

Análise Experimental de Parâmetros Operacionais em Motor Diesel Estacionário Para Futura Modelagem via Aprendizagem de Máquina

Ingred Siqueira de Oliveira¹, Segundo Tiago Mendes¹,

¹ *Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Brasil
(ingred.oliveira@ufvjm.edu.br)*

Resumo: Este trabalho apresenta a análise de dados experimentais de um motor Diesel sob diferentes condições de carga. Dados esses que futuramente serão utilizados como entrada para o treinamento de modelos computacionais baseados em técnicas de aprendizado de máquina. Foi observada a robustez desses dados o que os tornam viáveis para futura aplicação almejada.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Aprendizado de Máquina; Modelagem Preditiva.

INTRODUÇÃO

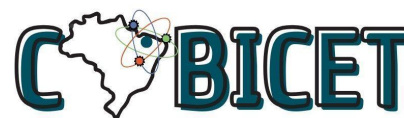
Os motores de combustão interna desempenham um papel crucial na matriz energética global ao realizar a conversão de energia térmica, proveniente da reação química de oxidação do combustível, em trabalho mecânico útil no eixo rotativo. Por se tratarem de sistemas complexos e amplamente disseminados, essas unidades térmicas são constantemente objeto de estudos acadêmicos e industriais focados na otimização do desempenho termodinâmico e na mitigação de emissões poluentes na atmosfera (HEYWOOD, 1988; BRUNETTI, 2012). Nesse sentido, o avanço da engenharia automotiva e de sistemas de potência tem sido impulsionado pela necessidade de compreender as variáveis internas do motor sob diferentes regimes de funcionamento. Trabalhos anteriores já exploraram com sucesso a obtenção de parâmetros operacionais utilizando diferentes tipos de combustíveis e misturas (MACHADO et al., 2023), bem como a análise aprofundada do rendimento efetivo e balanço térmico em ciclos Otto e Diesel (PINHEIRO; MENDES, 2023), consolidando a importância de dados experimentais para a validação de novos conceitos.

Garantir o desempenho adequado é fundamental quando se trata de motores de combustão interna de ciclo Diesel, visto que estes possuem ampla aplicação e relevância estratégica nos setores industrial, agrícola, de transporte automotivo de carga e na geração descentralizada de energia elétrica. As unidades motoras baseadas no ciclo Diesel destacam-se historicamente pela elevada eficiência térmica superior à do ciclo Otto devido às maiores razões de compressão, além de sua reconhecida robustez construtiva e confiabilidade operacional sob condições severas de trabalho. Em virtude do monitoramento e da manutenção do bom

desempenho do motor, obtêm-se vantagens diretas como a redução do consumo específico de combustível, a diminuição significativa da pegada de emissões gasosas e particuladas, e o aumento expressivo da vida útil dos componentes mecânicos e periféricos dos equipamentos industriais.

Apesar da maturidade tecnológica desses motores, a obtenção de indicadores operacionais precisos em tempo real impõe desafios práticos severos no cotidiano da engenharia. A modelagem e o controle de motores Diesel tradicionalmente dependem de complexas equações termodinâmicas, leis de conservação de massa e energia, mecânica dos fluidos aplicada e normas técnicas rigorosas de ensaio. Embora os modelos fenomenológicos tradicionais possuem alto valor conceitual, sua aplicação direta em sistemas de monitoramento industrial esbarra na necessidade de formulações matemáticas exaustivas que demandam alto esforço de calibração para cada geometria específica de motor. Além disso, a realização de ensaios experimentais contínuos em bancadas dinâmicas, embora altamente precisos, envolve custos financeiros elevados com combustíveis, desgaste de maquinário e o emprego de sistemas de aquisição de dados complexos que, muitas vezes, inviabilizam o rastreamento operacional contínuo no ambiente produtivo regular.

É nesse cenário de limitações físicas e operacionais que se justifica a exploração de técnicas de Inteligência Artificial (IA) e ciência de dados aplicadas aos sistemas de conversão de energia. Os algoritmos baseados em aprendizado de máquina ganham destaque pela capacidade ímpar de processar grandes volumes de dados provenientes de ensaios preliminares e gerar modelos preditivos ágeis, com baixíssimo custo computacional após o período de



treinamento. A transição da modelagem puramente física para os modelos baseados em dados (*data-driven*) representa uma quebra de paradigma na engenharia mecânica moderna. Em vez de deduzir equações para cada comportamento não linear do fluxo de gases ou da queima, os algoritmos matemáticos aprendem os padrões ocultos de correlação das variáveis independentes às respostas de desempenho do sistema térmico.

Dessa forma, a presente pesquisa fundamenta-se na utilização de um banco de dados empírico gerado a partir de testes rigorosos em uma bancada didática industrial. A partir dos dados experimentais aqui apresentados, o objetivo central é pavimentar o caminho para que modelos baseados em aprendizado de máquina realizem o sensoriamento virtual do sistema. Essa abordagem permitirá a predição precisa de variáveis operacionais complexas e o mapeamento do desempenho global do motor sem a necessidade de manter uma instrumentação física exaustiva, cara e intrusiva instalada de forma permanente no equipamento durante o regime produtivo. Com isso, busca-se entregar uma ferramenta computacional robusta e de rápida resposta que auxilie na otimização energética de sistemas baseados em motores ciclo Diesel através da inferência inteligente de dados.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram realizados nas dependências do laboratório utilizando uma infraestrutura dedicada ao estudo de sistemas térmicos. O aparato principal consiste em uma bancada didática para motores de combustão interna desenvolvida e fabricada pela Labtrix Indústria de Bancadas Técnicas Ltda., modelo XL 43.1, com ano de fabricação 2015. Esta bancada possui uma estrutura robusta projetada para suportar vibrações e garantir a segurança operacional durante testes em regimes severos, contando com uma potência elétrica instalada de 4,4kW e alimentação elétrica estabilizada de 220Vca em frequência de 60Hz.

