

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS ERECHIM
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

Renan Carlos do Amaral e Silva

**MEDIÇÃO DE RENDIMENTO TÉRMICO DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA
EM DINAMÔMETRO HIDRÁULICO DE BANCADA**

Erechim
2023

Renan Carlos do Amaral e Silva

**MEDIÇÃO DE RENDIMENTO TÉRMICO DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA
EM DINAMÔMETRO HIDRÁULICO DE BANCADA**

Trabalho Conclusão de Curso realizado no *Campus* Erechim do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. José Antônio Sala.

Erechim
2023

RESUMO

Máquinas térmicas desempenham um papel fundamental em meios de transporte, geração de energia e processos industriais, sendo os motores de combustão interna uma parcela significativa desses dispositivos. A melhoria da qualidade de vida em diversos países fará com que o uso de motores de combustão aumente nas próximas décadas antes que outras fontes limpas de energia venham a substituir os combustíveis fósseis. Sendo assim, ainda há muito esforço da indústria e da academia a fim de aprimorar a tecnologia relacionada a esses motores proporcionando a otimização do seu rendimento térmico. Neste trabalho foi desenvolvido um método a fim de medir potência instantânea de motores de combustão interna em um dinamômetro hidráulico, bem como foi elaborada um método para controlar o consumo de combustível, automatizar o procedimento de teste com o intuito de reduzir falhas operacionais e gerar um mapa de eficiência térmica. Os testes ofereceram soluções para os desafios enfrentados no contexto da medição de eficiência térmica, bem como a automação do procedimento representa um avanço significativo na confiabilidade dos resultados. Para mais, o mapa de eficiência térmica possibilita uma visão abrangente do desempenho energético em diferentes condições operacionais, orientado as decisões em termos de melhoria e otimização.

Palavras-chave: Eficiência térmica. Máquinas térmicas. Motor de combustão interna.

ABSTRACT

Thermal machines play a fundamental role in transportation, energy generation and industrial processes, with internal combustion engines being a significant portion of these devices. Improving the quality of life in several countries will cause the use of combustion engines to increase in the coming decades before other clean energy sources replace fossil fuels. Therefore, there is still a lot of effort from industry and universities to improve the technology related to these engines, optimizing their thermal performance. In this study, a method was developed to measure instantaneous power of internal combustion engines on an hydraulic dynamometer, as well as a methodology was developed to control fuel consumption, automate the test procedure with the aim of reducing operational failures and generating a thermal efficiency map. The tests offered solutions to the challenges faced in the context of measuring thermal efficiency and the automation of the procedure represents a significant advance in the reliability of the results. Furthermore, the thermal efficiency map provides a comprehensive view of energy performance in different operating conditions, guiding decisions in terms of improvement and optimization.

Keywords: Thermal efficiency. Thermal machines. Internal combustion engine.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo Geral.....	9
2.2 Objetivos Específicos.....	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 Máquinas Térmicas.....	10
3.1.1 Transformações de Energia.....	10
3.1.2 Rendimento Térmico.....	11
3.1.3 Poder Calorífico do Combustível.....	13
3.1.3.1 Gasolina.....	14
3.1.3.2 Etanol.....	14
3.2 Ensaio Dinamométrico.....	15
3.2.1 Dinamômetro Hidráulico.....	15
3.2.2 Medição Potência.....	17
3.2.3 Medição Consumo.....	20
3.2.3.1 Método Gravimétrico.....	20
3.2.3.2 Método Volumétrico.....	20
3.2.4 Fator de Correção Atmosférica.....	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1 Materiais.....	22
4.2 Métodos.....	22
4.2.1 Fixação do Motor.....	22
4.2.2 Instalação de Sistema de Medição de Consumo.....	23
4.2.3 Instalação e Ajuste da Parte Eletrônica.....	24
4.2.4 Testes de Medição de Rendimento Térmico.....	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
6 CONCLUSÕES.....	34
7 TRABALHOS FUTUROS.....	35
REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Máquinas térmicas são definidas como dispositivos que convertem calor ou energia térmica em trabalho (Çengel e Boles, 2013). Dentre essas existem os motores de combustão interna, os quais realizam trabalho no sistema utilizando dos próprios gases originários da combustão por meio de processos de compressão, expansão, queima e exaustão.

O rendimento ou eficiência corresponde ao grau de sucesso com o qual um processo de conversão ou transferência de energia é realizado (Çengel e Boles, 2006). Em relação a motores de combustão interna, esse processo define o percentual de energia térmica que é convertido em energia mecânica (Schmidt e Boresi, 2003). Essa propriedade está diretamente relacionada ao poder calorífico do combustível utilizado, pois quanto maior for o seu valor, maior a quantidade de energia contida nele. Por exemplo, a gasolina e o etanol, dois dos combustíveis mais utilizados globalmente, possuem poder calorífico igual a 34900 kJ/kg e 26700 kJ/kg, respectivamente (Goldemberg e Macedo, 1994).

De acordo com Martins (2012) é previsível que, com as melhorias da qualidade de vida em diversos países, o uso de motores à combustão irá aumentar nas próximas décadas antes que outras fontes de energia como álcool, hidrogênio e eletricidade venham a substituir os combustíveis fósseis. Isto posto, é evidente que motores de combustão interna ainda são vastamente utilizados e, da mesma forma, ainda há muito esforço da indústria e da academia a fim de aprimorar a tecnologia relacionada a esses motores proporcionando a otimização do seu rendimento térmico.

É conhecido que motores de combustão interna apresentam em média um rendimento em torno de 30%, isto é, há um grande desperdício de energia em seu funcionamento. Portanto, a fim de compreender quanto esse rendimento ainda pode ser aumentado, é necessário realizar pesquisas e testes a fim de otimizar parâmetros, verificar o desempenho dos componentes e levantar curvas características do motor (Moreira; Couto, 2019).

Portanto, no presente trabalho será desenvolvido um método a fim de medir o rendimento térmico de um motor utilizando um dinamômetro hidráulico visando obter uma medição de rendimento. Para esse fim, serão variados diferentes parâmetros

de funcionamento e operação do motor a fim de propor um método padrão de medição.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é o desenvolvimento de um método para medição de rendimento térmico de um motor de combustão interna em dinamômetro hidráulico.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos ainda podem ser delineados na forma de objetivos específicos:

- a) Desenvolver um método para medição de potência instantânea.
- b) Elaborar um método para medir o consumo de combustível.
- c) Automatizar o procedimento de teste com o intuito de reduzir falhas operacionais.
- d) Gerar um mapa de eficiência térmica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Máquinas Térmicas

Máquinas térmicas são dispositivos que transformam parcialmente calor em trabalho ou energia mecânica. No interior da máquina, uma determinada quantidade de matéria absorve ou libera calor, é expandida e comprimida e, algumas vezes, sofre transição de fase. Essa matéria é denominada substância de trabalho da máquina. Especificamente em máquinas de combustão interna, a substância de trabalho é a mistura de combustível com ar (Halliday, 2010).

Máquinas térmicas operam ciclicamente absorvendo calor de uma fonte a temperatura relativamente alta, realizam trabalho fazendo com que a energia térmica seja convertida em energia mecânica e rejeitam calor a temperatura mais baixa (HALLIDAY, 2010). Em um ciclo ideal, de acordo com a primeira lei da termodinâmica, ao completar um ciclo a substância de trabalho volta ao estado inicial e, portanto, apresenta saldo de variação de energia nulo (Sauerwein, 2012).

Entretanto, de acordo com o enunciado de Kelvin-Planck "é impossível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho". Sendo assim, não é possível atingir um rendimento igual a 100% em uma máquina térmica real, sempre há uma determinada quantidade de calor a qual não é transformada efetivamente em trabalho (Alves, 2018).

3.1.1 Transformações de Energia

Como já mencionado, um exemplo de máquinas térmicas são os motores de combustão interna, nos quais a energia proveniente da queima de combustíveis é transformada em trabalho mecânico e o fluido de trabalho são os produtos da combustão. Três componentes caracterizam a energia total de um sistema: a energia cinética relacionada ao seu movimento, a energia potencial relacionada ao campo de força contra o qual trabalha e, por fim, a energia interna relacionada à composição química e ao nível de agitação atômica, o qual depende da temperatura em que o sistema se encontra (Álvarez Flórez, 2002).

Há perdas de energia relacionadas aos três componentes apresentados, sendo a que essas perdas são entendidas como uma transferência indesejada de energia, isto é, do total de energia apenas uma certa porcentagem é obtida sob a forma de trabalho ou calor útil. O balanço global estabelece que a energia não desaparece, mas sim que a energia inicial é equivalente à energia útil final mais o calor gerado nas perdas. Portanto, os processos de transformação de energia devem ser otimizados a fim de que as fontes de energia disponíveis sejam aproveitadas ao máximo (Álvarez Flórez, 2002).

