 140,48  | 153,76 | 155,04 | 155,75  |
| CONSUMO ESPECÍFICO POR UNIDADE DE POTÊNCIA GERADA (kg/kWh)  | 0,24   | 0,24   | 0,23   | 0,23   | 0,23   | 0,23    | 0,23    | 0,23   | 0,23   | 0,24    |
| EFICIÊNCIA DO MOTOR                                         | 0,37   | 0,37   | 0,38   | 0,39   | 0,39   | 0,40    | 0,40    | 0,38   | 0,38   | 0,38    |
| PRESSÃO MÉDIA DE ATRITO (bar)                               | 1,50   | 1,84   | 2,02   | 2,20   | 2,35   | 2,45    | 2,59    | 2,60   | 2,64   | 2,67    |
| LAMBDA TOTAL                                                | 1,34   | 1,18   | 1,22   | 1,32   | 1,41   | 1,44    | 1,52    | 1,34   | 1,41   | 1,47    |
| MASSA DE COMBUSTÍVEL POR CICLO (g/ciclo)                    | 0,06   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08    | 0,08    | 0,08   | 0,07   | 0,07    |
| CONCENTRAÇÃO DE NO <sub>x</sub> NO GÁS DE ESCAPE SECO (ppm) | 197,99 | 7,51   | 18,46  | 207,77 | 937,43 | 1240,80 | 2139,10 | 358,70 | 873,43 | 1382,60 |
| MATERIAL PARTICULADO (g/kWh)                                | 0,43   | 0,58   | 0,48   | 0,25   | 0,12   | 0,09    | 0,06    | 0,28   | 0,21   | 0,15    |
| EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> (g/kWh)                          | 688,25 | 688,22 | 672,56 | 656,96 | 649,37 | 647,88  | 648,94  | 668,50 | 670,61 | 675,27  |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

#### 4.7.1. Comparação com o Cenário Diesel

A Tabela 25 apresenta a comparação dos parâmetros de desempenho com o cenário do diesel e as Figuras 60, 61 e 62 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 25 - Comparação dos Resultados de Desempenho do Motor (Diesel X B90H10)

| RPM  | Torque Diesel | Torque B90H10 | Potência Diesel | Potência B90H10 | Eficiência Diesel | Eficiência B90H10 |
|------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 1250 | 341,03        | 366,53        | 44,64           | 47,98           | 0,38              | 0,37              |
| 1500 | 441,37        | 474,83        | 69,33           | 74,58           | 0,37              | 0,37              |
| 1750 | 467,65        | 504,32        | 85,70           | 92,42           | 0,38              | 0,38              |
| 2000 | 474,87        | 511,99        | 99,45           | 107,22          | 0,39              | 0,39              |
| 2250 | 468,47        | 506,09        | 110,37          | 119,24          | 0,39              | 0,39              |
| 2500 | 462,47        | 500,13        | 121,07          | 130,92          | 0,40              | 0,40              |
| 2750 | 452,55        | 487,84        | 130,31          | 140,48          | 0,40              | 0,40              |
| 3000 | 451,18        | 489,46        | 141,73          | 153,76          | 0,38              | 0,38              |
| 3250 | 419,27        | 455,59        | 142,68          | 155,04          | 0,38              | 0,38              |
| 3500 | 389,60        | 424,99        | 142,79          | 155,75          | 0,38              | 0,38              |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Os resultados de torque efetivo demonstram incremento significativo do desempenho mecânico quando comparado aos cenários anteriores. Observa-se elevação progressiva do torque até a faixa intermediária de rotação, atingindo valores máximos superiores a 510 Nm, os maiores dentre todos os combustíveis avaliados. Esse comportamento evidencia a maior taxa de liberação de energia e a melhoria da eficiência de combustão proporcionadas pela maior participação do hidrogênio.

A potência efetiva apresenta crescimento contínuo com o aumento da rotação, alcançando valores próximos de 156 kW nas maiores rotações, também superiores aos cenários precedentes. Esse ganho confirma que a mistura enriquecida com hidrogênio favorece a conversão da energia química em trabalho útil, resultando em melhoria global do desempenho do motor.

A eficiência térmica do motor apresenta leve incremento, atingindo valores próximos de 0,40 em alguns pontos de operação, representando o maior rendimento entre todos os cenários analisados. Esse resultado está associado à combustão mais rápida e completa, que reduz perdas térmicas e maximiza a fração de energia convertida em trabalho mecânico.

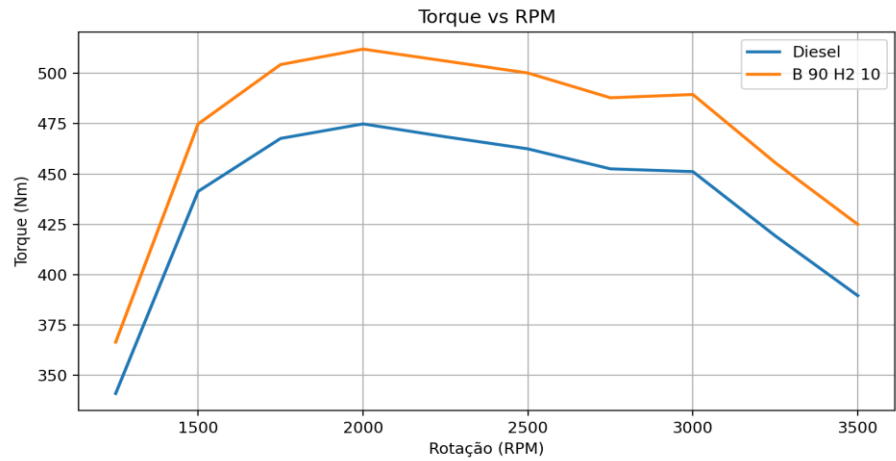


Figura 60 - Gráfico Comparativo de Torque (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

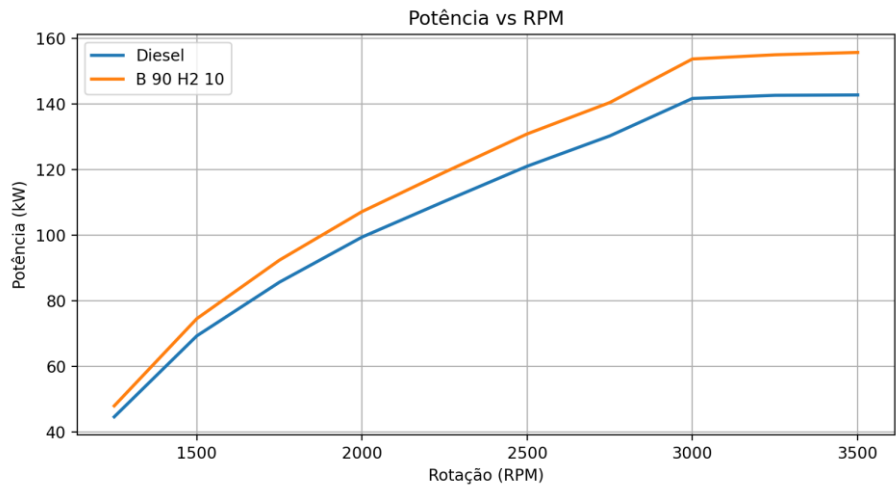


Figura 61 - Gráfico Comparativo de Potência (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

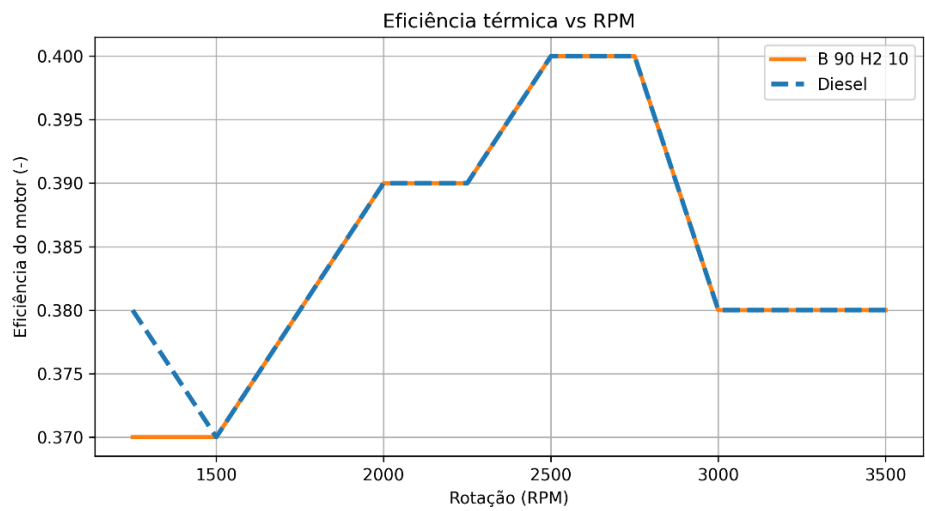


Figura 62 - Gráfico Comparativo de Eficiência (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 26 apresenta a comparação dos parâmetros de consumo e perdas com o cenário do diesel e as Figuras 63, 64 e 65 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 26 - Comparação dos Resultados de Consumo/Perdas do Motor (Diesel X B90H10)