O coração do sistema experimental é composto por um motor de combustão interna alternativo operando sob o ciclo Diesel. Trata-se de uma unidade motriz monocilíndrica que conta com sistema de injeção direta de combustível, configuração que reflete fielmente as características de motores industriais e agrícolas de pequeno porte. Em termos de limites de projeto e capacidades nominais de fábrica, o motor apresenta uma potência máxima de 5,0 CV, capacidade de atingir uma rotação máxima de 3600

rpm e um torque máximo de 1,25 kgf * m quando operando especificamente no regime de 2500 rpm.

Para viabilizar a aplicação de cargas controladas e simular diferentes condições de absorção de torque em regime permanente, o conjunto mecânico acopla-se diretamente a um dinamômetro de corrente contínua com excitação independente. Este freio dinamométrico possui uma capacidade nominal de potência de 10 kW e é alimentado por uma rede elétrica trifásica de 380 V. A integração do dinamômetro de excitação independente é fundamental para a precisão do ensaio, pois permite impor variações milimétricas de carga contrária ao eixo do motor, mantendo a estabilidade da rotação desejada para o registro seguro das variáveis físicas.

A condução dos ensaios experimentais seguiu rigorosamente as diretrizes estabelecidas pela normalização técnica nacional para testes de desempenho em motores de combustão interna. Os procedimentos laboratoriais foram conduzidos seguindo as determinações técnicas voltadas para motores de uso não veicular, aplicando especificamente a norma NBR 6396 (ABNT, 2011), adequada à natureza estacionária da bancada Labtrix XL43.1. A metodologia de ensaio para motores à gasolina e diesel fundamenta-se em protocolos consolidados de medição de variáveis operacionais (GONÇALVES; MENDES, 2023; GONÇALVES; MARO; MENDES, 2024)."

O mapeamento dos dados operacionais foi executado aplicando diferentes condições de carga sobre o motor em uma ampla faixa de trabalho. A fim de estruturar um banco de dados completo e representativo, os ensaios cobriram variações que partiram de 10% (regime de carga parcial leve) e avançaram progressivamente até 120% da carga nominal do equipamento (regime de sobrecarga temporária). Para mitigar os efeitos de oscilações transitórias e ruídos típicos de medições em motores monocilíndricos, adotou-se um critério de amostragem repetitiva: em cada uma das condições estáveis de carga, foram coletados dez dados pontuais consecutivos. Posteriormente, realizou-se o tratamento estatístico por meio do cálculo da média aritmética dessas leituras. Este procedimento assegura a obtenção de resultados mais confiáveis, reduzindo incertezas experimentais e blindando o banco de dados contra discrepâncias pontuais.

Durante a execução de cada condição operacional preestabelecida na bancada, os instrumentos e sensores integrados registraram continuamente os



três parâmetros primários de controle físico do sistema: a rotação do motor (N), o torque gerado no eixo (T) e a vazão volumétrica de ar que entra pelo coletor de aspiração ou admissão (Var). A coleta precisa dessas três variáveis primárias, combinada com o monitoramento contínuo das condições termodinâmicas do ambiente de teste (como temperatura e pressão atmosférica) e o conhecimento prévio das propriedades químicas do combustível utilizado, forneceu a base de contorno necessária para o processamento matemático do ensaio. A partir deste conjunto de dados primários, foi possível calcular uma série de parâmetros secundários de desempenho e eficiência energética por meio de equações termodinâmicas consolidadas. É importante destacar que todo o formalismo matemático apresentado a seguir cumpre um papel estratégico duplo no escopo da pesquisa: além de caracterizar fisicamente o motor, estes dados calculados atuarão diretamente como as variáveis alvo (targets) para o treinamento dos modelos computacionais de aprendizado de máquina em uma etapa subsequente do trabalho. A IA utilizará as relações não lineares entre as variáveis primárias de fácil medição em bancada para aprender a inferir os parâmetros complexos descritos abaixo, consolidando a estrutura do sensor virtual proposto.

Com o intuito de estruturar matematicamente o balanço energético do motor e converter as leituras brutas de bancada em indicadores de eficiência, utilizou-se um conjunto de formulações fundamentadas na termodinâmica clássica e nas diretrizes normativas vigentes. A seguir, apresentam-se as equações de controle aplicadas para o cálculo das potências, rendimentos, fluxos de massa e consumo específico, bem como as correções atmosféricas de desempenho. Estas equações foram fundamentais para transformar os dados primários de rotação, torque e vazão de ar em um panorama completo do comportamento térmico do motor, estabelecendo as variáveis que servirão de base para a etapa de modelagem computacional:

Potência efetiva ($\dot{W}_{efet}$):

$$\dot{W}_{efet} = T \cdot \omega = T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \quad (01)$$

onde:

$\dot{W}_{efet}$: Potência efetiva [kW e cv];

T : Torque [N.m];

ω : Rotação angular do eixo do motor [s^{-1} ou Hz];

N : Rotação do motor [rpm].

Rendimento indicado (η_{ind}):

$$\eta_{ind} = -3,828 \cdot 10^{-6} \cdot N^2 + 2,02 \cdot 10^{-2} \cdot N + 1,048 \cdot 10^1 \quad (02)$$

onde:

η_{ind} : Rendimento indicado [%];

N : Rotação do motor [rpm].

Rendimento mecânico (η_{mec}):

$$\eta_{mec} = -4,312 \cdot 10^{-6} \cdot N^2 + 2,308 \cdot 10^{-2} \cdot N + 4,346 \cdot 10^1 \quad (03)$$

onde:

η_{mec} : Rendimento mecânico [%];

N : Rotação do motor [rpm].