Há diversos fatores que contribuem com a redução dessa eficiência: trocas térmicas entre componentes e fluidos, atrito entre os diversos componentes, temperatura elevada e expansões não resistidas nos gases de exaustão, geração de entropia no sistema de escapamento devido a pressão, entre outros (Gallo, 1990). Dessa forma, é possível constatar que as limitações termodinâmicas restringem potenciais melhorias em motores de combustão interna. Em condições reais, além da perda de energia durante a combustão, ocorre 5 – 15% de perda em forma de calor, 12 – 20% na forma de gases de escape e 4 – 8% na forma de atrito. Estratégias visando minimizar as perdas de energia e aumentar a eficiência térmica de motores de combustão interna são as principais questões relacionadas ao desenvolvimento de tecnologias de motores (Wang, 2021). Isto posto, no que tange às transformações de energia, para compreender a eficiência de uma máquina térmica é necessário entender o índice "rendimento".

3.1.2 Rendimento Térmico

O rendimento de uma máquina térmica é uma grandeza adimensional dada pela razão entre a quantidade de trabalho mecânico realizado por ela e a quantidade de energia fornecida a ela em forma de calor (Çengel e Boles, 2006). Esse conceito pode ser representado pela Equação 1:

$$\eta = \frac{\tau}{Q_1} \quad (1)$$

onde η é o rendimento, τ (J) é o trabalho útil gerado e Q_1 (J) é o calor recebido da fonte quente.

Quanto maior o rendimento de uma máquina térmica, maior será a sua eficiência (Çengel e Boles, 2006). A eficiência térmica em motores de combustão interna pode ser dada pela relação entre a potência de saída do motor pela energia de entrada do combustível. Essa relação é chamada de eficiência de conversão do combustível e pode ser representada pela Equação 2:

$$\eta_T = \frac{W}{m \cdot PC} \quad (2)$$

onde η_T é a eficiência térmica, W é a potência de saída do motor obtida em dinamômetro (kW), m é a vazão mássica de combustível (kg/s) e PC é o poder calorífico do combustível (kcal/kg) (Heywood, 1988).

O tipo de combustível utilizado também influencia diretamente na eficiência de um motor, considerando que combustíveis diferentes apresentam propriedades e constituições químicas diferentes. Portanto, diferentes parâmetros de desempenho, emissões e eficiência são obtidos de acordo com as características de combustão (Çengel e Boles, 2006). Nesse sentido, a fim de avaliar o desempenho de diferentes combustíveis em diferentes regimes de funcionamento (rotação e carga), o consumo específico é um indicador o qual representa o consumo mássico de combustível por unidade de trabalho de saída. Essa medida traduz a eficiência do motor levando em conta o combustível utilizado e pode ser obtido por meio da Equação 3 (Heywood, 1988):

$$CE = \frac{m_f}{W} \quad (3)$$

onde CE é o consumo específico de combustível (g/kWh), m_f é a vazão mássica de combustível (g/h) e W é a potência em unidade de energia (kW).

O consumo específico de combustível e a eficiência da conversão de combustível (eficiência térmica) podem ser relacionados pela Equação 4:

$$\eta_t = \frac{1}{CE \cdot PC} \quad (4)$$

onde η_t é a eficiência térmica, CE é o consumo específico de combustível (g/kWh) e PC é o poder calorífico do combustível.

3.1.3 Poder Calorífico do Combustível

Ao se tratar de eficiência é necessário esclarecer se a base da definição leva em conta o poder calorífico superior ou inferior do combustível. Como grande parte dos combustíveis utilizados no mundo são misturas de hidrocarbonetos, quando queimado o hidrogênio presente no combustível forma água e, dependendo do estado da água nos produtos da combustão (líquido ou vapor), o valor do poder calorífico será diferente.

Portanto, o poder calorífico inferior é utilizado quando a água é liberada na forma de vapor e o poder calorífico superior quando a água presente nos gases de combustão é completamente condensada. No que tange motores de combustão interna, a eficiência normalmente é baseada no poder calorífico inferior, considerando que a água é eliminada como vapor nos gases de exaustão e na prática não é viável recuperar o calor de vaporização, a Tabela 1 apresenta o poder calorífico inferior dos combustíveis atualmente utilizados no Brasil.

Tabela 1 - Poder calorífico inferior dos combustíveis atualmente utilizados no Brasil.

Combustível	Poder calorífico (kcal/kg)
Etanol Anidro	6750
Etanol Hidratado	6300
Gasolina A (Sem adição de etanol)	10400
Gasolina C (Com adição de 27% de etanol)	9400

Fonte: BRASIL, 2021.

3.1.3.1 Gasolina

A gasolina é uma mistura complexa de hidrocarbonetos derivados do petróleo e é o principal combustível para motores a ignição por centelha. O petróleo bruto que dá origem à gasolina é composto por 83 a 87% de carbono, 11 a 14% de hidrogênio ligado de diversas maneiras e outras espécies químicas (Pulkrabek, 1997; Melo e Sampaio, 2014). Os hidrocarbonetos presentes na gasolina podem variar de 5 a 12 carbonos agregados em famílias, sendo as principais: parafinas (alcanos), olefinas (alcenos) e aromáticos (Sarathy, et al., 2018).

O padrão adotado para a caracterização da gasolina é a sua octanagem, isto é, octanagem é uma medida da resistência de um combustível à detonação em motores de combustão interna. Ela é expressa como um índice de octano e é comumente associada a combustíveis como a gasolina e a estrutura dos hidrocarbonetos presentes no combustível influencia diretamente neste parâmetro (Ferreira, 2003). É possível adicionar compostos com finalidades específicas que melhoram as características da gasolina, tais como: anticongelantes, detergentes, antioxidantes, desativadores de metal, corantes, entre outros. Além disso, a adição do etanol aumenta a octanagem da gasolina e reduz a emissão de poluentes (Da Luz, 2003).

Algumas características são esperadas da gasolina para seu uso em motores de combustão interna: vaporização suficiente na câmara de combustão, bem como que não ocorra vaporização excessiva antes da injeção; a queima do combustível deve ocorrer formando o mínimo de resíduos, pois isso aumenta a eficiência da queima e diminui a formação de depósitos os quais podem comprometer partes do motor; a combustão deve ocorrer posteriormente o acionamento da centelha, sem detonação; por segurança, a gasolina não pode ser corrosiva e deve apresentar baixo teor de produtos tóxicos, formando a menor quantidade possível de poluentes (Da Luz, 2003).

3.1.3.2 Etanol

O etanol ou álcool etílico é um biocombustível de matéria-prima vegetal obtido a partir da fermentação de amido ou de outros açúcares. Há dois tipos de etanol: o

anidro, o qual apresenta 0,5% de água, e o hidratado, que pode chegar até 5% de água e é utilizado diretamente como combustível (Raízen, 2022).

O etanol é um bom combustível automotivo, pois apresenta nível de octanagem superior ao da gasolina, melhorando a tolerância à detonação, além de não conter enxofre em sua composição, evitando a emissão de compostos sulfurosos e a contaminação de conversores catalíticos, o que seria prejudicial à eficiência da conversão. Para mais, a velocidade laminar mais rápida de chama propicia benefícios ao processo de combustão (De Carvalho, 2016).

3.2 Ensaio Dinamométrico

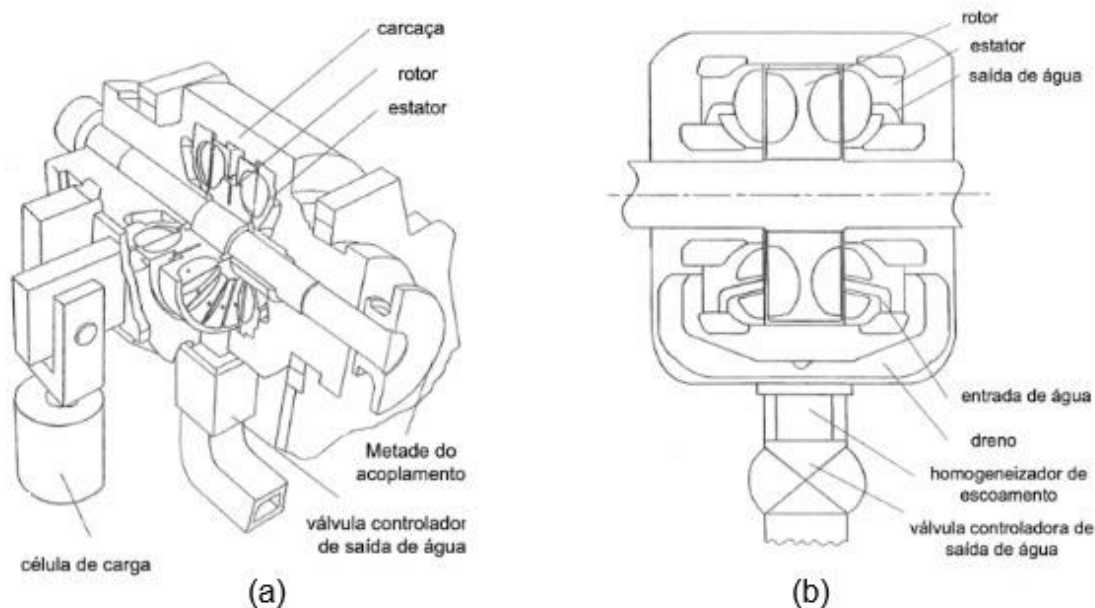
O dinamômetro é um instrumento utilizado com a finalidade de avaliar o desempenho de um motor, extraindo dados os quais possibilitam a realização de cálculos a fim de obter o torque e a potência gerados a partir do seu funcionamento em função da sua rotação. Nesses ensaios é fundamental reproduzir as condições de trabalho normais de um motor, como o ângulo da borboleta, a rotação do motor, as condições do ambiente e as temperaturas do óleo e da água do motor (Alves e Nogueira, 2015; Heywood, 1988).