| RPM  | Consumo Diesel | Consumo B90H10 | $\lambda$ Diesel | $\lambda$ B90H10 | PMA Diesel | PMA B90H10 |
|------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------|------------|
| 1250 | 0,23           | 0,24           | 1,34             | 1,34             | 1,46       | 1,50       |
| 1500 | 0,23           | 0,24           | 1,18             | 1,18             | 1,78       | 1,84       |
| 1750 | 0,22           | 0,23           | 1,22             | 1,22             | 1,95       | 2,02       |
| 2000 | 0,22           | 0,23           | 1,32             | 1,32             | 2,13       | 2,20       |
| 2250 | 0,21           | 0,23           | 1,41             | 1,41             | 2,27       | 2,35       |
| 2500 | 0,21           | 0,23           | 1,44             | 1,44             | 2,37       | 2,45       |
| 2750 | 0,21           | 0,23           | 1,52             | 1,52             | 2,50       | 2,59       |
| 3000 | 0,22           | 0,23           | 1,34             | 1,34             | 2,50       | 2,60       |
| 3250 | 0,22           | 0,23           | 1,40             | 1,41             | 2,54       | 2,64       |
| 3500 | 0,23           | 0,24           | 1,46             | 1,47             | 2,58       | 2,67       |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

O consumo específico de combustível apresenta redução consistente ao longo da faixa de operação, com valores mínimos próximos de 0,23 kg/kWh, inferiores aos obtidos com biodiesel puro e com menores frações de hidrogênio. Tal comportamento indica menor demanda de combustível para geração da mesma potência, evidenciando melhora do aproveitamento energético do sistema.

A pressão média efetiva mantém tendência crescente com a rotação, comportamento consistente com os demais cenários, indicando que as perdas mecânicas, assim como citado anteriormente, continuam predominantemente dependentes do regime operacional e praticamente independentes do tipo de combustível empregado.

A razão ar-combustível equivalente ( $\lambda$ ) permanece superior à unidade em toda a faixa de operação. A presença combinada de oxigênio no biodiesel e da alta reatividade do hidrogênio contribui para maior eficiência de oxidação, favorecendo combustão mais limpa.

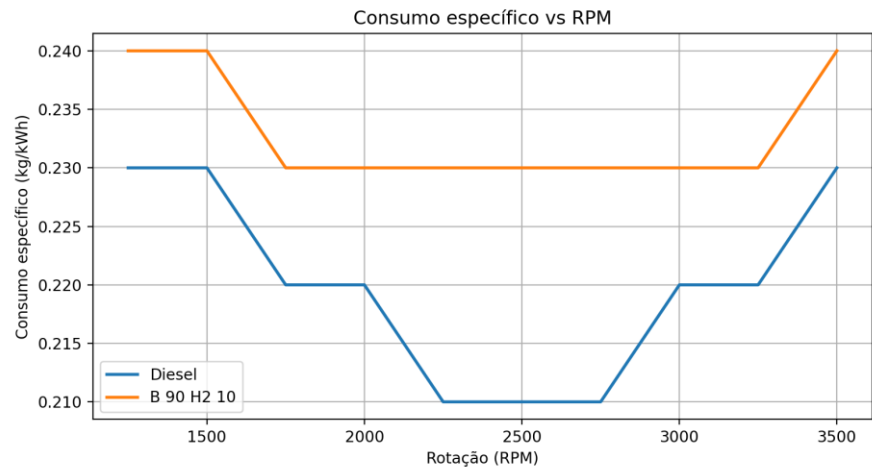


Figura 63 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

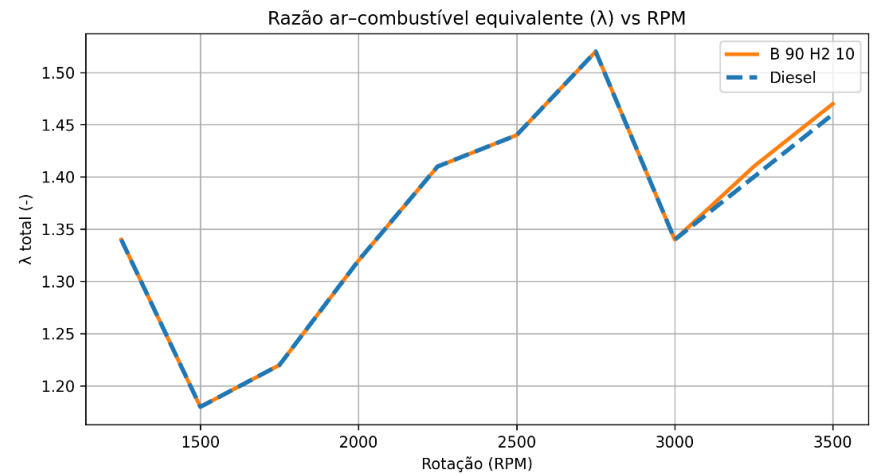


Figura 64 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

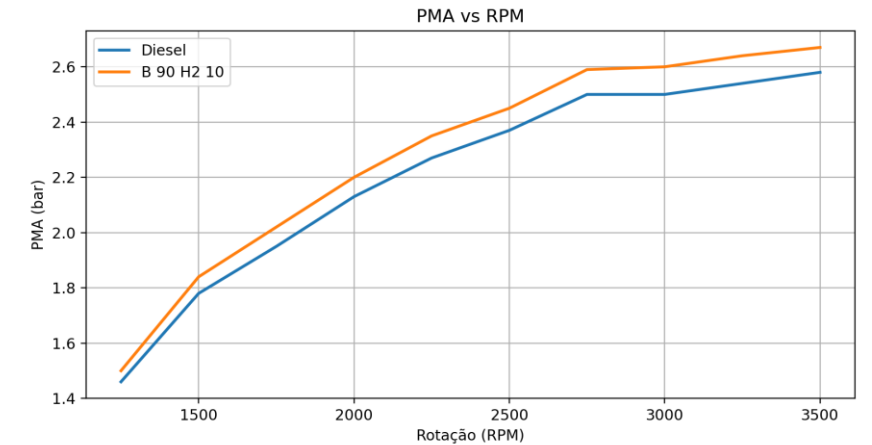


Figura 65 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Tabela 27 apresenta a comparação dos parâmetros de emissão com o cenário do diesel e as Figuras 66, 67 e 68 apresentam os gráficos dessa comparação.

Tabela 27 - Comparação dos Resultados de Emissões do Motor (Diesel X B90H10)

| RPM  | NOx Diesel | NOx B90H10 | MP Diesel | MP B90H10 | CO <sub>2</sub> Diesel | CO <sub>2</sub> B90H10 |
|------|------------|------------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|
| 1250 | 0,54       | 197,99     | 0,55      | 0,43      | 727,64                 | 688,25                 |
| 1500 | 0,01       | 7,51       | 0,73      | 0,58      | 729,45                 | 688,22                 |
| 1750 | 0,01       | 18,46      | 0,66      | 0,48      | 714,70                 | 672,56                 |
| 2000 | 0,39       | 207,77     | 0,43      | 0,25      | 698,13                 | 656,96                 |
| 2250 | 5,28       | 937,43     | 0,28      | 0,12      | 691,39                 | 649,37                 |
| 2500 | 10,76      | 1240,80    | 0,24      | 0,09      | 690,48                 | 647,88                 |
| 2750 | 53,60      | 2139,10    | 0,22      | 0,06      | 689,88                 | 648,94                 |
| 3000 | 0,80       | 358,70     | 0,54      | 0,28      | 715,01                 | 668,50                 |
| 3250 | 4,13       | 873,43     | 0,44      | 0,21      | 718,35                 | 670,61                 |
| 3500 | 12,84      | 1382,60    | 0,36      | 0,15      | 725,37                 | 675,27                 |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

No que se refere às emissões, observa-se redução adicional do material particulado, atingindo os menores valores entre todos os cenários simulados. Esse resultado é diretamente relacionado à menor fração de carbono da mistura combustível e à melhoria da qualidade da combustão, que inibe a formação de fuligem e hidrocarbonetos não queimados.

Por outro lado, verifica-se elevação significativa das emissões de NO<sub>x</sub>, especialmente nas rotações intermediárias e de alta carga. Esse comportamento representa o principal compromisso ambiental da adição de maiores frações de hidrogênio, indicando a necessidade de estratégias complementares de controle, como recirculação de gases de escape (EGR), otimização da temporização de injeção ou sistemas de pós-tratamento catalítico.

As emissões específicas de CO<sub>2</sub> apresentam leve redução média em comparação aos cenários com maior participação de biodiesel, refletindo a menor fração de carbono do combustível total e o aumento da eficiência energética do motor.