Rendimento térmico efetivo (η_{tef}):

$$\eta_{tef} = \eta_{ind} \cdot \eta_{mec} \quad (04)$$

onde:

η_{tef} : Rendimento térmico efetivo [%];

η_{ind} : Rendimento indicado [%];

η_{mec} : Rendimento mecânico [%].

Potência térmica ($\dot{W}_{term}$):

$$\dot{W}_{term} = \frac{\dot{W}_{efet}}{\eta_{tef}} \quad (05)$$

onde:

$\dot{W}_{term}$: Potência térmica [kW];

$\dot{W}_{efet}$: Potência efetiva [kW];

η_{tef} : Rendimento térmico efetivo [%].

Potência de perdas totais ($\dot{W}_{perdas}$):

$$\dot{W}_{perdas} = \dot{W}_{term} - \dot{W}_{efet} \quad (06)$$

onde:

$\dot{W}_{perdas}$: Potência de perdas totais [kW];

$\dot{W}_{term}$: Potência térmica [kW];

$\dot{W}_{efet}$: Potência efetiva [kW].

Potência indicada ($\dot{W}_{ind}$):



$$\dot{W}_{ind} = \eta_{ind} \cdot \dot{W}_{term} \quad (07)$$

onde:

$\dot{W}_{ind}$: Potência indicada [kW];

η_{ind} : Rendimento indicado [%];

$\dot{W}_{term}$: Potência térmica [kW].

Potência de perdas térmicas ($\dot{W}_{pterm}$):

$$\dot{W}_{pterm} = \dot{W}_{term} - \dot{W}_{ind} \quad (08)$$

onde:

$\dot{W}_{pterm}$: Potência de perdas térmicas [kW];

$\dot{W}_{term}$: Potência térmica [kW];

$\dot{W}_{ind}$: Potência indicada [kW].

Potência de perdas mecânicas ($\dot{W}_{pmec}$):

$$\dot{W}_{pmec} = \dot{W}_{ind} - \dot{W}_{efet} \quad (09)$$

onde:

$\dot{W}_{pmec}$: Potência de perdas mecânicas [kW];

$\dot{W}_{ind}$: Potência indicada [kW];

$\dot{W}_{efet}$: Potência efetiva [kW].

Vazão mássica de combustível ($\dot{m}_{comb}$):

$$\dot{m}_{comb} = \frac{\dot{W}_{term}}{PCI} \quad (10)$$

onde:

$\dot{m}_{comb}$: Vazão mássica de combustível [kg/h];

$\dot{W}_{term}$: Potência térmica [kW];

PCI: Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg].

Vazão volumétrica de combustível ($\dot{V}_{comb}$):

$$\dot{V}_{comb} = \frac{\dot{m}_{comb}}{\rho_{comb}} \quad (11)$$

onde:

$\dot{V}_{comb}$: Vazão volumétrica de combustível [litros/h];

$\dot{m}_{comb}$: Vazão mássica de combustível [kg/h];

ρ_{comb} : Massa específica do combustível [kg/litro].

Consumo específico de combustível (CE) do motor:

$$CE = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{W}_{efet}} \quad (12)$$

onde:

CE: Consumo específico de combustível [kg/cvh];

$\dot{m}_{comb}$: Vazão mássica de combustível [kg/h];

$\dot{W}_{efet}$: Potência efetiva [cv].

Vazão volumétrica de ar aspirado ($\dot{V}_{asp}$):

$$\dot{V}_{asp} = \frac{N_{cil} \cdot V_c \cdot N}{60 \cdot i} = \frac{V_{cil} \cdot N}{60 \cdot i} \quad (13)$$

onde:

$\dot{V}_{asp}$: Vazão volumétrica de ar aspirado [litros/h];

N_{cil} : Número de cilindros [cilindros];

V_c : Volume do cilindro [cm³];

N : Rotação do motor [rpm];

i : Rotações por ciclo, $i = 2$ (4 tempos) e $i = 1$ (2 tempos) [-];

V_{cil} : Volume da cilindrada [cm³].

Pressão absoluta do ar na aspiração ou admissão (P_{asp}):

$$P_{asp} = \rho_{Hg} \cdot g \cdot H_{bar} = \rho_{Hg} \cdot g \cdot P_{amb} \quad (14)$$

onde:

P_{asp} : Pressão absoluta do ar na aspiração ou admissão [kPa];

ρ_{Hg} : Massa específica do mercúrio [kg/m³];

g : Aceleração da gravidade [m/s²];

H_{bar} : Altura barométrica [mmHg];

P_{amb} : Pressão absoluta no local do ensaio (pressão ambiente) [mmHg].

Vazão mássica de ar teórica ($\dot{m}_{art}$):

$$\dot{m}_{art} = \frac{P_{asp} \cdot \dot{V}_{asp}}{R/M_{ar} \cdot T_{asp}} \quad (15)$$

onde:

$\dot{m}_{art}$: Vazão mássica de ar teórica [kg/h];



P_{asp} : Pressão absoluta do ar na aspiração ou admissão [kPa];

$\dot{V}_{asp}$: Vazão volumétrica de ar aspirado [litros/h];

$\bar{R}$: Constante universal dos gases ideais [kJ/kmolK];

M_{ar} : Massa molar média do ar [kg/kmol];

T_{asp} : Temperatura do ar na aspiração ou admissão [°C].

Vazão mássica de ar real ($\dot{m}_{ar}$):

$$\dot{m}_{ar} = \frac{P_{asp} \cdot \dot{V}_{ar}}{\bar{R} / M_{ar} \cdot T_{asp}} \quad (16)$$

onde:

$\dot{m}_{ar}$: Vazão mássica de ar real [kg/h];

P_{asp} : Pressão absoluta do ar na aspiração ou admissão [kPa];

$\dot{V}_{ar}$: Vazão volumétrica de ar na aspiração ou admissão [litros/s];

$\bar{R}$: Constante universal dos gases ideais [kJ/kmolK];

M_{ar} : Massa molar média do ar [kg/kmol];

T_{asp} : Temperatura do ar na aspiração ou admissão [°C].