Existem vários tipos de dinamômetros e o que os difere é o tipo de frenagem do equipamento, sendo alguns exemplos: dinamômetro de corrente de Foucault, dinamômetro elétrico, dinamômetro de inércia, dinamômetro hidráulico, entre outros.

3.2.1 Dinamômetro Hidráulico

Dinamômetros hidráulicos apresentam um compartimento de trabalho na forma de um toróide elíptico com dois conjuntos de conchas opostas inclinadas, sendo que um dos conjuntos de conchas é fixado no rotor o qual é acionado pelo motor em teste e o outro conjunto é fixado no estator, na máquina estacionária, isto é, na carcaça (Hodgson, 1991). A Figura 1a apresenta um esquema de um dinamômetro hidráulico do tipo Froude e a figura 2b as entradas e saídas de fluido do estator.

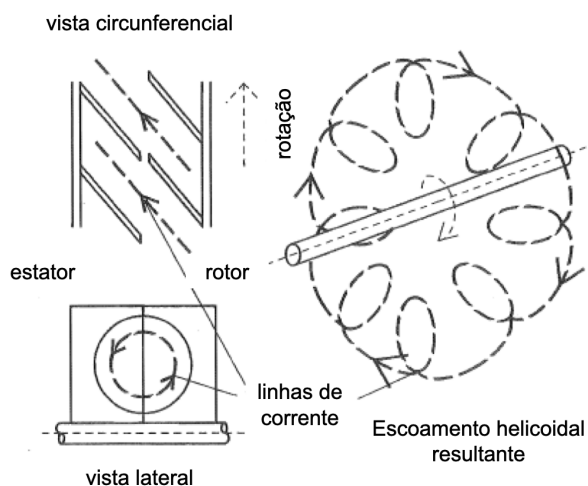
Figura 1. Representação de (a) dinamômetro hidráulico do tipo Froude e (b) entradas e saídas de fluido do estator.



Fonte: Hodgson (1991).

Quando em rotação, as conchas do rotor bombeiam o fluido do raio interno para o externo, atingindo o estator escoando do raio externo ao interno e transmitindo o torque. O fluido retorna ao raio interno do rotor e esse circuito do escoamento se sobrepõe ao escoamento rotacional, o que resulta em um escoamento helicoidal, conforme apresentado pela Figura 2.

Figura 2. Linhas de corrente do escoamento.



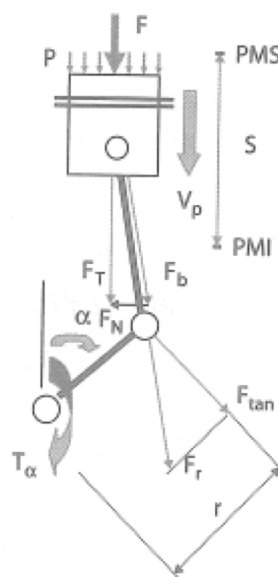
Fonte: Hodgson (1991).

As conchas perturbam o fluido quando passam por elas, gerando turbulência. Além desse efeito, o atrito estático (parede) e dinâmico (fluido), as perdas entre o rotor e o estator e os turbilhões gerados pelo escoamento em curva resultam em uma potência transferida para o fluido de trabalho. Assim, é preciso manter um fluxo de fluido suficiente a fim de limitar o aumento de temperatura. A quantidade de torque produzido pelo dinamômetro é ajustada por meio de uma comporta entre o rotor e o estator a fim de reduzir a área de fluxo ou pela redução da quantidade de fluido no compartimento de trabalho (Hodgson, 1991).

3.2.2 Medição Potência

Para realizar medições de potência em motores de combustão interna é necessário antes entender o conceito de torque realizado no volante do motor. Motores de combustão interna operam utilizando o mecanismo pistão-biela-manivela, o qual gera uma força de torção no eixo de manivelas, conhecido como virabrequim (Brunetti, 2012). Este mecanismo está representado na Figura 3.

Figura 3. Sistema pistão-biela-manivela: a onde P é o perímetro; T_α é o torque alfa; FN é força normal; PMI é ponto morto inferior; V_p é a velocidade do pistão.



Fonte: Brunetti (2012).

A força uniaxial F aplicada ao pistão é transmitida a biela por meio da força radial F_b e dessa ao virabrequim, originando uma componente de força tangencial F_{tan} e, assim, gerando um momento instantâneo no eixo do motor. A componente de força F_r depende diretamente do ângulo da biela, sendo, portanto, a força tangente variável. Ainda que o braço r tem dimensão constante, o momento no eixo do motor é alterado conforme o ângulo α varia, o qual é mensurado a partir da posição em que a biela e a manivela estão alinhadas no ponto morto superior (PMS). Posto isto, o torque pode ser calculado por meio do produto entre a força tangencial e a distância entre o ponto sujeito a esta carga e o eixo (Brunetti, 2012).

De acordo com Da Luz (2013), o torque depende do tamanho e da quantidade dos pistões, da relação de compressão e do tipo de combustível utilizado e varia de modo insignificante com a rotação do motor em razão da perda de eficiência nas rotações mais altas e mais baixas.

Em seguimento, a potência no eixo do motor pode ser expressa em função do torque e número de rotação do motor. Para um motor de combustão interna são estabelecidas quatro tipos de potências: potência térmica, que consiste no calor fornecido por unidade de tempo por meio da queima de combustível (Eq. 5); potência indicada, a qual representa a desenvolvida na cabeça dos pistões; potência de atrito, que é a consumida pelas resistências internas do motor e potência efetiva, a qual é medida no eixo do motor. A potência efetiva é dada pela diferença entre a potência indicada e a potência de atrito (Eq. 6) (Heywood, 1988).

$$Q = m_c \cdot PCI \quad (5)$$

onde Q é a potência térmica(kcal/s); m_c é a vazão em massa de combustível que o motor consome (kg/s); PCI é o poder calorífico inferior do combustível (kcal/kg).

$$W_e = W_i - W_f \quad (6)$$

onde W_e é a potência efetiva; W_i é a potência indicada e W_f é a potência de atrito.

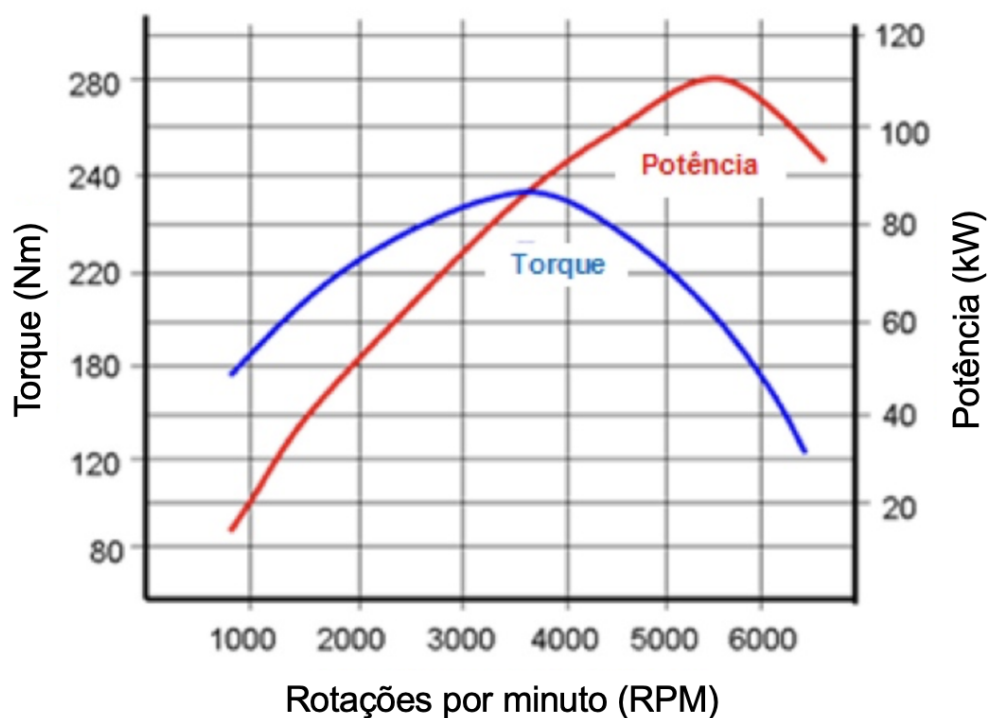
Por fim, a potência efetiva ainda pode ser expressa em função do torque e do número de rotação do motor, conforme apresentado na Equação (7) (Heywood, 1988).

$$W_e = \omega t = \frac{2\pi n}{60} t \quad (7)$$

onde W_e é a potência efetiva (kW); ω é a velocidade angular do motor (rad/s); t é o torque (nm); n é o número de rotação do motor (rpm).