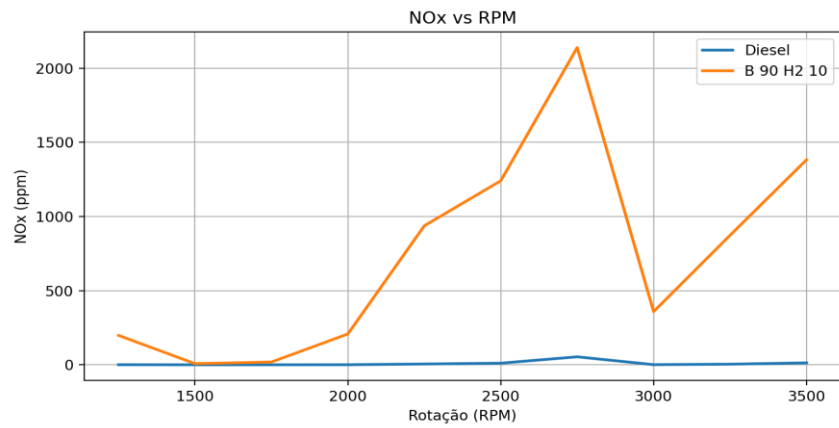


Figura 66 - Gráfico Comparativo das Emissões de NOX (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

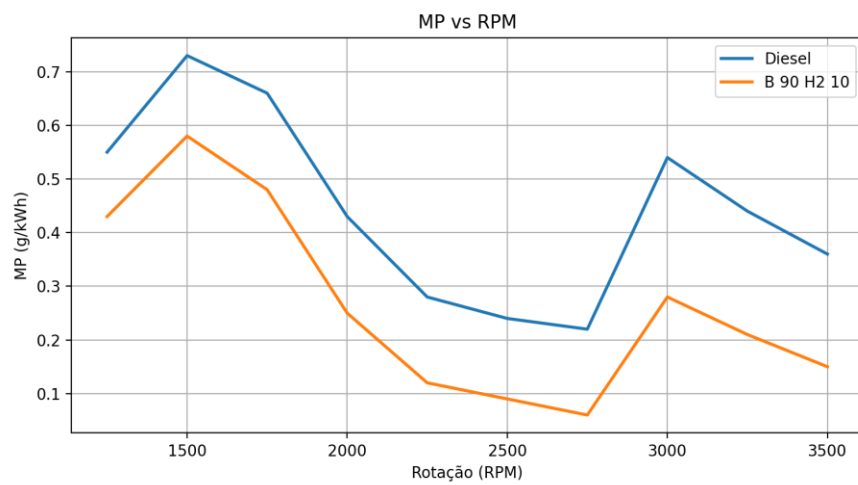


Figura 67 - Gráfico Comparativo das Emissões de Material Particulado (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

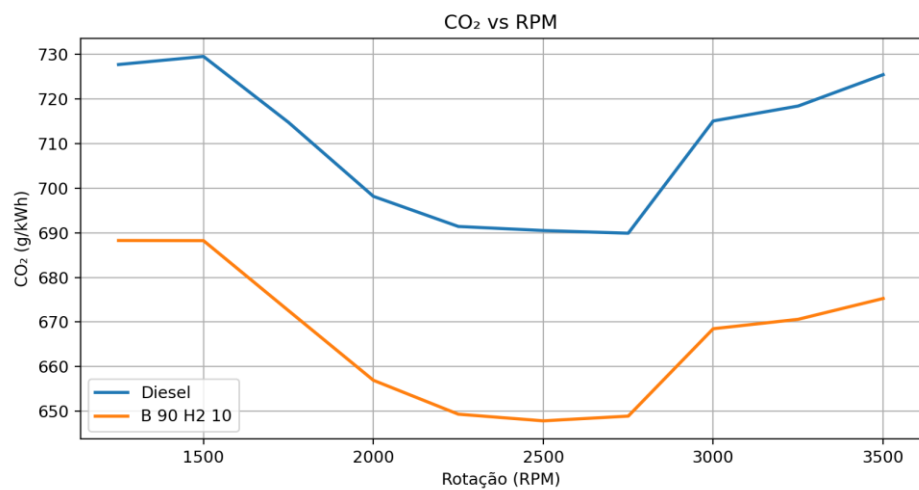


Figura 68 - Gráfico Comparativo das Emissões de CO2 (Diesel X B90H10)  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

De forma geral, este cenário confirma a tendência progressiva observada ao longo do estudo, na qual o aumento da fração de hidrogênio resulta em:

- elevação de torque e potência;
- redução do consumo específico;
- incremento da eficiência térmica;
- diminuição do material particulado;
- aumento das emissões de NO<sub>x</sub>.

Dessa forma, conclui-se que a adição de hidrogênio ao biodiesel configura-se como uma estratégia tecnicamente viável para melhoria do desempenho energético e redução de poluentes associados à combustão incompleta, sendo particularmente eficaz em teores mais elevados. Contudo, o controle das emissões de NO<sub>x</sub> torna-se fator determinante para a aplicação prática dessa tecnologia, exigindo soluções complementares de mitigação.

#### **4.8. Comparação Entre Todos os Cenários**

Com o objetivo de consolidar e sintetizar os resultados obtidos nas etapas anteriores, apresenta-se nesta seção uma análise comparativa global contemplando todos os combustíveis avaliados, incluindo o diesel de referência, o biodiesel puro (B100) e as misturas de biodiesel com adições progressivas de hidrogênio (2,5%, 5%, 7,5% e 10% em base energética). Essa abordagem permite avaliar de forma integrada as tendências de torque, potência, eficiência térmica, formação de NO<sub>x</sub>, emissão de material particulado e CO<sub>2</sub> e consumo de combustível, fator lambda e a pressão média de atrito, representados respectivamente pelas Tabelas 28 a 36 e pelas Figuras 65 a 73, facilitando, assim, a identificação dos impactos associados ao aumento gradual da participação do hidrogênio.

Para cada grandeza analisada são elaboradas tabelas consolidadas contendo os valores em toda a faixa de rotação do motor (1250–3500 rpm), bem como gráficos multilinhas que permitem a comparação simultânea entre todos os cenários. O diesel foi mantido como condição de referência, possibilitando a visualização direta dos ganhos ou perdas relativos de cada combustível alternativo.

A Tabela 28 apresenta os valores do torque efetivo para todos os cenários em função da rotação do motor, enquanto a Figura 69 ilustra a sobreposição das curvas características.

Tabela 28 - Comparação dos Resultados de Torque do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100   | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|--------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 341,03 | 326,30 | 335,33        | 347,15    | 357,13        | 366,53     |
| 1500 | 441,37 | 426,54 | 437,18        | 451,24    | 462,95        | 474,83     |
| 1750 | 467,65 | 452,60 | 463,91        | 478,93    | 491,75        | 504,32     |
| 2000 | 474,87 | 458,91 | 470,10        | 485,61    | 498,85        | 511,99     |
| 2250 | 468,47 | 452,96 | 464,13        | 479,75    | 492,76        | 506,09     |
| 2500 | 462,47 | 446,16 | 457,65        | 473,25    | 486,81        | 500,13     |
| 2750 | 452,55 | 435,27 | 446,12        | 461,47    | 474,76        | 487,84     |
| 3000 | 451,18 | 437,15 | 448,04        | 463,30    | 476,77        | 489,46     |
| 3250 | 419,27 | 405,83 | 416,17        | 430,62    | 443,12        | 455,59     |
| 3500 | 389,60 | 377,12 | 387,23        | 401,24    | 413,30        | 424,99     |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

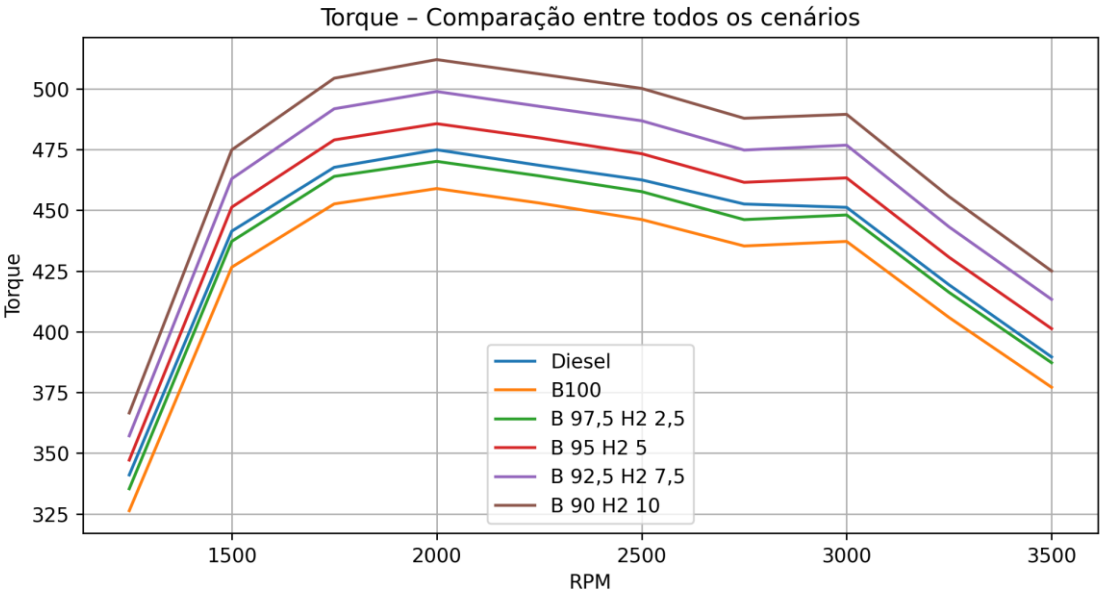


Figura 69 - Gráfico Comparativo de Torque Entre Todos os Cenários  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se aumento progressivo do torque máximo com o acréscimo da fração de hidrogênio, indicando melhora na liberação de energia durante a combustão e maior eficiência do processo de conversão termomecânica. Vale ressaltar que se nota um ganho quanto ao torque gerado, apenas a partir de 5% em volume de hidrogênio na composição do *dual fuel*.