Fator de correção do ar aspirado (ϵ):

$$\epsilon = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{art}} \quad (17)$$

onde:

ϵ : Fator de correção do ar aspirado [-];

$\dot{m}_{ar}$: Vazão mássica de ar real [kg/h];

$\dot{m}_{art}$: Vazão mássica de ar teórica [kg/h].

Relação massa de ar e combustível real (RM):

$$RM = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{comb}} \quad (18)$$

onde:

RM : Relação massa de ar e combustível real [-];

$\dot{m}_{ar}$: Vazão mássica de ar real [kg/h];

$\dot{m}_{comb}$: Vazão mássica de combustível [kg/h].

Coefficiente de excesso de ar (λ):

$$\lambda = \frac{RM}{RM_e} \quad (19)$$

onde:

λ : Coeficiente de excesso de ar [-];

RM : Relação massa de ar e combustível real [-];

RM_e : Relação mássica de ar e combustível estequiométrica [-].

Potência efetiva corrigida segundo a norma NBR6396 antiga P-MB-749 ($\dot{W}_{efetC1}$):

$$\dot{W}_{efetC1} = \dot{W}_{efet} / C_1 \quad (20)$$

onde:

$\dot{W}_{efetC1}$: Potência efetiva C1 corrigida segundo a norma NBR6396 antiga P-MB-749 [cv];

$\dot{W}_{efet}$: Potência efetiva [cv];

C_1 : “Fator de correção” segundo a norma NBR6396 antiga P-MB-749 [-].

“Fator de correção” (valores tabelados) segundo a norma NBR6396 antiga P-MB-749 (C_1):

$$C_1 = \text{função}(UR, P_{amb}, T_{amb}) \quad (21)$$

onde:

C_1 : “Fator de correção” segundo a norma NBR6396 antiga P-MB-749 [-];

UR : Umidade relativa no local do ensaio (umidade relativa ambiente) [%];

P_{amb} : Pressão absoluta no local do ensaio (pressão ambiente) [mmHg];

T_{amb} : Temperatura no local do ensaio (temperatura ambiente) [°C].

Potência efetiva corrigida segundo a norma NBR5484 antiga MB-372 ($\dot{W}_{efetC2}$):

$$\dot{W}_{efetC2} = \dot{W}_{efet} \cdot C_2 \quad (22)$$

onde:

$\dot{W}_{efetC2}$: Potência efetiva C2 corrigida segundo a norma NBR5484 antiga MB-372 [cv];

$\dot{W}_{efet}$: Potência efetiva [cv];

C_2 : “Fator de correção” segundo a norma NBR5484 antiga MB-372 [-].

“Fator de correção” segundo a norma NBR5484 antiga MB-372 (C_2):

$$C_2 = \frac{736}{P_{amb}} \cdot \left(\frac{T_{amb} + 273}{303} \right) \quad (23)$$

onde:

C_2 : “Fator de correção” segundo a norma NBR5484 antiga MB-372 [-];

P_{amb} : Pressão absoluta no local do ensaio (pressão ambiente) [mmHg];

T_{amb} : Temperatura no local do ensaio (temperatura ambiente) [°C].

A norma NBR6396 deve ser utilizada para motores não veiculares. Por sua vez, a norma NBR5484 deve ser utilizada para motores veiculares não turbo alimentados. Portanto, a utilização dessa última norma (NBR5484) é somente para fins didáticos, uma vez que o motor ensaiado é estacionário. Os parâmetros experimentais permitiram gerar as seguintes curvas experimentais:

- Potência efetiva e vazão de combustível x rotação;
- Consumo específico de combustível e rendimento térmico x rotação;
- Potência térmica, efetiva e de perdas totais x rotação;
- Perdas totais, térmicas e mecânicas x rotação;
- Potência efetiva e vazão de combustível x rotação;
- Potência efetiva, potência efetiva corrigida segundo os coeficientes C1 e C2 estabelecidos pelas normas ABNT x rotação.

As correções de potência foram realizadas considerando as condições ambientais do ensaio, incluindo temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade relativa do ar. Para a resolução das equações termodinâmicas e a parametrização dos cálculos, foram adotadas as propriedades do combustível, do ar e do ambiente aferidas durante a realização dos testes. As condições ambientais mantiveram-se estáveis entre o início e o fim do ensaio, operando com valores médios de pressão barométrica de 660,0 mmHg, temperatura ambiente de 24,0°C e umidade relativa de 80,0%. As constantes físicas e propriedades operacionais fixadas para o modelo matemático estão consolidadas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições ambientais

Momento do Ensaio	UR [%]	P_{amb} [mmHg]	T_{amb} [°C]
Início	76,0	660,0	23,0
Final	84,0	660,0	25,0
Média	80,0	660,0	24,0

As correções de potência e o fechamento dos balanços de massa e energia foram realizados levando em consideração as exatas condições ambientais registradas no laboratório no momento do ensaio, incluindo parâmetros críticos como a temperatura ambiente, a pressão atmosférica local e a umidade relativa do ar. Para a resolução das equações termodinâmicas acopladas e para a parametrização rigorosa dos algoritmos de cálculo, foram adotadas as propriedades físicas do combustível (óleo Diesel), as constantes do ar atmosférico e as variáveis de contorno do ambiente aferidas experimentalmente.