Quanto maior a potência de um motor, maior será a sua capacidade de alcançar altas velocidades (Moratto, 2015). Para mais, a potência máxima ainda é relacionada com a rotação do motor, o que está presente na Figura 4.

Figura 4. Torque e potência em função da rotação.



Fonte: Gonçalves (2013).

A potência aumenta com a velocidade, enquanto a potência do freio aumenta até o máximo e, em seguida, decresce em valores maiores. Portanto, como no torque, isso ocorre devido às perdas causadas por fricção. Em motores de

automóveis, a potência ao freio atinge seu valor máximo na faixa entre 6000 e 7000 rpm (Moratto, 2015).

3.2.3 Medição Consumo

Há diversas metodologias as quais visam padronizar as medições de consumo de combustível em testes dinamométricos, dentre eles, o método gravimétrico e o método volumétrico.

3.2.3.1 Método Gravimétrico

O método gravimétrico mede a variação da massa do tanque de combustível a fim de determinar a quantidade de combustível consumido em um teste. O combustível flui do tanque para o motor através de um filtro, uma bomba e um regulador de pressão e a diferença entre a massa final e inicial de combustível no tanque é o consumo resultante, o que pode ser representado pela Equação 8 (Burke, Brace e Hawley, 2011):

$$V_{consumido} = \frac{m_{inicial}}{\rho(T,P,h)_{inicial}} - \frac{m_{final}}{\rho(T,P,h)_{final}} \quad (8)$$

onde $V_{consumido}$ é o volume de combustível, $m_{inicial}$ e m_{final} são a massa inicial e a massa final (kg), respectivamente; e $\rho(T,P,h)_{inicial}$ e $\rho(T,P,h)_{final}$ são a densidade em função da temperatura, pressão e altura inicial e final (kg/m^3), respectivamente.

3.2.3.2 Método Volumétrico

Esse método mede diretamente o fluxo de combustível utilizando um medidor de vazão, o qual registra o fluxo de combustível por unidade de tempo. Para maior confiabilidade, é necessário conhecer a densidade do combustível, a qual pode ser informada pelos fornecedores do combustível utilizado, e medir a temperatura do combustível para compensar efeitos de parâmetros ambientais. (Burke, Brace e Hawley, 2011).

3.2.4 Fator de Correção Atmosférica

A fim de padronizar e garantir critérios de comparação entre ensaios realizados em diferentes localidades do mundo, as normas relacionadas a ensaios de motores em dinamômetro requerem a utilização de fatores de correção atmosférica. Os fatores que influenciam nas medições e devem ser corrigidos são: pressão barométrica, umidade do ar e temperatura ambiente (Martins, 2006).

A NBR ISO 1585 (ABNT, 1996) prescreve que a correção de potência para motores ciclo Otto segue a Equação 9::

$$Ne_c = Ko \cdot Ne \quad (9)$$

onde Ne_c é a potência corrigida pela NBR ISO 1585 (CV); Ko é o fator de correção e Ne é a potência efetiva (CV) (Dal Bem, 2008).

O fator de correção para motores de ignição por centelha deve estar entre $0,93 < Ko < 1,07$ e é dado pela Equação 10:

$$Ko = \left(\frac{99}{P_s}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6} \quad (10)$$

onde P_s é a pressão do ar seco no local do ensaio (kPa) e T é a temperatura absoluta na entrada de ar do motor (K) (Dal Bem, 2008).

A P_s é a diferença entre a pressão barométrica e a pressão do vapor d'água, o que está representado na Equação 11 (Dal Bem, 2008):

$$P_s = Pb - \frac{1}{7,5} \left[e^{\left(21,106 - \frac{5345,5}{tu+273}\right)} - 0,49 \cdot (ts - tu) \cdot \frac{Pb}{100} \right] \quad (11)$$

onde Pb é a pressão barométrica; Ts é a temperatura de bulbo seco e Tu é a temperatura de bulbo úmido (Dal Bem, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os seguintes materiais foram utilizados para a realização da pesquisa:

- a) Dinamômetro Hidráulico (Motor Power Dinamômetros)
- b) Motor de combustão interna 1.8 litros General Motors (GM) provindo de um Fiat Palio fabricado em 2006, com 4 cilindros em linha. O mesmo possui uma razão de compressão de 10,5:1.
- c) Célula de carga (Berman Load Cells);
- d) Condicionador de sinal JY-S85;
- e) Bancada de fixação do motor e dinamômetro;
- f) Balança de precisão SF-400, capacidade máxima de 10 kg;
- g) Injeção eletrônica programável ProTune PR-Sport;
- h) Gasolina tipo C.

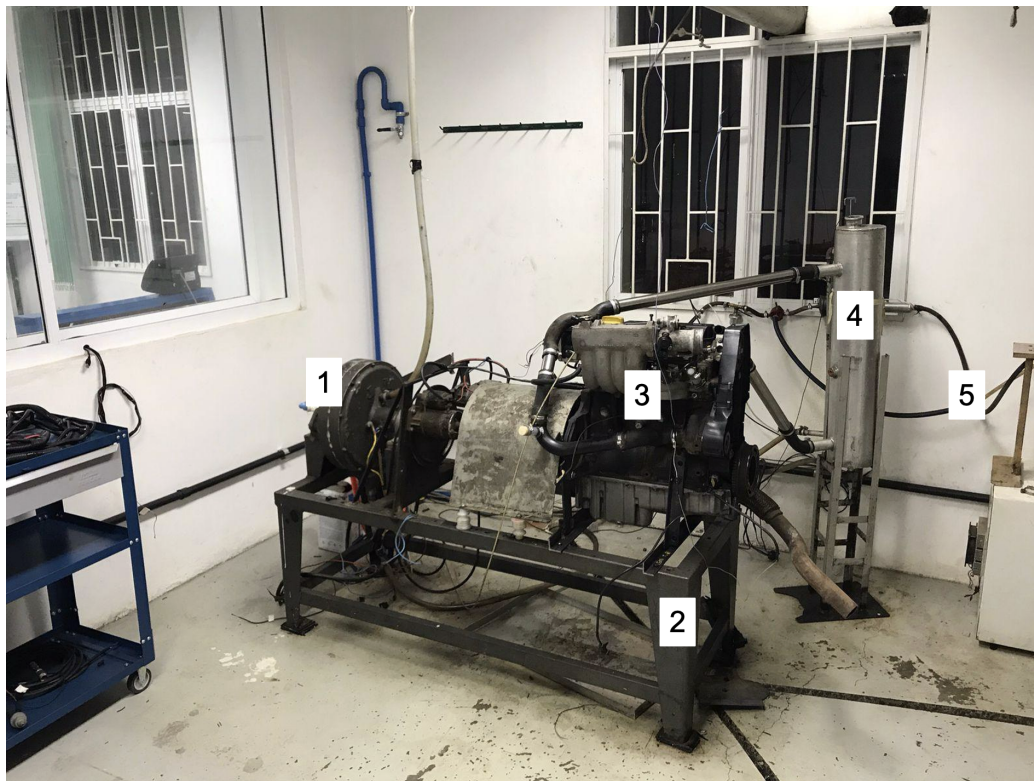
4.2 Métodos

4.2.1 Fixação do Motor

Para a realização do ensaio do motor em dinamômetro é necessário que tenha-se um perfeito alinhamento entre o eixo virabrequim e o eixo do freio hidráulico. Para isso foi construído um suporte específico para o motor GM 1.8 na bancada.

Para o funcionamento do motor de forma correta, foi instalado uma linha de combustível, escapamento e um sistema de mangueiras e tubos para ligar o motor à torre de resfriamento de água. A fixação de acessórios como a central da injeção eletrônica foi feita a partir de ganchos no teto para não sofrer efeitos da vibração do motor na bancada. Essa instalação está apresentada na Figura 5.