A Tabela 29 reúne os valores de potência efetiva obtidos para cada combustível, sendo o comportamento comparativo visualizado na Figura 70 que ilustra o gráfico multilinhas correspondente.

Tabela 29 - Comparação dos Resultados de Potência do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100   | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|--------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 44,64  | 42,71  | 43,89         | 45,44     | 46,75         | 47,98      |
| 1500 | 69,33  | 67,00  | 68,67         | 70,88     | 72,71         | 74,58      |
| 1750 | 85,70  | 82,94  | 85,01         | 87,76     | 90,11         | 92,42      |
| 2000 | 99,45  | 96,11  | 98,45         | 101,70    | 104,47        | 107,22     |
| 2250 | 110,37 | 106,72 | 109,35        | 113,03    | 116,10        | 119,24     |
| 2500 | 121,07 | 116,80 | 119,80        | 123,89    | 127,44        | 130,92     |
| 2750 | 130,31 | 125,34 | 128,46        | 132,88    | 136,71        | 140,48     |
| 3000 | 141,73 | 137,32 | 140,75        | 145,54    | 149,77        | 153,76     |
| 3250 | 142,68 | 138,11 | 141,63        | 146,54    | 150,80        | 155,04     |
| 3500 | 142,79 | 138,21 | 141,92        | 147,05    | 151,47        | 155,75     |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

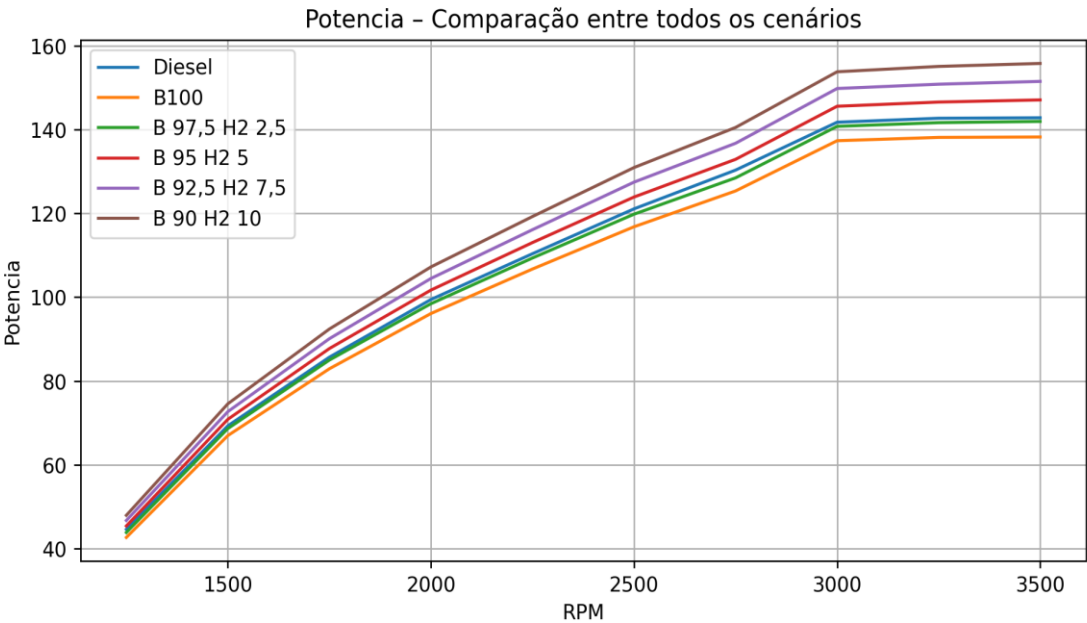


Figura 70 - Gráfico Comparativo de Potência Entre Todos os Cenários  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Nota-se crescimento consistente da potência máxima à medida que o teor de hidrogênio aumenta, evidenciando maior capacidade de geração de trabalho útil, especialmente em regimes de média e alta rotação. Vale ressaltar que há o mesmo comportamento quanto a porcentagem de hidrogênio em relação a potência do observado no gráfico dos torques.

A Tabela 30 apresenta o rendimento térmico do motor ao longo da faixa operacional, enquanto a Figura 71 permite comparar diretamente o desempenho energético global.

Tabela 30 - Comparação dos Resultados de Eficiência Térmica do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100 | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 0,38   | 0,37 | 0,37          | 0,37      | 0,37          | 0,37       |
| 1500 | 0,37   | 0,37 | 0,37          | 0,37      | 0,37          | 0,37       |
| 1750 | 0,38   | 0,38 | 0,38          | 0,38      | 0,38          | 0,38       |
| 2000 | 0,39   | 0,39 | 0,39          | 0,39      | 0,39          | 0,39       |
| 2250 | 0,39   | 0,39 | 0,39          | 0,39      | 0,39          | 0,39       |
| 2500 | 0,40   | 0,39 | 0,39          | 0,39      | 0,39          | 0,40       |
| 2750 | 0,40   | 0,39 | 0,39          | 0,39      | 0,39          | 0,40       |
| 3000 | 0,38   | 0,38 | 0,38          | 0,38      | 0,38          | 0,38       |
| 3250 | 0,38   | 0,38 | 0,38          | 0,38      | 0,38          | 0,38       |
| 3500 | 0,38   | 0,37 | 0,38          | 0,38      | 0,38          | 0,38       |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

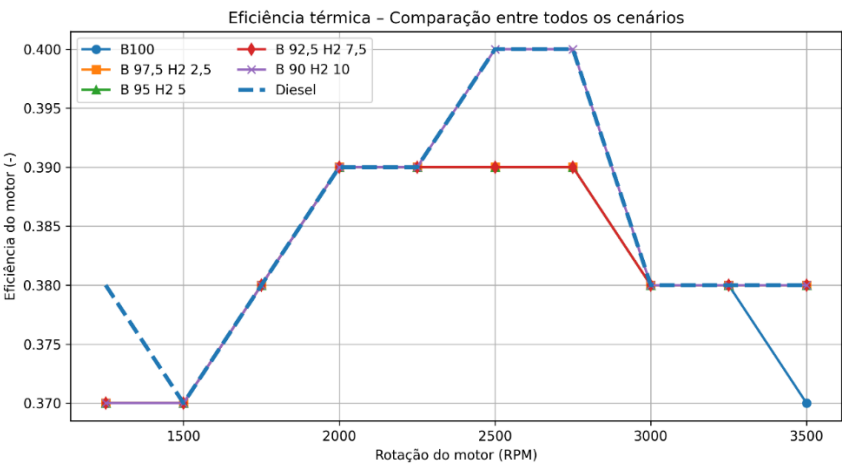


Figura 71 - Gráfico Comparativo de Eficiência Térmica Entre Todos os Cenários  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se que todos os combustíveis mantêm valores próximos, porém as misturas com maior teor de hidrogênio tendem a apresentar discretos ganhos, refletindo combustão mais rápida e completa.

A Tabela 31 e a Figura 72 demonstram a variação desse poluente entre os cenários analisados.

