

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES TÉRMICOS PARA FERRAMENTAS
PORTÁTEIS A COMBUSTÃO INTERNA: UM ESTUDO COMPARATIVO ROUND-
ROBIN

por

Paulo Henrique Amorim

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 28 de Agosto de 2023.

CIP - Catalogação na Publicação

Amorim, Paulo Henrique

VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES TÉRMICOS PARA FERRAMENTAS PORTÁTEIS A COMBUSTÃO INTERNA: UM ESTUDO COMPARATIVO ROUND-ROBIN/ Paulo Henrique Amorim. -- 2023. 15 f.

Orientador: Herbert Martins Gomes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. bancada de testes térmicos. 2. motores monocilíndricos. 3. termopares. 4. aquisição de dados. 5. Round-Robin. 6. Análise estatística I. Gomes, Herbert Martins, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Paulo Henrique Amorim

VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES TÉRMICOS PARA FERRAMENTAS
PORTÁTEIS A COMBUSTÃO INTERNA: UM ESTUDO COMPARATIVO ROUND-
ROBIN

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Medições Térmicas

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes (Presidente)

Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 28 de Agosto de 2023.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Rogério Nascimento Amorim e Isabel Cristina Ayres Amorim pelo apoio e incentivo ao longo desta jornada.

À minha namorada, Thaís Elisa Severo Damo, que esteve ao meu lado e me incentivou todos estes anos de graduação, mesmo sabendo que muitas vezes precisaria fazer sacrifícios e lidar com a minha ausência.

Aos meus sogros, Mauro Damo e Ilionara Severo Damo, que sempre me apoiaram e torceram por mim.

À minha irmã, Andressa de Ávila Amorim, que mesmo não estando presente fisicamente, estará sempre em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Ao excelentíssimo Professor Herbert Martins Gomes que sempre, muito solícito, encontrou tempo e disposição para me apoiar e orientar neste projeto.

À equipe da empresa onde este trabalho foi realizado, por ter me proporcionado oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional.

*“Sem dados você é apenas
mais uma pessoa com uma
opinião.”*

William Edwards Deming

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

**VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES TÉRMICOS PARA FERRAMENTAS
PORTÁTEIS A COMBUSTÃO INTERNA: UM ESTUDO COMPARATIVO ROUND-
ROBIN**

Amorim, Paulo Henrique
amorim_ph@hotmail.com

Resumo.

Este estudo descreve o processo de validação de uma bancada de testes térmicos para ferramentas portáteis que utilizam motores monocilíndricos de combustão interna de ciclo 2 tempos. A bancada de testes utiliza termopares para medir temperatura. Um PC, conectado a uma torre de aquisição de dados, realiza leituras em tempo real dos termopares e das condições de operação do motor. A bancada de testes térmicos deste estudo estava originalmente localizada na matriz da empresa onde este estudo foi realizado (Alemanha). Foi planejada sua transferência e reinstalação para o local deste estudo (Brasil), assim como uma série de testes comparativos Round-Robin foram planejados e executados. Ao utilizar a metodologia de estudo comparativo Round-Robin e aplicar análise estatística aos dados obtidos, observou-se uma reprodução bem-sucedida dos resultados originais, confirmando assim a eficácia da bancada de testes em seu novo ambiente, o Brasil.

Palavras-chave: bancada de testes térmicos, motores monocilíndricos, termopares, aquisição de dados, Round-Robin, análise estatística.

Implementation of thermal test-bench for portable-tool engines

Abstract. *This study describes the validation process of a thermal test bench for portable tools equipped with single-cylinder 2-stroke internal combustion engines. The test bench incorporates thermocouples to measure temperature. A personal computer, connected to a data acquisition tower, facilitates real-time readings of the thermocouples and engine operating conditions. The thermal test bench for this study was originally located at the headquarters of the company where this study was carried out (Germany). Its transfer and reinstallation to the location of this study (Brazil) was planned, as well as a series of Round-Robin comparative tests were planned and executed. By employing the Round-Robin comparative study methodology alongside statistical analysis of the obtained data, successful replication of the original results was achieved, thus affirming the test bench's efficacy in its new environment.*