Figura 5. Motor de combustão interna GM 1.8 litros instalado na bancada de fixação do dinamômetro hidráulico: 1 - freio dinamométrico; 2 - bancada de suporte do motor; 3 - motor; 4 - torre de arrefecimento; 5 - linha de combustível.

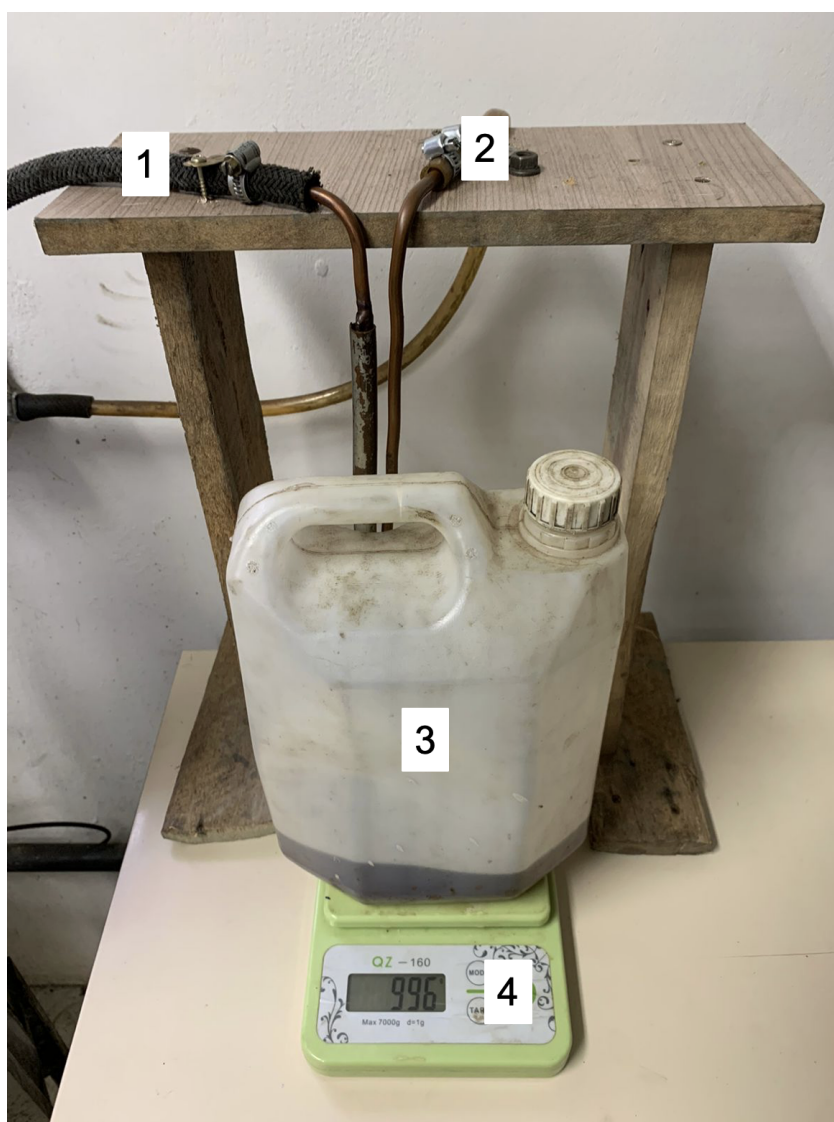


Fonte: o Autor (2023).

4.2.2 Instalação de Sistema de Medição de Consumo

O consumo de combustível (gasolina tipo C) foi medido com base no sistema gravimétrico utilizando uma balança (SF-400), a mesma possui uma capacidade de 10 kg com resolução de 1g, a qual é posicionada na parte inferior do tanque de combustível. O tanque é um reservatório com entrada para as mangueiras de combustível e um bocal de abastecimento. O consumo de combustível se dá em gramas (g) pela diferença entre a massa final e inicial apresentada na balança. O sistema de medição de consumo de combustível está apresentado na Figura 6.

Figura 6. Sistema de medição de consumo: 1 - mangueira de sucção; 2 - mangueira de retorno; 3 - tanque; 4 - balança.



Fonte: o Autor (2023).

4.2.3 Instalação e Ajuste da Parte Eletrônica

Na parte de instalação eletrônica, a célula de carga (Figura 7) foi fixada na haste do dinamômetro por meio de parafusos, de modo que ficasse perpendicular ao braço desse. A fiação da célula de carga foi ligada diretamente no condicionador de sinal JY-S85 (Figura 8) para que o mesmo interpretasse o sinal e fornecesse um pulso de 0 até 5V de acordo com a carga. O condicionador de sinal foi ligado na injeção eletrônica por meio de uma entrada auxiliar da própria injeção, a qual recebe os valores de tensão e os reproduzem na tela do computador.

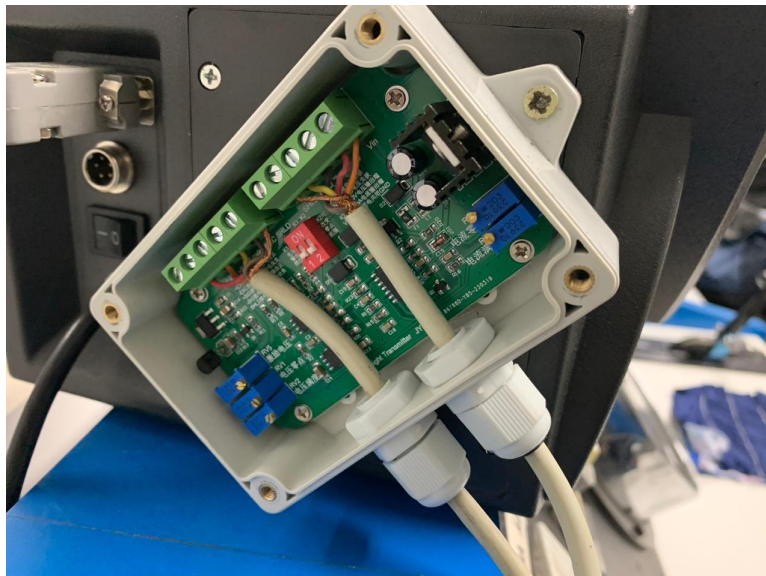
Na configuração, uma barra está fixada ao mancal do dinamômetro, permitindo que o dinamômetro possa transmitir a força que está realizando para frear o motor para a barra, dessa forma, o movimento é transmitido à célula de carga. O torque é então calculado por meio de uma equação simples, onde a força exercida na célula de carga é expressa em quilogramas (kg) e a haste possui um comprimento conhecido. Esse arranjo proporciona a medida do torque em quilograma-força por metro (kgF/m), oferecendo uma avaliação precisa da força aplicada e da extensão da alavanca, resultando em uma medida eficiente e confiável do torque gerado.

Figura 7. Célula de carga.



Fonte: o Autor (2023).

Figura 8. Condicionador de sinal JY-S85.



Fonte: o Autor (2023).

4.2.4 Testes de Medição de Rendimento Térmico

Na parte de testes do motor é necessário que seja determinada uma medição do torque pelo freio hidráulico. Para isso, o motor foi colocado em um regime específico de rotação e torque e, assim, se avaliou o consumo de combustível em um período de tempo.

A rotação foi controlada por meio do freio dinamométrico, onde foi fixado o TPS (Sensor de Posição da Válvula da Borboleta, do inglês *Throttle Position Sensor*) em 20%, 40% e 70% e, conforme a carga, pode-se variar a rotação do motor. Para as medições, foram realizados 3 ou 4 testes para cada TPS, variando a rotação e a carga exercida no motor.