Tabela 31 - Comparação dos Resultados de Emissões de NOX do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100   | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|--------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 0,54   | 5,68   | 11,98         | 42,05     | 98,33         | 197,99     |
| 1500 | 0,01   | 0,08   | 0,22          | 1,02      | 2,89          | 7,51       |
| 1750 | 0,01   | 0,33   | 0,78          | 2,98      | 7,95          | 18,46      |
| 2000 | 0,39   | 8,51   | 16,18         | 48,79     | 104,94        | 207,77     |
| 2250 | 5,28   | 95,34  | 160,47        | 367,59    | 623,09        | 937,43     |
| 2500 | 10,76  | 164,45 | 262,82        | 552,95    | 859,07        | 1240,80    |
| 2750 | 53,60  | 610,45 | 835,38        | 1354,70   | 1755,20       | 2139,10    |
| 3000 | 0,80   | 21,16  | 38,49         | 104,34    | 206,07        | 358,70     |
| 3250 | 4,13   | 91,17  | 146,97        | 344,64    | 578,22        | 873,43     |
| 3500 | 12,84  | 226,59 | 344,00        | 677,51    | 1005,30       | 1382,60    |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

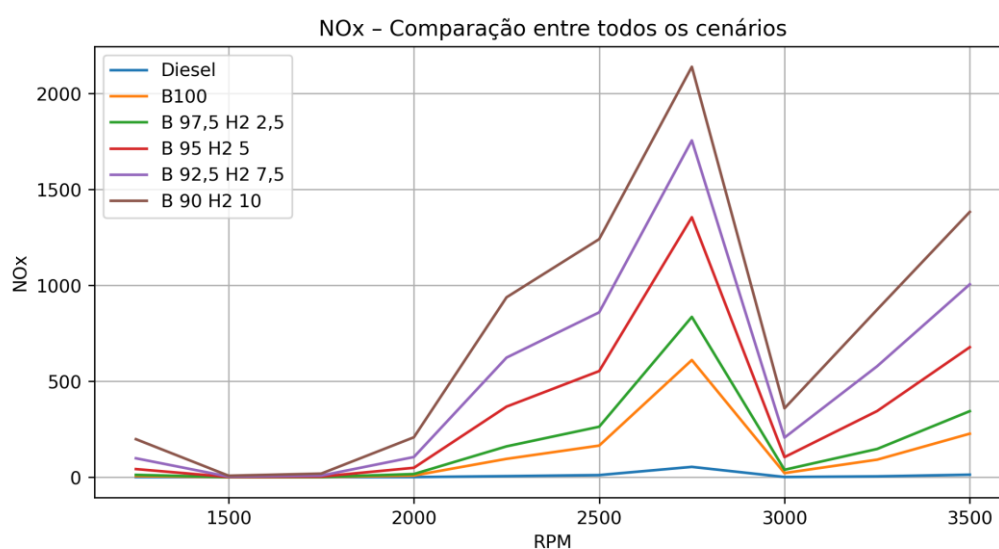


Figura 72 - Gráfico Comparativo das Emissões de NOX Entre Todos os Cenários

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Verifica-se aumento expressivo das emissões com o incremento do hidrogênio, especialmente em altas rotações, comportamento associado ao aumento das temperaturas de pico na câmara de combustão e à maior disponibilidade de oxigênio.

Os valores consolidados de material particulado são apresentados na Tabela 32, com visualização comparativa no gráfico multilinha apresentado na Figura 73.

Tabela 32 - Comparação dos Resultados de Emissões de Material Particulado do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100 | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 0,55   | 0,66 | 0,59          | 0,52      | 0,47          | 0,43       |
| 1500 | 0,73   | 0,76 | 0,71          | 0,65      | 0,61          | 0,58       |
| 1750 | 0,66   | 0,65 | 0,60          | 0,55      | 0,51          | 0,48       |
| 2000 | 0,43   | 0,37 | 0,34          | 0,30      | 0,27          | 0,25       |
| 2250 | 0,28   | 0,20 | 0,18          | 0,15      | 0,14          | 0,12       |
| 2500 | 0,24   | 0,17 | 0,15          | 0,12      | 0,11          | 0,09       |
| 2750 | 0,22   | 0,09 | 0,08          | 0,07      | 0,06          | 0,06       |
| 3000 | 0,54   | 0,37 | 0,34          | 0,32      | 0,30          | 0,28       |
| 3250 | 0,44   | 0,29 | 0,26          | 0,24      | 0,22          | 0,21       |
| 3500 | 0,36   | 0,23 | 0,20          | 0,17      | 0,16          | 0,15       |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

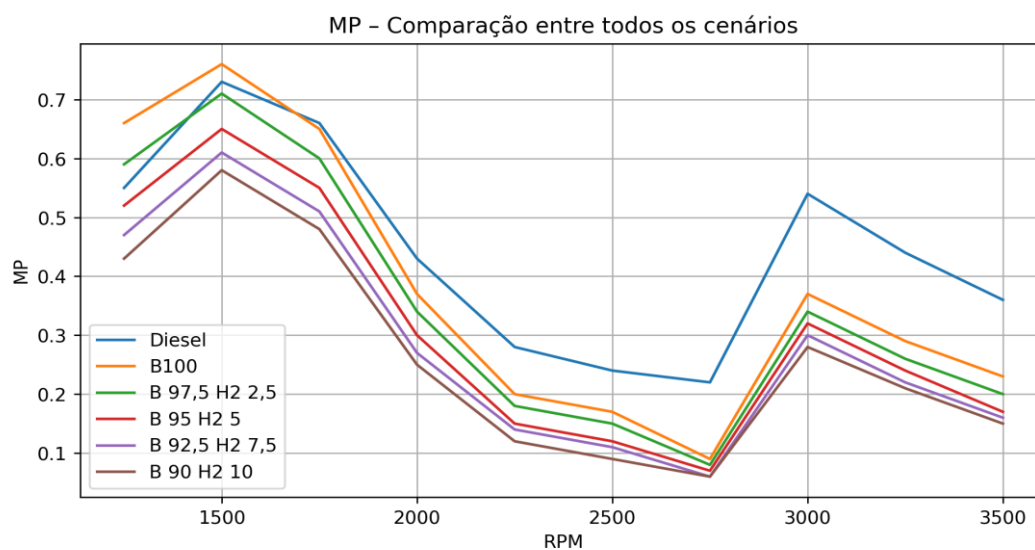


Figura 73 - Gráfico Comparativo das Emissões de Material Particulado Entre Todos os Cenários  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se redução progressiva das emissões de MP com o aumento da fração de hidrogênio, resultado esperado devido à menor quantidade de carbono disponível para formação de fuligem e à melhoria da qualidade da combustão.

A Tabela 33 e a Figura 74 permitem avaliar a emissão específica desse gás ao longo da operação.

Tabela 33 - Comparação dos Resultados de Emissões de CO<sub>2</sub> do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100   | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|--------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 727,64 | 774,32 | 748,15        | 727,21    | 706,53        | 688,25     |
| 1500 | 729,45 | 768,02 | 743,83        | 725,14    | 706,22        | 688,22     |
| 1750 | 714,70 | 751,41 | 727,62        | 709,18    | 690,17        | 672,56     |
| 2000 | 698,13 | 734,85 | 711,99        | 693,57    | 674,66        | 656,96     |
| 2250 | 691,39 | 727,25 | 704,48        | 685,83    | 667,23        | 649,37     |
| 2500 | 690,48 | 727,74 | 704,26        | 685,31    | 665,97        | 647,88     |
| 2750 | 689,88 | 728,56 | 705,69        | 686,56    | 667,09        | 648,94     |
| 3000 | 715,01 | 749,76 | 726,19        | 706,76    | 686,60        | 668,50     |
| 3250 | 718,35 | 754,09 | 729,98        | 709,98    | 689,75        | 670,61     |
| 3500 | 725,37 | 761,97 | 736,64        | 715,67    | 694,61        | 675,27     |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

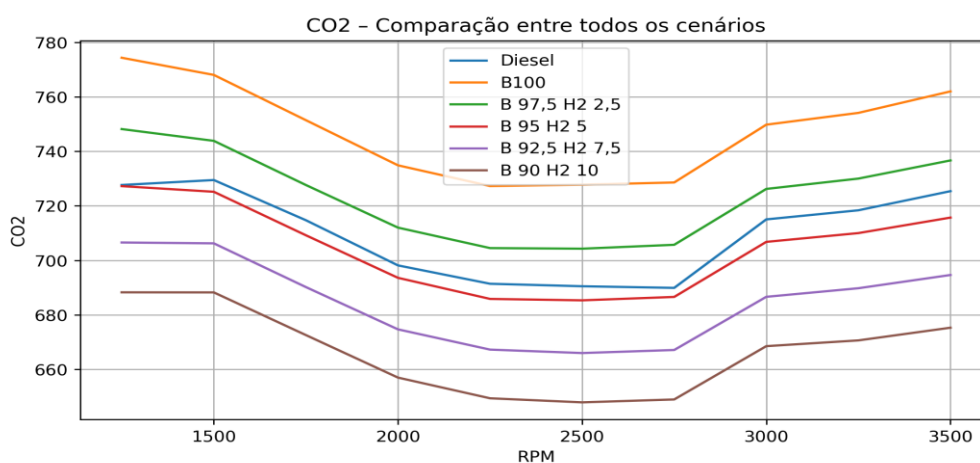


Figura 74 - Gráfico Comparativo das Emissões de CO<sub>2</sub> Entre Todos os Cenários  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Nota-se tendência de redução gradual à medida que o teor de hidrogênio cresce, refletindo a menor fração de carbono do combustível total e o aumento da eficiência

térmica do motor. Importante notar que ao trocar o diesel por biodiesel há um aumento na quantidade de material particulado emitido, devido ao maior número de hidrocarbonetos presentes no biodiesel, e esse cenário só será revertido a partir de 5% em volume de hidrogênio com o biodiesel.