As condições ambientais mantiveram-se estáveis e controladas entre o início e o término do ensaio, operando com valores médios consolidados de pressão barométrica fixada em 660,0 mmHg, temperatura ambiente média de 24,0°C e umidade relativa média do ar na ordem de 80,0%. Essas constantes físicas e propriedades operacionais fixadas para o modelo matemático estão consolidadas e organizadas para consulta na Tabela 1.

No que tange às propriedades químicas do insumo energético utilizado, adotou-se o Poder Calorífico Inferior (PCI) do óleo Diesel comercial de referência como sendo 43.800 kJ/kg, associado a uma massa específica padrão ρ_{comb} configurada em 0,840kg/L.

Complementarmente, as constantes físicas para o ar de admissão foram fixadas com base na hipótese de comportamento de gás ideal, estabelecendo a massa molar média do ar atmosférico como $M_{ar} = 28,960$ kg/kmol e a constante universal dos gases ideais calibrada para $R = 8,314$ kJ/kmolK. A correta tabulação e fixação dessas variáveis de contorno impedem desvios matemáticos indesejados, garantindo que os cálculos de vazão mássica e rendimento térmico reflitam a realidade física do ensaio laboratorial.

Posteriormente, estes dados experimentais e seus respectivos parâmetros calculados termodinamicamente serão utilizados como base de treinamento para modelos computacionais baseados em aprendizado de máquina. Dessa forma, os parâmetros calculados pelas Equações (01) a (23) atuarão como variáveis alvo, permitindo que os algoritmos de IA aprendam a correlação não linear entre as variáveis de fácil medição (rotação, torque e vazão de ar) e os rendimentos/potências complexas do motor, viabilizando a predição de dados em

condições operacionais não medidas diretamente experimentalmente.

A consolidação dessa metodologia *data-driven* viabilizará a implementação prática de estratégias de sensoramento virtual de alta fidelidade. Uma vez validado e treinado, o algoritmo será perfeitamente capaz de realizar a predição robusta de dados de desempenho em condições operacionais que não foram diretamente medidas de forma experimental, eliminando a dependência de processos dispendiosos de instrumentação física contínua e expandindo a eficiência de monitoramento do sistema térmico de forma automatizada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais (TABELA 2) permitiram analisar o comportamento do motor ciclo Diesel sob as diferentes condições de carga estipuladas. Considerando o elevado volume de dados gerados ao longo de todo o mapeamento operacional (de 10% a 120% da carga nominal), optou-se por apresentar os parâmetros obtidos na condição de 100% de carga de forma puramente representativa. Essa abordagem visa ilustrar o perfil numérico dos dados brutos coletados em bancada sem comprometer a concisão do texto, visto que as demais condições de carga exibiram tendências homólogas de funcionamento.

As curvas características obtidas experimentalmente apresentaram comportamentos homólogos para todas as condições de carga analisadas, diferindo fundamentalmente na magnitude das variáveis medidas. Dessa forma, demonstrou-se que a variação da carga influencia diretamente a amplitude dos parâmetros operacionais do motor, preservando, contudo, as tendências funcionais típicas do ciclo Diesel.

O comportamento observado nas curvas de potência efetiva e consumo específico (Figuras 1 e 2) corrobora com a literatura clássica sobre o tema (HEYWOOD, 1988). Além disso, a variabilidade dos dados coletados em cargas parciais fornece a base necessária para que, em etapas futuras, modelos de aprendizado de máquina identifiquem padrões não lineares não capturados por métodos puramente analíticos (GONÇALVES; MENDES, 2023; GONÇALVES; MARO; MENDES, 2024).

Tabela 2. parâmetro obtidos (carga 100%)

Posição do Acelerador	N [rpm]	T [N.m]	Var [litros/s]
1	3998	8,379	8,014
2	3835	8,669	7,654
3	3887	8,978	7,723
4	3750	9,277	7,418
5	3695	9,588	7,277
6	3555	9,889	6,970
7	3445	10,081	6,724
8	3305	10,179	6,421
9	3288	10,228	6,360
10	3105	10,327	5,978
11	2995	10,435	5,740
12	2835	10,585	5,408
13	2753	10,613	5,228
14	2665	10,619	5,037
15	2598	10,779	4,888
16	2445	10,719	4,578
17	2315	10,839	4,315
18	2225	10,369	4,127
19	2148	10,259	3,966
20	2015	10,079	3,702
21	1986	9,857	3,632
22	1888	9,569	3,436
23	1765	9,329	3,197
24	1639	9,079	2,954
25	1584	8,731	2,841

As Figuras 1 a 6 apresentam o comportamento experimental do motor em função da rotação. Observa-se que as curvas de potência e perdas fornecem a variabilidade e a amplitude de dados necessárias para o mapeamento e subsequente treinamento dos algoritmos de aprendizado de máquina. Nas regiões correspondentes às cargas parciais, os dados capturados indicam comportamentos altamente não lineares, os quais a Inteligência Artificial (IA) poderá mapear com precisão. A discussão subsequente foca na capacidade dos modelos computacionais em estimar e quantificar esses indicadores energéticos a partir do banco de dados experimental.

As Figuras 1 a 6 apresentam o comportamento experimental do motor. Observa-se que as curvas de potência e perdas (Figuras 3 e 4) fornecem a variabilidade necessária para o treinamento de algoritmos. Nas regiões destacadas em azul (cargas parciais), os dados capturados em vermelho indicam comportamentos não lineares que a IA poderá mapear com precisão. A discussão futura focará na capacidade dos modelos computacionais em quantificar impactos energéticos e econômicos a partir desses indicadores experimentais.