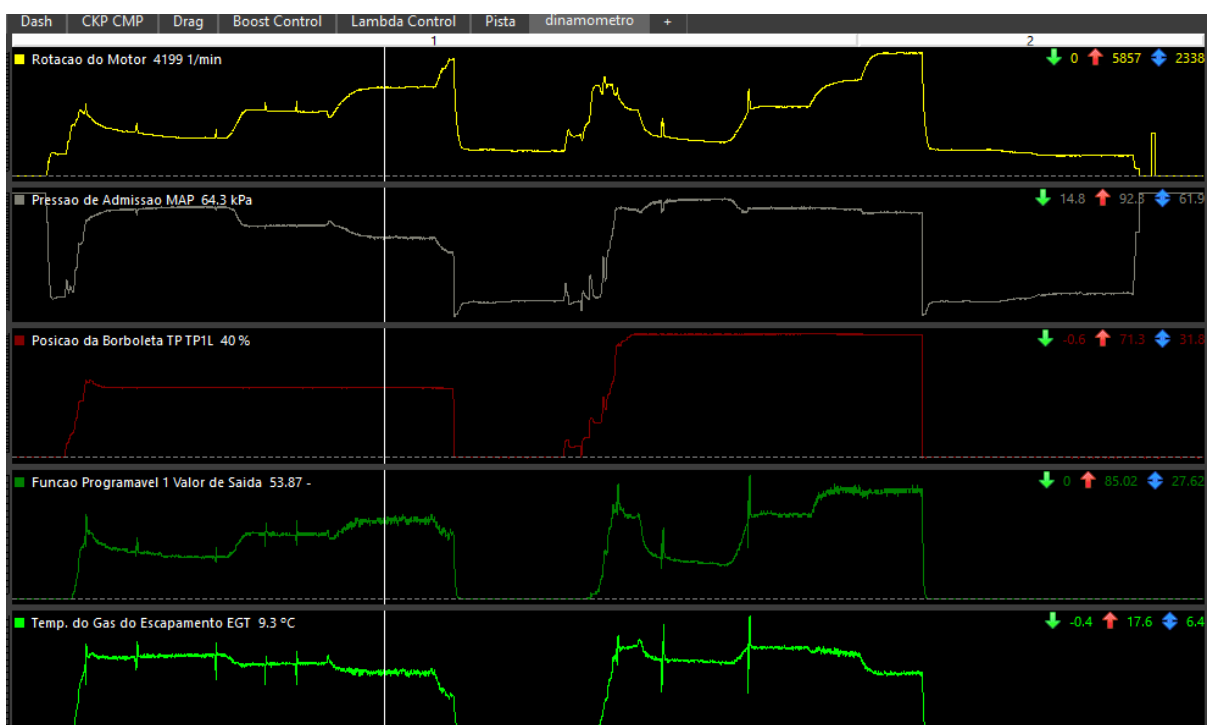
A medição de consumo de combustível é realizada com duas pessoas: uma é responsável por posicionar o tanque abastecido com a gasolina tipo C sobre a balança, enquanto a outra trava o motor em regime de teste. Nesse momento é enviado um sinal para a pessoa que está na balança e essa a tara e, então, se inicia a contagem do tempo de 30 segundos utilizando um cronômetro. O consumo é medido em gramas/minuto.

4.2.5 Cálculo Rendimento Térmico

O rendimento foi dado por meio da Equação (2), com a qual foi definido o rendimento térmico do motor ou quanto ele utilizou da energia do combustível:

A leitura de potência, torque e rotação é obtida através do software Pro Tune Analyzer, onde conforme Figura 9, é possível ver a forma que eles são apresentados.

Figura 9. Leitura de potência, torque e rotação é obtida através do software Pro Tune Analyzer.



Fonte: o Autor (2023).

Na interpretação dos dados, observa-se a parte onde o TPS (posição da borboleta) se torna uma linha constante, nesse intervalo o motor está na fase de teste, então o zoom foi aumentado e a leitura de potência, torque e rotação do motor realizada. O torque foi apresentado como "Temp. dos gases de escapamento (EGT)" devido a injeção não apresentar duas funções programáveis. A potência é apresentada como Função programável 1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

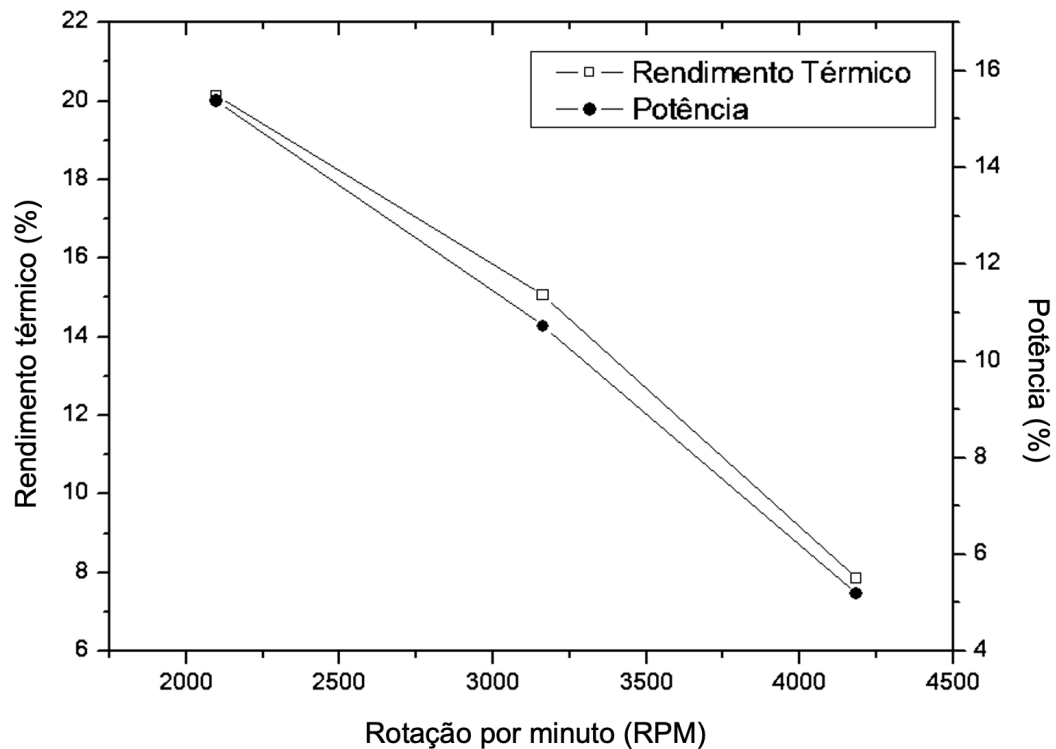
Nas Tabelas 2, 3 e 4 e Figuras 10, 11 e 12 estão apresentados os resultados dos testes de rendimento térmico com, respectivamente, 20%, 40% e 70% de abertura do corpo de borboleta do motor.

Tabela 2. Teste de rendimento térmico com 20% de abertura do corpo de borboleta do motor.

	TESTE 1 (40%TPS)	TESTE 2 (40%TPS)	TESTE 3 (40%TPS)
RPM	2098	3163	4183
Potência (CV)	15,38	10,72	5,19
Potência (kW)	11,60	8,08	3,91
Consumo (g/minuto)	88	82	76
Consumo específico (g/cv.h)	343,303	458,955	878,613
Consumo específico (g/kw.h)	399,316	533,837	1021,965
Poder calorífico gasolina (kcal/kg)	9400	9400	9400
Poder calorífico gasolina (kJ/kg)	39292	39292	39292
Consumo (kJ/s)	57,63	53,70	49,77
Rendimento Térmico (%)	20,13	15,06	7,86

Fonte: o Autor (2023).

Figura 10. Teste de rendimento térmico com 20% de abertura do corpo de borboleta do motor.



Fonte: o Autor (2023).

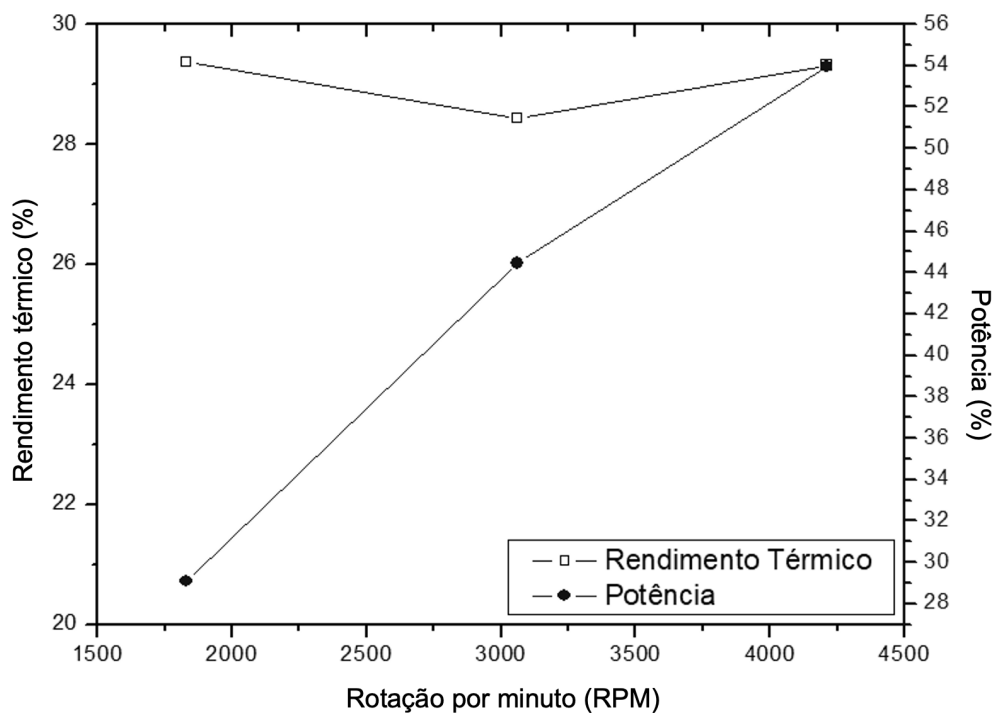
Na Figura 10 é possível inferir que os testes foram realizados com êxito, pois os resultados apresentados correspondem com o esperado, nos quais o rendimento de uma máquina térmica desse modelo não possui grande rendimento térmico. Além disso, observa-se que o rendimento do motor em estudo caiu bruscamente em altas rotações por conta de uma baixa entrada de ar (corpo de borboleta com pouca abertura) e o consumo nesta condição foi elevado, pela potência que ele forneceu.