A Tabela 34 apresenta a massa de combustível necessária para geração de potência útil, sendo os resultados comparados graficamente na Figura 75.

Tabela 34 - Comparação dos Resultados de Consumo Específico do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100 | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 0,23   | 0,27 | 0,26          | 0,25      | 0,25          | 0,24       |
| 1500 | 0,23   | 0,27 | 0,26          | 0,25      | 0,25          | 0,24       |
| 1750 | 0,22   | 0,26 | 0,25          | 0,25      | 0,24          | 0,23       |
| 2000 | 0,22   | 0,26 | 0,25          | 0,24      | 0,24          | 0,23       |
| 2250 | 0,21   | 0,25 | 0,25          | 0,24      | 0,23          | 0,23       |
| 2500 | 0,21   | 0,25 | 0,25          | 0,24      | 0,23          | 0,23       |
| 2750 | 0,21   | 0,25 | 0,25          | 0,24      | 0,23          | 0,23       |
| 3000 | 0,22   | 0,26 | 0,25          | 0,25      | 0,24          | 0,23       |
| 3250 | 0,22   | 0,26 | 0,26          | 0,25      | 0,24          | 0,23       |
| 3500 | 0,23   | 0,27 | 0,26          | 0,25      | 0,24          | 0,24       |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

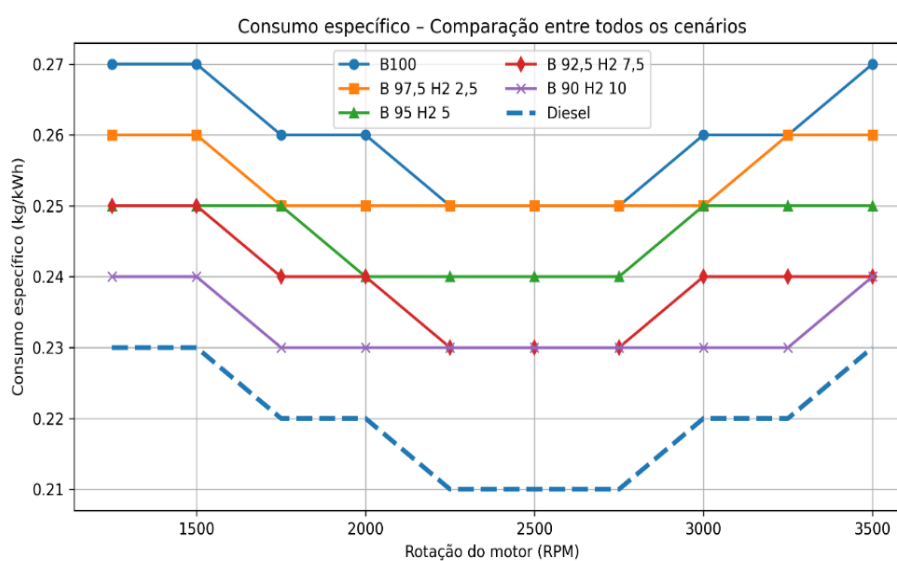


Figura 75 - Gráfico Comparativo do Consumo Específico Entre Todos os Cenários  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se redução progressiva do consumo nas misturas com hidrogênio, evidenciando melhor aproveitamento energético e menor demanda de combustível por unidade de trabalho produzido.

A Tabela 35 e o gráfico apresentado na Figura 76 mostram que todos os cenários operam em mistura pobre ( $\lambda > 1$ ).

Tabela 35 - Comparação dos Resultados de Razão Ar-Combustível Equivalente do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100 | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 1,34   | 1,34 | 1,34          | 1,34      | 1,34          | 1,34       |
| 1500 | 1,18   | 1,18 | 1,18          | 1,18      | 1,18          | 1,18       |
| 1750 | 1,22   | 1,22 | 1,22          | 1,22      | 1,22          | 1,22       |
| 2000 | 1,32   | 1,32 | 1,32          | 1,32      | 1,32          | 1,32       |
| 2250 | 1,41   | 1,41 | 1,41          | 1,41      | 1,41          | 1,41       |
| 2500 | 1,44   | 1,44 | 1,44          | 1,44      | 1,44          | 1,44       |
| 2750 | 1,52   | 1,52 | 1,52          | 1,52      | 1,52          | 1,52       |
| 3000 | 1,34   | 1,34 | 1,34          | 1,34      | 1,34          | 1,34       |
| 3250 | 1,40   | 1,40 | 1,41          | 1,41      | 1,41          | 1,41       |
| 3500 | 1,46   | 1,46 | 1,46          | 1,46      | 1,46          | 1,47       |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

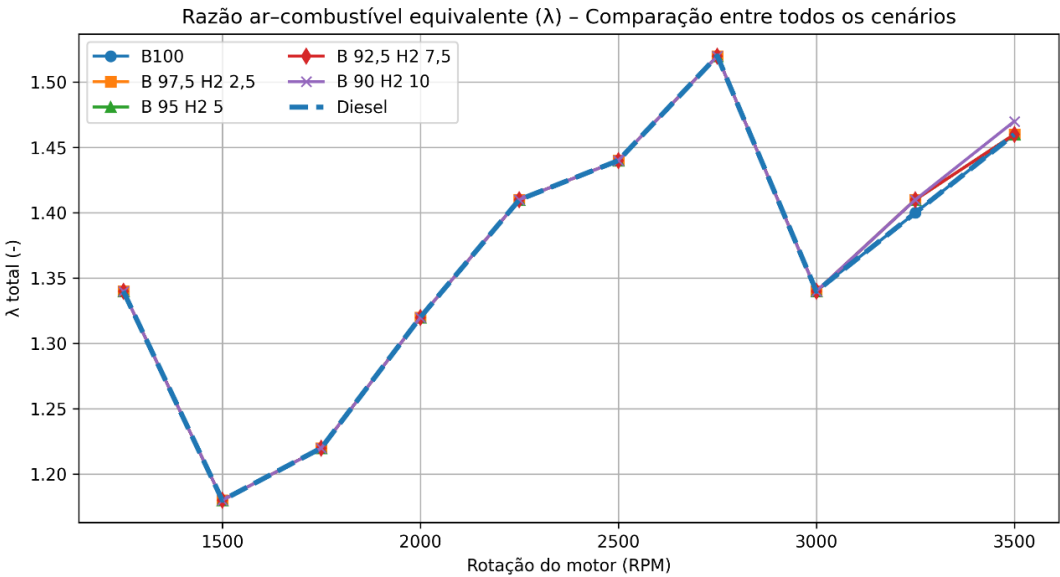


Figura 76 - Gráfico Comparativo da Razão Ar-Combustível Equivalente Entre Todos os Cenários  
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

As curvas permanecem próximas entre si, indicando que a adição de hidrogênio não altera significativamente o regime global de mistura, embora favoreça maior eficiência de oxidação durante a combustão.

Os valores de pressão média efetiva são apresentados na Tabela 36 e no gráfico comparativo presente na Figura 77.

Tabela 36 - Comparação dos Resultados de Pressão média efetiva do Motor para Todos os Cenários

| RPM  | Diesel | B100 | B 97,5 H2 2,5 | B 95 H2 5 | B 92,5 H2 7,5 | B 90 H2 10 |
|------|--------|------|---------------|-----------|---------------|------------|
| 1250 | 1,46   | 1,43 | 1,45          | 1,47      | 1,48          | 1,50       |
| 1500 | 1,78   | 1,76 | 1,78          | 1,80      | 1,82          | 1,84       |
| 1750 | 1,95   | 1,94 | 1,96          | 1,98      | 2,00          | 2,02       |
| 2000 | 2,13   | 2,12 | 2,14          | 2,16      | 2,18          | 2,20       |
| 2250 | 2,27   | 2,27 | 2,29          | 2,31      | 2,34          | 2,35       |
| 2500 | 2,37   | 2,36 | 2,38          | 2,41      | 2,43          | 2,45       |
| 2750 | 2,50   | 2,51 | 2,53          | 2,55      | 2,57          | 2,59       |
| 3000 | 2,50   | 2,52 | 2,54          | 2,56      | 2,58          | 2,60       |
| 3250 | 2,54   | 2,56 | 2,58          | 2,60      | 2,62          | 2,64       |
| 3500 | 2,58   | 2,59 | 2,61          | 2,63      | 2,65          | 2,67       |