Keywords: thermal test bench, single-cylinder engines, thermocouples, data acquisition, Round-Robin, statistical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxo de ar da ferramenta e volante aletado.	1
Figura 3.1 – Representação esquemática de um termopar.	6
Figura 4.1 – Representação esquemática da bancada de testes.	7
Figura 4.2 – Localização do termopar da vela de ignição.	8
Figura 4.3 – Localização do termopar do topo do cilindro.	8
Figura 4.4 - Localização dos termopares da pista de deslize.....	9
Figura 4.5 – Localização do termopar de engripamento.	9
Figura 4.6 - Localização dos termopares de parafusos do escape.	10
Figura 4.7 - Localização dos termopares do cárter.....	10
Figura 4.8 – Localização do termopar do carburador.....	11
Figura 4.9 – Localização dos termopares de avaliação térmica do ar.	11
Figura 5.1 - Ciclo real Alemanha e Brasil. Gráfico rpm x tempo transcorrido do teste.....	12

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Especificações técnicas e de operação do motor utilizado neste estudo.....	7
Tabela 4.2 – Ciclo de teste e frequência de medições.	8
Tabela 5.1 – Teste à Normalidade dos dados.	13
Tabela 5.2 – Teste à Homogeneidade de Variâncias dos dados.	13
Tabela 5.3 – Teste ANOVA a um fator.	14
Tabela 5.4 – Tabela de resultados descritivos.	15

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1	Ensaio do tipo Round-Robin	3
3.2	Análise de Variância.....	4
3.3	Normas aplicadas a Bancadas de Testes de Motores à combustão.....	5
3.4	Seleção de Termopares	6
4	METODOLOGIA.....	6
4.1	Máquina para teste	7
4.2	Ciclo de teste.....	7
4.3	Posicionamento dos termopares.....	8
4.4	ANOVA	11
4.4.1	Tamanho amostral	11
4.4.2	Pressupostos para aplicação da ANOVA	12
5	RESULTADOS	12
5.1	Ciclo de teste real.....	12
5.2	Verificação de pressupostos da ANOVA	13
5.3	Resultados do teste ANOVA	14
6	CONCLUSÃO.....	15
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1 INTRODUÇÃO

Os testes de bancada são uma importante ferramenta para avaliar o desempenho e a confiabilidade dos motores de dois tempos. Esses testes são realizados em laboratórios especializados e utilizam equipamentos de medição precisos para avaliar diferentes aspectos do desempenho do motor como potência, torque, consumo de combustível e emissões. Durante os testes de bancada de motores 2 tempos são avaliados desempenho do motor em diferentes regimes de rotação e sob diferentes cargas. Para ferramentas motorizadas portáteis se torna relevante monitorar a sua temperatura em diferentes pontos juntamente aos parâmetros de funcionamento do motor para garantir que ele funcione corretamente e de acordo com as especificações do fabricante em relação ao funcionamento e segurança. Além disso, os testes de bancada são usados para avaliar a vida útil do motor e a durabilidade de seus componentes como, por exemplo, a resistência dos pistões, anéis, bielas e outros componentes importantes do motor sob condições de carga distintas sendo, portanto, uma ferramenta crucial para o desenvolvimento de motores 2 tempos confiáveis e de alto desempenho.

1.1 Motivação

Os motores monocilíndricos de dois tempos são amplamente utilizados em várias aplicações, como motocicletas, barcos e ferramentas portáteis. Esses motores são conhecidos por sua simplicidade mecânica, alta relação peso-potência e baixo custo. Diferentemente de motocicletas e barcos em que, devido à sua velocidade de deslocamento, há um fluxo de ar para resfriar o motor por convecção, nas ferramentas portáteis de motores 2 tempos o resfriamento é efetuado por um volante aletado (Figura 1.1a) acoplado ao virabrequim do motor e girando na mesma rotação, desta forma criando a convecção de ar necessária para expelir o ar quente e substituí-lo por ar ambiente mais frio (Figura 1.1b). Este fato torna a avaliação térmica de ferramentas portáteis motorizadas relevante por diversas razões. Em primeiro lugar, a segurança: durante a operação, as ferramentas portáteis motorizadas geram uma quantidade considerável de energia em forma de calor, especialmente no motor e no sistema de escape, logo, um sistema de resfriamento inadequado pode comprometer a segurança do operador durante o uso da máquina. Ao analisar a distribuição de temperatura em diferentes componentes, é possível identificar áreas de ineficiência ou geração excessiva de calor. Essas informações são valiosas para aprimorar o projeto, melhorar os sistemas de resfriamento e realizar ajustes que maximizem sua eficiência e vida útil. Ao identificar esses problemas por meio da bancada de testes térmicos, medidas corretivas podem ser tomadas ainda nas fases de desenvolvimento de um projeto, como otimizar o design para melhorar a ventilação, a lubrificação adequada, aprimorar ou substituir componentes que não contribuam para o resfriamento, garantindo a confiabilidade e prolongando a vida útil da ferramenta portátil.