Tabela 3. Teste de rendimento térmico com 40% de abertura do corpo de borboleta do motor.

	TESTE 1 (40%TPS)	TESTE 2 (40%TPS)	TESTE 3 (40%TPS)
RPM	1830	3059	4210
Potência (CV)	29,08	44,45	53,97
Potência (kW)	21,93	33,52	40,70
Consumo (g/minuto)	114	180	212
Consumo específico (g/cv.h)	206,327	213,131	206,743
Consumo específico (g/kw.h)	273,590	282,612	274,141
Poder calorífico gasolina (kcal/kg)	9400	9400	9400
Poder calorífico gasolina (kJ/kg)	39292	39292	39292
Consumo (kJ/s)	74,65	117,88	138,83
Rendimento Térmico (%)	29,38	28,44	29,32

Fonte: o Autor (2023).

Figura 11. Teste de rendimento térmico com 40% de abertura do corpo de borboleta do motor.



Fonte: o Autor (2023).

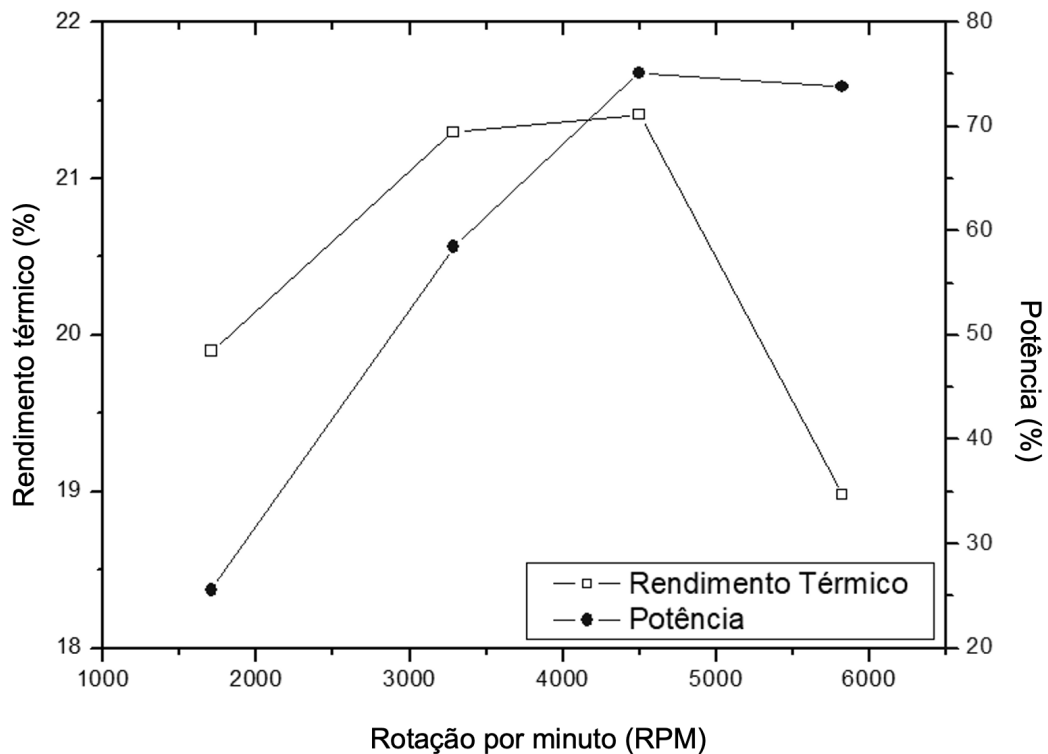
Na Figura 11 é evidente que o motor apresenta um desempenho superior quando submetido a carga, resultando em uma eficiência notavelmente mais alta no aproveitamento do combustível. Além disso, observa-se uma queda de eficiência em uma faixa específica de rotação. Por exemplo, entre 2000 e 3000 rotações por minuto (RPM), o rendimento diminui de aproximadamente 29,4% para 28,4%. Essa análise sugere que o motor atinge seu ponto ótimo em termos de eficiência operacional sob carga, mas pode experimentar uma redução de desempenho em determinados intervalos de rotação.

Tabela 4. Teste de rendimento térmico com 70% de abertura do corpo de borboleta do motor.

	TESTE 1 (40%TPS)	TESTE 2 (40%TPS)	TESTE 3 (40%TPS)	TESTE 4 (40%TPS)
RPM	1706	3286	4497	5823
Potência (CV)	25,57	58,45	75,11	73,82
Potência (kW)	19,28	44,08	56,64	55,67
Consumo (g/minuto)	148	316	404	448
Consumo específico (g/cv.h)	304,633	284,544	283,094	319,411
Consumo específico (g/kw.h)	403,944	377,305	375,382	423,539
Poder calorífico gasolina (kcal/kg)	9400	9400	9400	9400
Poder calorífico gasolina (kJ/kg)	39292	39292	39292	39292
Consumo (kJ/s)	96,92	206,94	264,57	293,38
Rendimento Térmico (%)	19,90	21,30	21,41	18,98

Fonte: o Autor (2023).

Figura 12. Teste de rendimento térmico com 70% de abertura do corpo de borboleta do motor.

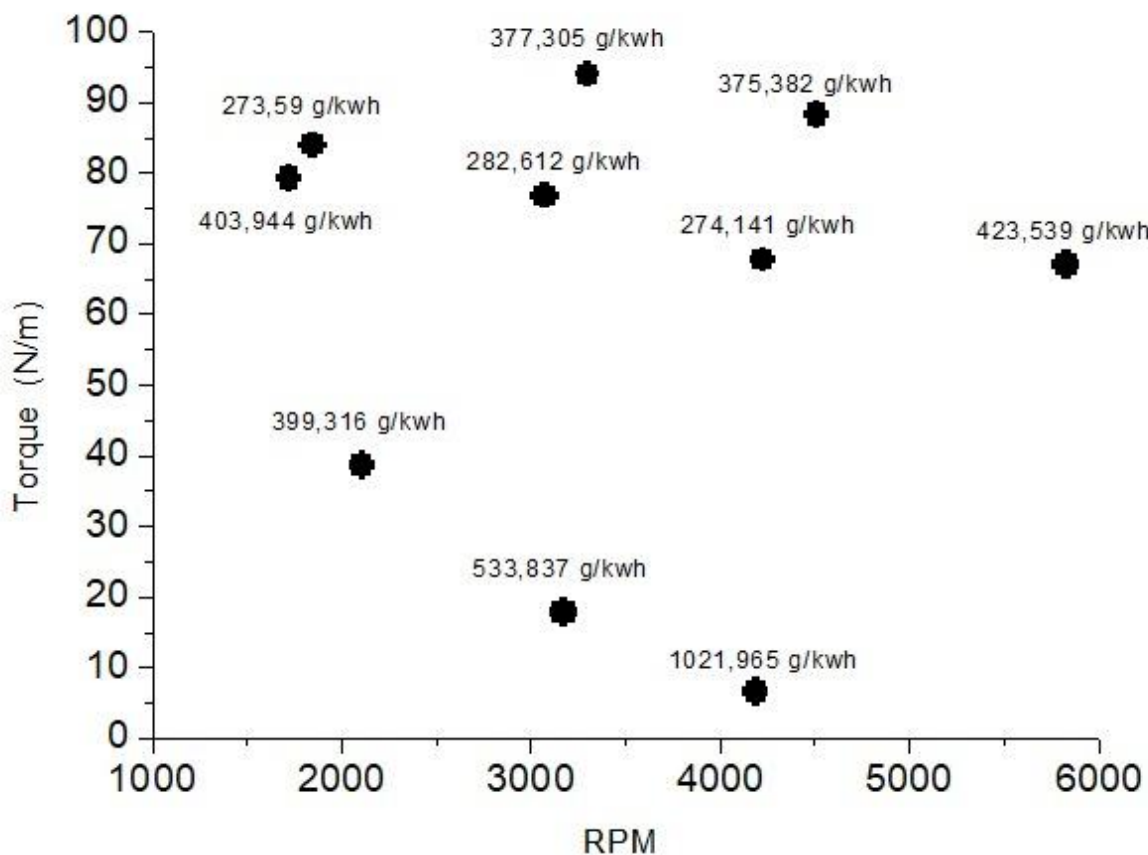


Fonte: o Autor (2023).