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

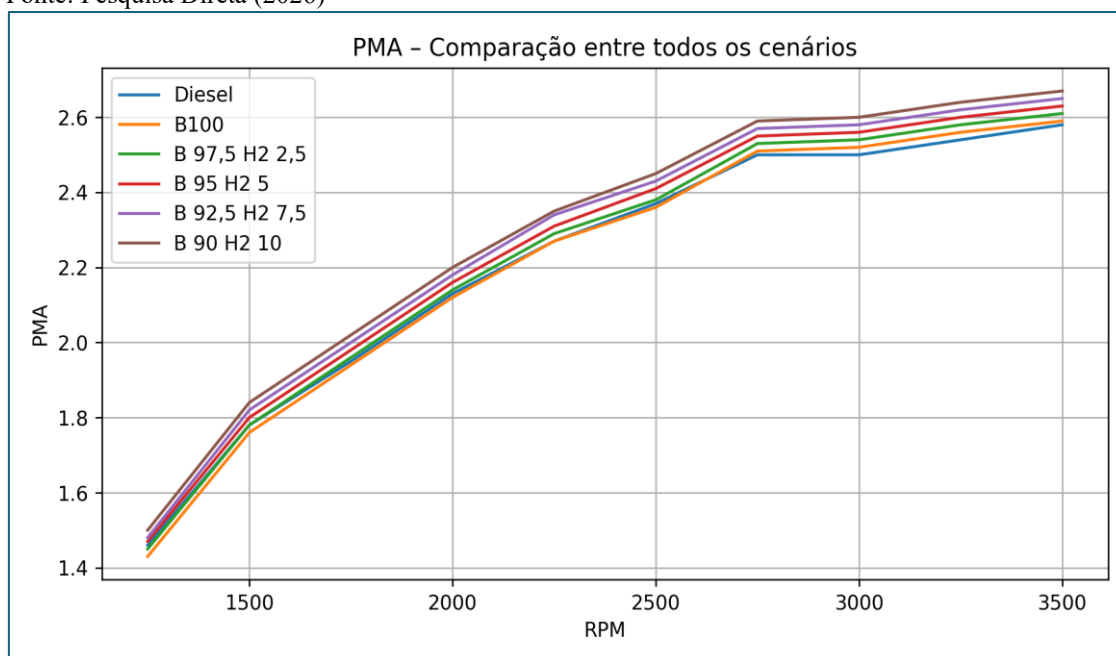


Figura 77 - Gráfico Comparativo da Pressão média efetiva Entre Todos os Cenários

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se comportamento semelhante para todos os combustíveis, com aumento progressivo em função da rotação, evidenciando que as perdas mecânicas estão predominantemente relacionadas ao regime operacional do motor, e não à composição do combustível.

A análise conjunta dos resultados evidencia tendência clara de melhoria do desempenho mecânico e energético do motor com o aumento da participação do hidrogênio nas misturas combustível. Observam-se incrementos graduais de torque e potência, redução do consumo específico e discretos ganhos de eficiência térmica, confirmando a contribuição do hidrogênio para uma combustão mais rápida, homogênea e eficiente.

Do ponto de vista ambiental, verifica-se redução consistente das emissões de material particulado e diminuição moderada do CO<sub>2</sub> específico, reforçando o potencial das misturas enriquecidas com hidrogênio para mitigação de poluentes associados à combustão incompleta. Entretanto, o aumento significativo das emissões de NOX constitui o principal efeito adverso observado, demandando a adoção de estratégias complementares de controle, como ajustes de temporização de injeção, recirculação de gases de escape ou sistemas de pós-tratamento.

De forma geral, os resultados confirmam que a adição progressiva de hidrogênio ao biodiesel apresenta potencial técnico relevante para melhorar o desempenho e reduzir parte das emissões do motor, destacando-se como alternativa promissora para aplicações que visem maior eficiência energética e menor impacto ambiental, desde que acompanhada de medidas adequadas para mitigação dos óxidos de nitrogênio.

## 5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

### 5.1. Conclusões

Este trabalho tem como objetivo avaliar computacionalmente os efeitos da adição de hidrogênio ao biodiesel de soja sobre o desempenho, o consumo e as emissões de um motor de combustão interna de ignição por compressão, por meio de simulações realizadas no software Diesel-RK. Para isso, realiza-se inicialmente a validação do modelo termodinâmico do motor operando com diesel mineral, seguida da análise comparativa entre o diesel de referência, o biodiesel puro (B100) e misturas biodiesel–hidrogênio com diferentes frações volumétricas de  $H_2$ .

A etapa de validação demonstra que o modelo computacional reproduz de forma satisfatória as curvas de torque e potência fornecidas pelo fabricante, apresentando erros médios reduzidos e comportamento coerente ao longo da faixa operacional analisada. Esses resultados confirmam a confiabilidade do modelo para a realização de análises comparativas entre diferentes combustíveis.

A substituição do diesel mineral por biodiesel puro resulta em desempenho global semelhante, porém com redução moderada de torque e potência, associada principalmente ao menor poder calorífico do biodiesel. Observa-se aumento do consumo específico de combustível, enquanto a eficiência térmica mantém-se próxima à obtida com o diesel. Do ponto de vista ambiental, verifica-se redução das emissões de material particulado, acompanhada de elevação nas emissões de óxidos de nitrogênio.

A adição progressiva de hidrogênio ao biodiesel promove modificações significativas no desempenho do motor. Os resultados indicam aumento consistente do torque e da potência efetiva à medida que a fração volumétrica de hidrogênio é ampliada, evidenciando melhorias na qualidade da combustão e na taxa de liberação de calor. Paralelamente, observa-se redução do consumo específico de combustível e ganhos discretos de eficiência térmica, indicando melhor aproveitamento da energia química do combustível.

No aspecto ambiental, as misturas enriquecidas com hidrogênio apresentam reduções graduais nas emissões de material particulado e de dióxido de carbono específico, comportamento associado à menor fração de carbono do combustível e à combustão mais completa proporcionada pelo hidrogênio. Em contrapartida, verifica-se

aumento das emissões de óxidos de nitrogênio, especialmente nos cenários com maiores teores de hidrogênio, efeito relacionado ao aumento das temperaturas máximas de combustão.

Os parâmetros mecânicos, como a pressão média de atrito, apresentam comportamento semelhante em todos os cenários analisados, indicando que as perdas internas do motor dependem predominantemente do regime de rotação, e não da composição do combustível. De forma análoga, o fator  $\lambda$  mantém características típicas de operação em mistura pobre, sem variações significativas entre os combustíveis avaliados.

De modo geral, a análise comparativa demonstra que a suplementação por hidrogênio em motores Diesel operando com biodiesel é tecnicamente promissora do ponto de vista do desempenho energético e da redução de emissões associadas à combustão incompleta. Entretanto, os ganhos obtidos associam-se ao aumento das emissões de NO<sub>x</sub>, evidenciando a necessidade de estratégias complementares de controle para viabilizar sua aplicação prática.

## **5.2. Recomendações para trabalhos futuros**

Com base nas limitações do presente estudo e nas oportunidades identificadas a partir das simulações computacionais, recomenda-se que trabalhos futuros contemplem:

- a realização de ensaios experimentais em bancada ou em dinamômetro, com o objetivo de validar, em condições reais de operação, os resultados obtidos por simulação computacional;
- a avaliação detalhada de estratégias de mitigação das emissões de óxidos de nitrogênio, tais como a recirculação de gases de escape (EGR), o ajuste do ponto de injeção, a adoção de múltiplas injeções e o emprego de sistemas de pós-tratamento catalítico, como a redução catalítica seletiva (SCR);
- a modelagem termoquímica completa de reformadores de biodiesel, incluindo as rotas de reforma a vapor, reforma autotérmica e oxidação parcial, de modo a permitir a análise de balanços energéticos, eficiência global do sistema e comportamento dinâmico da produção de hidrogênio;

- a investigação dos efeitos do uso contínuo de hidrogênio sobre a durabilidade e a integridade dos componentes do motor, especialmente válvulas, injetores e elementos da câmara de combustão;
- a avaliação energética e econômica do sistema completo, englobando as etapas de produção, reforma, armazenamento e utilização do hidrogênio, com vistas à determinação da viabilidade técnico-econômica em aplicações reais;
- o estudo de outras rotas renováveis de produção de hidrogênio, como a eletrólise da água alimentada por fontes solares ou eólicas, possibilitando a comparação do impacto ambiental e do ciclo de vida das emissões associadas a cada alternativa.

## REFERÊNCIAS

ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. **Sobre o biodiesel:** definição, matérias-primas e propriedades. Disponível em: <https://www.abiove.org.br/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **World Energy Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/>. Acesso em: 5 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014**. Dispõe sobre a especificação do biodiesel. Brasília, DF: ANP, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Resolução ANP nº 909, de 2022**. Especificação do biodiesel e aditivação obrigatória. Brasília, DF: ANP, 2022.