As curvas de potência efetiva em função da rotação apresentaram comportamento crescente até determinadas faixas de operação, seguido de

estabilização e tendência de declínio em rotações mais elevadas, conforme ilustrado na escala do eixo vertical esquerdo (eixo primário) da Figura 1. Esse comportamento sugere que o aumento da rotação promove inicialmente maior geração de trabalho útil devido ao aumento do número de ciclos de combustão por unidade de tempo. Entretanto, em regimes de rotações mais elevadas, o crescimento acentuado das perdas térmicas e mecânicas passa a preponderar sobre o ganho de ciclos, reduzindo a eficiência do aproveitamento energético global do sistema.

As curvas de torque em função da rotação, cujos valores devem ser analisados na escala do eixo vertical direito (eixo secundário) da Figura 1, apresentaram valores máximos em faixas intermediárias de operação, seguidos de redução gradual em rotações elevadas. Esse perfil evidencia que o motor atinge sua máxima eficiência volumétrica e melhor aproveitamento da combustão em rotações médias. Em contrapartida, em altas rotações, a restrição no tempo disponível para as etapas de admissão do ar e para a evolução da frente de chama da combustão reduz a capacidade de geração de torque útil no eixo, provocando o declínio observado no final do regime ensaiado.

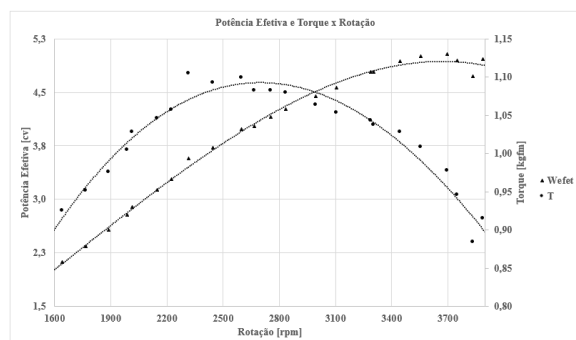


FIGURA 1: Potência Efetiva e Torque x Rotação

O consumo específico de combustível (FIGURA 2), analisado através da escala do eixo vertical esquerdo, exibiu o comportamento parabólico típico em formato de “U”, caracterizado por valores mais elevados nas faixas de baixas e altas rotações, e valores mínimos concentrados na faixa intermediária de operação. Este perfil cinético corrobora a existência de uma região de operação ótima, na qual o motor maximiza a eficiência da conversão da energia química contida no combustível em trabalho mecânico efetivo. Em baixas rotações, o aumento do consumo relativo é atribuído, em parte, à maior influência das perdas térmicas por transferência de calor através das paredes do cilindro, dado o maior tempo disponível por ciclo. Em contrapartida, em

elevadas rotações, a elevação do consumo específico é intensificada pelo incremento exponencial das perdas mecânicas por atrito, que passam a demandar uma parcela crescente da potência produzida apenas para superar a resistência interna do conjunto móvel, elevando assim a necessidade de combustível para manter a mesma potência de saída.

As curvas de rendimento térmico efetivo (FIGURA 2, escala do eixo vertical direito) apresentaram uma tendência estritamente inversa ao consumo específico, evidenciando uma correlação direta entre ambos os parâmetros. Os maiores índices de aproveitamento energético foram registrados precisamente na faixa de rotação onde o consumo específico atinge seu patamar mínimo, indicando que, nesta zona operacional, o motor otimiza a relação entre a energia térmica suprida e o trabalho efetivo entregue ao eixo. A redução do rendimento térmico nas faixas extremas de rotação reflete a degradação da eficiência global do ciclo Diesel, motivada pela combinação de variações na eficiência volumétrica e pelo desequilíbrio entre a energia liberada na combustão e as perdas dissipadas, confirmando que a faixa intermediária representa o ponto de equilíbrio termodinâmico para o modelo estudado.

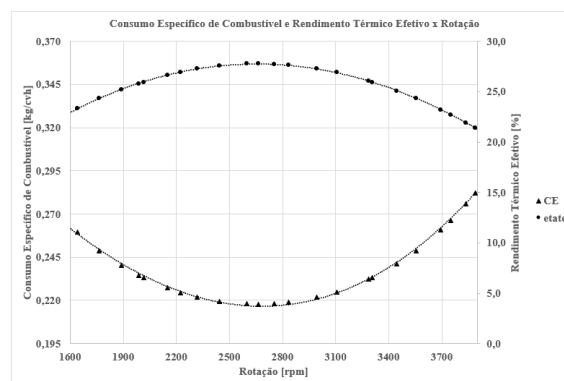


FIGURA 2: Consumo Específico de Combustível e Rendimento Térmico Efetivo x Rotação

As curvas de potência térmica (FIGURA 3) apresentaram crescimento progressivo com o aumento da rotação, evidenciando que a quantidade de energia fornecida ao sistema aumenta conforme o incremento da vazão de combustível. Entretanto, as curvas de potência efetiva (FIGURA 3) não acompanharam proporcionalmente esse crescimento, indicando a presença de perdas energéticas significativas durante o funcionamento do motor.

As curvas de perdas totais (FIGURA 3) apresentaram crescimento com o aumento da rotação, sugerindo que parte considerável da energia liberada durante a

combustão é dissipada na forma de calor e atrito mecânico. As perdas térmicas apresentaram maior magnitude em relação às perdas mecânicas, comportamento característico de motores ciclo Diesel, nos quais grande parcela da energia é perdida pelos gases de escape, sistema de arrefecimento e superfícies metálicas aquecidas.