Ao examinar a Figura 12, é perceptível uma acentuada diminuição no rendimento do motor em rotações elevadas (acima 5000 rpm) de , especialmente quando a carga é significativa e a TBI (corpo de borboleta, do inglês *Throttle Body Injection*) está quase completamente aberta. Nesse cenário, observa-se que o aproveitamento do combustível é inferior em comparação com o gráfico anterior (Figura 10). Essa constatação sugere uma relação inversa entre rotações mais altas, abertura da TBI e a eficiência do motor, indicando uma área crítica em termos de otimização do desempenho.

Na Figura 13 é apresentado o mapa de eficiência do motor, mostrando a potência em função do RPM e indicando o consumo específico do motor nesse ponto.

Figura 13. Mapa de eficiência do motor



Fonte: o Autor (2023).

A análise da Figura 13 mostra que a forma como foi estudado o motor de combustão interna foi eficaz. As ilhas de eficiência do motor referem-se a diferentes condições de operação em que o motor exibe níveis de eficiência. Essas condições estão relacionadas com a carga e a velocidade do motor. Os gráficos destacam que a eficiência do motor varia bastante em diferentes situações, como rotação e potência. Isso mostra que o desempenho do motor não é o mesmo em todas as condições. Além disso, ao confirmar que os resultados estão de acordo com o esperado, esses dados validam a forma de estudo. Eles também apontam para áreas específicas onde é possível fazer melhorias para tornar o motor de combustão interna mais eficiente no geral, ou seja, pontos de funcionamento que têm potencial para aumento de rendimento.

6 CONCLUSÕES

Ao longo desta pesquisa, foram estabelecidos e atingidos objetivos fundamentais para a otimização do processo de medição de potência instantânea, controle do consumo de combustível, automação do procedimento de teste e geração de um mapa de eficiência térmica. Os testes oferecem soluções para os desafios enfrentados no contexto da medição de eficiência térmica.

A elaboração de um método eficiente para a medição do consumo de combustível oferece uma ferramenta para a realização de testes no dinamômetro, fazendo com que possua uma facilidade na realização de trabalhos futuros e ajude na elaboração de testes de rendimento térmico.

A automação do procedimento de teste representa um avanço significativo na confiabilidade dos resultados, reduzindo falhas operacionais e aumentando a eficiência dos processos. A geração do mapa de eficiência térmica fornece uma visão abrangente do desempenho energético em diferentes condições operacionais, facilitando a identificação de áreas de melhoria e otimização. Esse mapa não apenas orienta as decisões de gestão, mas também serve como um instrumento para o desenvolvimento contínuo de tecnologias mais eficientes.

Em síntese, os objetivos delineados foram alcançados com sucesso, contribuindo para avanços significativos na medição de potência, controle de consumo de combustível, automação de testes e análise de eficiência térmica. Este trabalho não apenas promove a excelência técnica, mas também representa um passo crucial em direção a práticas mais eficientes e sustentáveis no contexto energético. O impacto potencial dessas contribuições se estende não apenas ao campo acadêmico, mas também à indústria e à sociedade como um todo.

7 TRABALHOS FUTUROS

A fim de dar continuidade no trabalho, sugere-se as seguintes como propostas futuras:

- Automação da balança por meio da injeção eletrônica, eliminando a necessidade de duas pessoas para a execução dos experimentos.
- Medição de rendimento em outros motores, já utilizando o consumo de combustível medido pela injeção eletrônica.
- Testes de rendimento com diferentes variações de mistura ar/combustível.

REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ FLÓREZ, Jesús Andrés; CALLEJÓN AGRAMUNT, Ismael. **Máquinas térmicas motoras**. Vol. 1. 2002.

ALVES, A. S. **Microcanonical Szilárd engines and spontaneous symmetry breaking [recurso eletrônico] = Máquinas de Szilárd microcanônicas e quebras espontâneas de simetria**. 2018. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Estadual de Campinas, 2018.

ALVES FILHO, H. J. R.; NOGUEIRA, D. B. **Sistema de aquisição de dados para bancada de ensaios dinamométricos de motores a combustão interna**. 2015. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica). 2015.

ABNT. **NBR ISO 1585 de junho de 1996**. Disponível em <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/10181/nbriso1585-veiculos-rodo-viarios-codigo-de-ensaio-de-motores-potencia-liquida-efetiva>>. Acesso em 20 out. 2023.

BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Blucher, 2013.

BRASIL. **Fatores De Conversão, Densidades E Poderes Caloríficos Inferiores**. Disponível em <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/outras-pecas-documentais/fatores-conversao-2022.pdf>>. Acesso em 18 out. 2023.

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

BURKE, Richard D.; BRACE, C. J.; HAWLEY, J. Gary. Critical evaluation of on-engine fuel consumption measurement. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 225, n. 6, p. 829-844, 2011.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

ÇENGEL Y.A., BOLES M. A. **Termodinâmica**. 5ª ed., MC Graw Hill, 2006.

DA LUZ, E. R. 2003. **Predição de propriedades de gasolinas usando espectroscopia FTIR e regressão por mínimos quadrados parciais**. 2003. Dissertação (Mestrado em Química). Rio de Janeiro : Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.

DAL BEM, Armando José. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto alimentado com álcool de 75 INPM**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo. 231p. 2008.

DE CARVALHO, M. A. S. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Bahia: Universidade Federal da Bahia, 2016.

FERREIRA, S. M. **Relação entre a Espessura Real e Aparente da Gasolina com Etanol e da Gasolina Pura em Colunas de Laboratório**. 2003. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Universidade de São Paulo. 2003.

GALLO, W.L.R. **Análise Exergética de Motores a Gasolina e a Álcool**. 1990. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 1990.

GOLDEMBERG, J.; MACEDO, I. C. Brazilian alcohol program: an overview. **Energy for Sustainable Development**, v. 1, n. 1, p. 17-22, 1994.

GONÇALVES, Júnior. **Qual a diferença entre Torque e potência?** 2013. Disponível em <https://dicasparacarros.blogspot.com/2013/06/qual-diferenca-entre-torque-e-potencia.html> . Acesso em: 26 out. 2023.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Physics, Volume 2**. John Wiley & Sons, 2010.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill International ed, 1988, 930p.

HODGSON, Paul. **Theoretical model and dynamic simulation of variable fill hydraulic dynamometers**. 1991. 280 f. Tese (Ph. D. em Engenharia Mecânica) - Department of Mechanical Engineering, University of Canterbury, Christchurch, 1991.

KILLEDAR, J. S. **Dynamometer: theory and application to engine testing**. Xlibris Corporation, 2012.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. 3. ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas, 2012.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. 4 ed. (Revista e Aumentada). 2006.

MELO, André de Souza; SAMPAIO, Yony de Sá Barreto. Impactos dos preços da gasolina e do etanol sobre a demanda de etanol no Brasil. **Revista de economia contemporânea**, v. 18, p. 56-83, 2014.

MORATTO, Luis Fernando Costa Aranha Sebrían. **Simulação de curvas de rendimento do motor de combustão interna do ciclo Otto**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015.

MOREIRA, A. D.; COUTO, F. P. **A Termodinâmica do Motor de Combustão Interna: Implicações sociais do uso dessa tecnologia**. 2019. Disponível em

<<https://www.cac.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/30/2019/10/main.pdf>>. Acesso em 25 set. 2023.

Pulkrabek, Willard W. 1997. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. New Jersey : Prentice Hall, 1997.

RAÍZEN. **Etanol: o que é e como é usado no Brasil**. Disponível em <<https://www.raizen.com.br/blog/etanol>>. Acesso em 26 out. 2023.

RAZMARA, M. et al. Optimal exergy-based control of internal combustion engines. **Applied energy**, v. 183, p. 1389-1403, 2016.

SARATHY, S. Mani; FAROOQ, Aamir; KALGHATGI, Gautam T. Recent progress in gasoline surrogate fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 65, p. 67-108, 2018.

SAUERWEIN, Ricardo Andreas; SAUERWEIN, Inés Prieto Schmidt. Objeto de aprendizagem: máquinas térmicas. **Caderno brasileiro de ensino de física**, p. 812-830, 2012.

SCHMIDT, A.; BORESI, R. J. **Estática**. 1 ed. Boston: Cengage, 2003.

WANG, Zhijian et al. A review of energy loss reduction technologies for internal combustion engines to improve brake thermal efficiency. **Energies**, v. 14, n. 20, p. 6656, 2021.