BODIESELBR. **Propriedades físicas e químicas do biodiesel, 2006**. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/biodiesel/especificacoes/biodiesel-propriedades-fisicas-quimicas>. Acesso em: 8 nov. 2025.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2012. v. 1.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2018. *E-book*. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br>. Acesso em: 20 dez. 2022.

CÂMARA, J. K. **Simulação do uso de hidrogênio em motores alimentados com biodiesel**. Ouro Preto, MG, 2025. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br>. Acesso em: 5 nov. 2025.

CARVALHO, M. A. S. **Avaliação de um motor de combustão interna Ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. *E-book*. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br>. Acesso em: 7 nov. 2025.

CORRÊA, I. M. *et al.* Desempenho de motor diesel com misturas de biodiesel de girassol. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2497-2503, 2008.

DAFRATEC. **Transesterificação**: fundamentos e aplicações na produção de biodiesel. 2025. Disponível em: <https://www.dafratec.com>. Acesso em: 8 nov. 2025.

DOU, B. *et al.* Hydrogen production from catalytic steam reforming of biodiesel byproduct glycerol: Issues and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 950-960, 2014.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Transesterificação**: processo de produção de biodiesel. Portal Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 8 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Hidrogênio e biomassa**: oportunidades para produção e uso no Brasil. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 7 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 7 nov. 2025.

EPBR - Energia e Política Brasil. **Classificação do hidrogênio**: cores e métodos de produção. 2023. Disponível em: <https://www.epbr.com.br>. Acesso em: 8 nov. 2025.

FAIZAL, M. *et al.* Hydrogen fuel cell engine for sustainable future: a review of various aspects. **Energy Conversion and Management**, v. 185, p. 415-440, 2019.

FERGUSON, C. R. **Internal Combustion Engines**: Applied Thermosciences. New York, NY: John Wiley & Sons, 2001.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário Aurélio da língua portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Positivo, 2015.

FONSECA, João José Saraiva da. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.

FORD MOTOR COMPANY. **Ford Ranger Technical Specifications**: 3.2L Duratorq TDCi Engine. Ford Service Content, 2024. Disponível em: <https://www.fordservicecontent.com>. Acesso em: 18 nov. 2025.

GAMA, P. E.; MACÊDO, W. A. A.; PARENTE JR., E. V. Produção de biodiesel através de transesterificação in situ com sementes de girassol. **Química Nova**, v. 33, n. 9, p. 1859-1862, 2010.

- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2020.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GUARIEIRO, A. L. N. **Estudo das propriedades físicas, químicas e toxicológicas de nanopartículas emitidas por motor diesel utilizando misturas biodiesel/diesel**. 2013. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- HIELSCHER. **Biodiesel através de (trans-)esterificação melhorada por ultrassom**. 2024. Disponível em: <https://www.hielscher.com>. Acesso em: 8 nov. 2025.
- HOSSEINI, S. H. *et al.* Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Net Zero Energy for a Sustainable Future**. Paris: IEA Publications, 2023.
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Regulação do biodiesel**: especificação e controle de qualidade. Rio de Janeiro: INMETRO, 2022.
- KUMAR, V. **Fundamentals of Engine Design**. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- LEONE, F.; FERREIRA NETO, V. **Estudo da eficiência de um motor a partir da simulação pelo software Diesel-RK**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.
- LÔBO, I. P. *et al.* Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, 2009.
- MARTIN, S. *et al.* An experimental investigation of biodiesel steam reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 1, p. 95-105, 2015a.

MARTIN, S. *et al.* Direct steam reforming of diesel and diesel–biodiesel blends for distributed hydrogen generation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 1, p. 75-84, 2015b.

MARTIN, S.; WÖRNER, A. On-board reforming of biodiesel and bioethanol for high temperature PEM fuel cells: Comparison of autothermal reforming and steam reforming. **Journal of Power Sources**, v. 196, n. 6, p. 3163-3171, 2011.

MARTINELLI, L. C. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

MARTINI, N. *et al.* Consumo de óleo de soja pré-aquecido por motor diesel. **Revista Brasileira de Agrosience**, v. 18, n. 2-4, p. 213-220, 2012.

MINAYO, Maria Cecília de Souza. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 7. ed. São Paulo: Hucitec, 2003.

MOREIRA, A. B. L. *et al.* Produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor: uma revisão bibliométrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 10., 2024, Natal. **Anais...** Natal: CBENS, 2024.

OLIVEIRA, M. E. C. **Produção de biodiesel de óleo de palma e seus resíduos graxos por transesterificação e esterificação**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2012.

ORBEN, J. M. C. *et al.* Produção e caracterização de biodiesel de óleo de soja refinado e seus comparativos. **E-revista UNIOESTE**, 2019. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br>. Acesso em: 8 nov. 2025.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: Tecbio, 2003.

PASINI, C. **Aplicações de hidrogênio em motores de combustão interna: potencial e desafios**. [S.l.: s.n.], 2020.

PIRELLI. **Hidrogênio como combustível: prós e contras**. 2023. Disponível em: <https://www.pirelli.com>. Acesso em: 5 nov. 2025.

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.

RAIZEN. **Biodiesel: características do biocombustível**. 2025. Disponível em: <https://www.raizen.com.br>. Acesso em: 8 nov. 2025.

RAMOS, L. P. *et al.* Biodiesel: matérias-primas, tecnologias de produção e propriedades combustíveis. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 317-369, 2017.

RAMOS, V. R. **Análise técnica do uso de etanol em um motor de combustão interna para diferentes razões de compressão**. 2019. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

REVISTAIFSPSR. **Estudo comparativo das culturas de soja e dendê para produção de biodiesel**. 2025. Disponível em: <https://www.revistaifpsr.com>. Acesso em: 8 nov. 2025.

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

SAIDI, M.; MORADI, P. Conversion of biodiesel synthesis waste to hydrogen in membrane reactor: Theoretical study of glycerol steam reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 15, p. 8715-8726, 2020.

SANTOS, F. M. P.; SOUZA, L. S. N. **Estudo da utilização de hidrogênio como combustível auxiliar em motores de ciclo Otto**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2018.

SHERIF, S. A. *et al.* Hydrogen production, storage, utilization, and environmental impacts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 195-208, 2014.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 2004.

SILVA, J. P. F. **Comparação entre os processos de produção de hidrogênio**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

SILVA, T. G. D. *et al.* Comparação físico-química de biodiesel, diesel e gasolina através da caracterização de densidade e viscosidade. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS, 3., 2018, Maceió. **Anais...** Campina Grande: Realize Editora, 2018.

SILVA, T. R. V. D. **Estudo de estratégias de controle dos processos internos de um motor de combustão interna de injeção direta do etanol turbo-alimentado para**

**maximização da eficiência global.** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SIMÊNCIO, E. C. A. **Motores de combustão interna.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

SLINN, M. *et al.* Steam reforming of biodiesel by-product to make renewable hydrogen. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 13, p. 5851-5858, 2008.

SOUZA, C. D. R. *et al.* Caracterização físico-química das misturas binárias de biodiesel. **Revista Analytica**, n. 40, p. 74-80, 2009.

STONE, R. **Introduction to Internal Combustion Engines.** 4. ed. London: Palgrave Macmillan, 2012.

THOMPSON, A. Innovations in crankshaft technology. **Journal of Automotive Engineering**, v. 22, n. 7, p. 540-555, 2020.

TILLMANN, C. A. C. **Motores de combustão interna e seus sistemas.** Pelotas: IFSul, 2013.

TRUJILLO FERRARI, A. **Metodologia da pesquisa científica.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

TUKOFF, R. M. **Análise técnica do uso de etanol em motor de combustão interna usando o software Diesel RK.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

UFPB - Universidade Federal da Paraíba. **Propriedades do biodiesel:** densidade, viscosidade e número de cetano. João Pessoa: UFPB, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br>. Acesso em: 8 nov. 2025.

UNIAMERICA. **Produção de biodiesel a partir de óleo de soja usado.** Pleiade UniAmérica, 2019. Disponível em: <https://pleiade.uniamerica.br>. Acesso em: 8 nov. 2025.

VARGAS, B. S. *et al.* Características físico-químicas do biodiesel conforme normas da ANP. **Revista URCAMP**, 2017. Disponível em: <https://revista.urcamp.tche.br>. Acesso em: 8 nov. 2025.

VERHELST, S.; WALLNER, T. Hydrogen fueled internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, n. 6, p. 490-527, 2009.

- VICENTE, M. L. S.; CUEVAS, L. **A evolução dos motores de combustão interna**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br>. Acesso em: 7 nov. 2025.
- WALLIMAN, N. **Research methods: the basics**. 2. ed. London: Routledge, 2020.
- WANG, Y.; WAN, Z.; WANG, G. Hydrogen production from renewable energy. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, n. 5, p. 459-485, 2009.
- ZANINI, B. *et al.* Produção de biodiesel como estratégia para o pequeno produtor. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e50411326888, 2022.