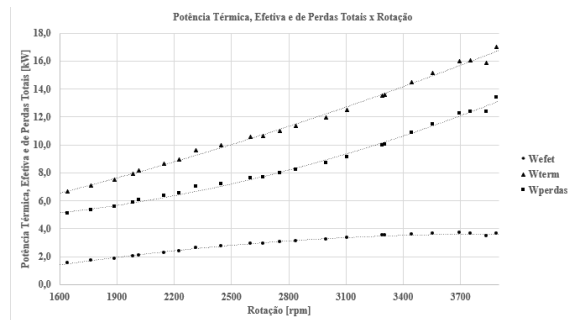


FIGURA 3: Potência Térmica, Efetiva e de Perdas Totais x Rotação

As curvas de perdas mecânicas (FIGURA 4) apresentaram um crescimento gradual ao longo de toda a faixa operacional, comportamento associado principalmente ao aumento do atrito natural entre as peças móveis do motor em maiores velocidades de rotação. À medida que o motor gira mais rápido, o movimento do pistão e dos componentes internos se intensifica, exigindo mais esforço para vencer a resistência do próprio conjunto e do óleo lubrificante.

Quando comparadas às perdas térmicas na mesma FIGURA 4, nota-se claramente que as perdas mecânicas são significativamente menores durante todo o ensaio. Esse comportamento é típico de motores ciclo Diesel, confirmando que a maior parte da energia do combustível não é perdida pelo atrito das peças, mas sim na forma de calor dissipado pelo escapamento e pelo sistema de resfriamento. Por apresentarem um comportamento tão estável e previsível, esses dados de perdas mecânicas são ideais para o treinamento dos modelos de Inteligência Artificial, facilitando o mapeamento correto do balanço energético do motor.

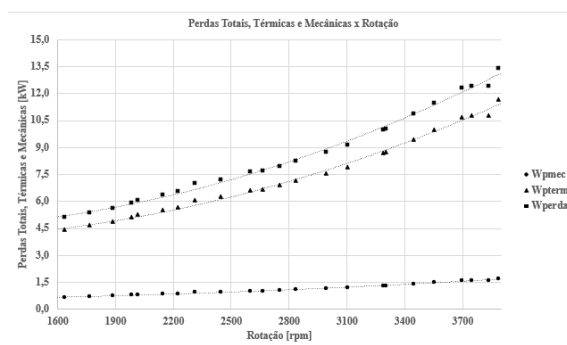


FIGURA 4: Perdas Totais, Térmicas e Mecânicas x Rotação

As curvas de vazão de combustível (FIGURA 5, analisadas na escala do eixo vertical direito) apresentaram uma tendência continuamente crescente com o aumento da rotação do motor. Esse perfil indica que velocidades operacionais mais elevadas exigem, de forma natural, um maior fornecimento de combustível por hora para alimentar o processo de combustão.

No entanto, ao cruzar esses dados com a curva de potência efetiva (associada ao eixo vertical esquerdo da mesma FIGURA 5), nota-se um comportamento interessante: enquanto a injeção de combustível continua subindo de forma quase constante até o final do ensaio, a potência gerada começa a se estabilizar e perde fôlego nas rotações mais altas. Esse descompasso evidencia visualmente que o aumento no consumo nem sempre se traduz em mais potência útil no eixo, devido ao crescimento das perdas térmicas e mecânicas que ocorrem nesses regimes mais severos. Compreender essa relação direta e ao mesmo tempo não linear entre o consumo e a resposta do motor é fundamental para alimentar os modelos de Inteligência Artificial, permitindo que eles aprendam a prever com precisão o comportamento energético do sistema.

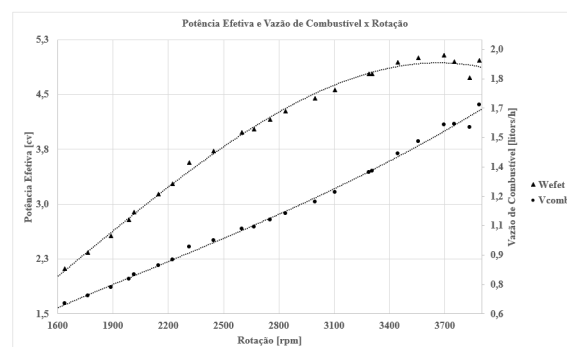


FIGURA 5: Potência Efetiva e Vazão de Combustível x Rotação

Os resultados obtidos pelas correções de potência (FIGURA 6) utilizando os coeficientes C1 (segundo a norma NBR 6396 / antiga P-MB-749) e C2 (segundo a norma NBR 5484 / antiga MB-372) permitiram adequar os valores experimentais às condições padronizadas de ensaio. Esse procedimento mitiga as interferências causadas pelas variações de temperatura, pressão barométrica e umidade registradas no laboratório durante os experimentos.

Visualmente, observa-se que ambas as curvas corrigidas (WefetC1 e WefetC2) apresentam um deslocamento para cima em relação à curva da potência efetiva bruta (Wefet). Esse comportamento ocorre porque as condições reais do local do ensaio eram diferentes das condições de referência estipuladas pelas normas. Ao aplicar os fatores de correção, os valores são recalculados para mostrar qual seria o real desempenho do motor em um ambiente padrão normatizado. Nota-se também que a curva associada à norma NBR 6396 (C1) resultou em valores ligeiramente maiores do que a NBR 5484 (C2), o que evidencia como a escolha do protocolo de normalização impacta diretamente o indicador final de desempenho. Fornecer essas diferentes curvas de potência corrigida enriquece a base de dados, permitindo que a Inteligência Artificial compreenda como as variáveis atmosféricas externas afetam as metas de modelagem do motor.

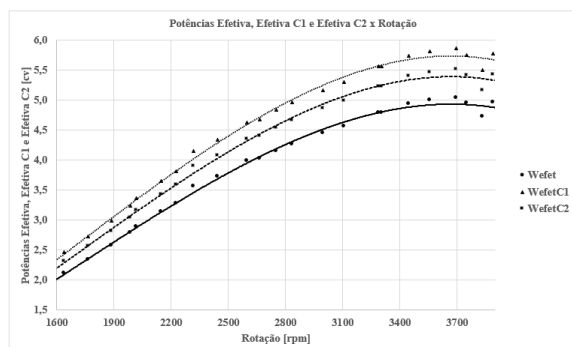


FIGURA 6: Potência Efetiva, Efetiva C1, Efetiva C2 x Rotação

De maneira geral, todas as curvas obtidas experimentalmente apresentaram tendências e perfis perfeitamente coerentes com o comportamento termodinâmico esperado para motores de combustão interna operando sob o ciclo Diesel. A consistência dos perfis gráficos valida o protocolo de ensaios e delimita com precisão as faixas de rotação onde o equipamento opera com máxima eficiência energética e estabilidade mecânica.

O banco de dados gerado por meio dessas 23 correlações matemáticas e medições físicas constitui uma base de alta fidelidade e robustez para a aplicação subsequente de técnicas de Inteligência Artificial e algoritmos de aprendizado de máquina.

A utilização futura desses modelos computacionais treinados viabilizará a implementação prática de estratégias de sensoriamento virtual, atuando na inferência e estimação inteligente de parâmetros operacionais de difícil medição física direta em tempo real. Essa abordagem inovadora mitiga a necessidade de manter uma instrumentação exaustiva, complexa e de alto custo financeiro instalada de forma permanente no motor durante o seu regime produtivo regular. Consequentemente, o uso da Inteligência Artificial como sensor virtual permite reduzir custos operacionais de monitoramento e otimizar processos de tomada de decisão baseados na eficiência energética, ampliando a confiabilidade de sistemas térmicos por meio de modelos preditivos ágeis, robustos e de baixíssimo custo computacional.

CONCLUSÃO

Os resultados experimentais obtidos permitiram caracterizar, de forma detalhada, o comportamento operacional de um motor de combustão interna ciclo Diesel sob diferentes condições de carga e rotação. As curvas características analisadas apresentaram tendências perfeitamente compatíveis com o comportamento termodinâmico esperado para este tipo de equipamento, evidenciando relações consistentes entre potência efetiva, torque, consumo de combustível, rendimento térmico e o balanço de perdas energéticas.

As análises demonstraram que o motor atinge seu ponto de otimização energética em faixas intermediárias de rotação, nas quais foram observados os menores níveis de consumo específico de combustível e os picos de rendimento térmico efetivo. Em contrapartida, o deslocamento para regimes de rotação mais elevados promove um crescimento acentuado das perdas térmicas e mecânicas, o que reduz a eficiência global do sistema. Notou-se, ainda, a predominância das perdas térmicas sobre as mecânicas, confirmando uma característica intrínseca do ciclo Diesel, onde uma parcela significativa da energia liberada durante a combustão é dissipada por meio dos gases de exaustão e do sistema de arrefecimento.

Embora os valores absolutos das variáveis tenham oscilado em função da carga aplicada, a estabilidade e a coerência física das curvas experimentais



confirmam a robustez do conjunto de dados obtido. Este banco de dados, meticulosamente estruturado, constitui uma base de alta relevância para a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial e aprendizado de máquina. As interdependências observadas entre as variáveis operacionais fornecem os padrões necessários para que modelos computacionais possam estimar variáveis de difícil medição direta, atuando como sensores virtuais de alta precisão.

Dessa forma, este estudo contribui tanto para o aprofundamento do entendimento sobre o desempenho energético de motores ciclo Diesel quanto para o desenvolvimento de estratégias modernas de monitoramento inteligente, sensoramento virtual e otimização energética.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento FND E (Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação), FAPEMIG, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro; à UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá), por meio do NEST – Núcleo de Excelência em Gestão Termelétrica e Distribuída e do Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), pelo apoio técnico e institucional; e à UFVJM (Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri), por meio do PET Estratégias, do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG), da Pró-Reitoria de Extensão e Cultura (PROEXC), do Laboratório de Modelagem e Experimento em Engenharia Térmica do ICT/UFVJM e do Projeto de Extensão “Promovendo a Ciência e Tecnologia: potencializando as oportunidades e o conhecimento da sociedade acadêmica e diamantinense”, pelo suporte acadêmico, científico e institucional.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6396: Motores de combustão interna alternativos de uso não veicular - Determinação da potência, consumo de combustível e lubrificante - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=86835>

HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988.

MACHADO, L. C. et al. Obtenção dos parâmetros operacionais dos motores de combustão interna à gasolina e a diesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 4., 2023. Anais [...]. [S. l.]: Even3, 2023. ISSN 2764-0582. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet2023/651626-obtencao-dos-parametros-operacionais-dos-motores-de-combustao-interna-a-gasolina-e-diesel/>. Acesso em: 1 jun. 2026.

PINHEIRO, R. N.; MENDES, T. Análise do rendimento efetivo de motores de combustão interna. In: SEMANA DA INTEGRAÇÃO DA UFVJM: ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 9., 2023, Diamantina. Anais [...]. Diamantina: UFVJM, 2023. ISSN 2238-7633. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/sintegra/736520-analise-do-rendimento-efetivo-de-motores-de-combustao-interna/>. Acesso em: 1 jun. 2026.

GONÇALVES, J. P. P.; MARO, T. A.; MENDES, T. Ensaio de motor de combustão interna. In: SEMANA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 3., 2024, Diamantina. Anais [...]. [S. l.]: Even3, 2024. ISBN 978-65-272-0563-0. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/sct2024/826528-ensaio-de-motor-de-combustao-interna/>. Acesso em: 1 jun. 2026.

GONÇALVES, J. P. P.; MENDES, T. Ensaio de um motor à gasolina. In: CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 4., 2023. Anais [...]. [S. l.]: Even3, 2023. ISSN 2764-0582. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet2023/665076-ensaio-de-um-motor-a-gasolina/>. Acesso em: 1 jun. 2026.

BRUNETTI, F. Motores de combustão interna. São Paulo: Blucher, 2012. v. 1. 553 p.