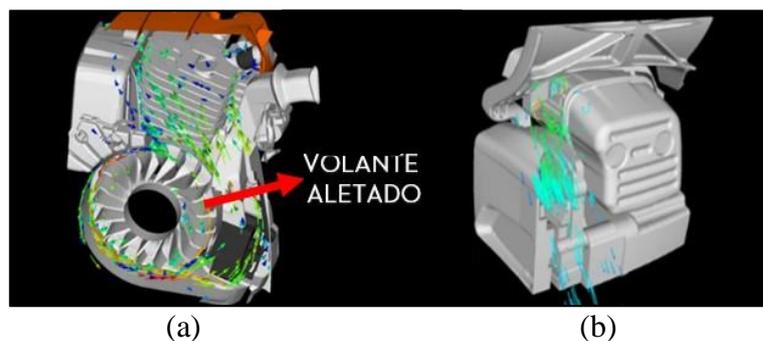


Figura 1.1 – Fluxo de ar da ferramenta e volante aletado.
(a) Vista frontal. (b) Vista oposta.

1.2 Objetivos

Este trabalho realiza uma abordagem de análise estatística de dados resultantes de testes *Round-Robin* aplicados a uma bancada de testes térmicos. Assim, para validar a bancada de testes em seu novo ambiente, o objetivo é o de observar uma reprodução bem-sucedida dos resultados originais do ponto de vista de significância estatística. Para isso, serão aplicados ensaios do tipo *Round-Robin* e análise de variância (ANOVA, *ANalysis Of VAriance*) afim de apresentar os principais parâmetros e decisões para validar e liberar, com credibilidade analítica, a utilização da bancada para os testes que nela serão executados posteriormente a este estudo. O estudo envolve a medição da temperatura em vários locais do motor e da ferramenta utilizando termopares, uma torre de aquisição de dados e um PC. Os termopares fornecem medições de temperatura altamente precisas em pontos específicos dentro do motor e ao redor da ferramenta portátil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma bancada de testes para motores é um dispositivo geralmente projetado especificamente para a faixa de testes desejados (potência, tipos de motores, configurações, etc.) assim como seus sensores e atuadores, da mesma forma, selecionados para a aplicação em específico. Portanto alguns trabalhos podem ser encontrados na literatura, mas nenhum com as mesmas características daquelas que serão usadas na bancada aqui a ser avaliada, que é teste térmico em motor monocilíndrico de ciclo dois tempos.

Em seu trabalho, Brogueira (2016) apresenta as decisões tomadas para o projeto de uma bancada de testes para micromotores à combustão. Especificamente micromotores de 3,5 cm³. Como sempre o objetivo é o de obter as curvas torque × rotação dos motores e indiretamente a potência disponibilizada pelos motores. Diferente de bancadas com discos de freio, volantes de inércia são usadas na bancada com objetivo de simular a carga recebida pelo micromotor, devido principalmente ao custo de construção. Parâmetros do projeto como potência máxima de 2,5 kW máximo torque de 0,75 Nm, máxima rotação de 40000 rpm, máxima temperatura do motor de 130 °C são especificadas pelas necessidades e dimensões dos micromotores que serão testados e o projeto é feito levando-se em conta tais parâmetros. Eles concluem que a bancada construída atendeu às especificações impostas com a criação por software LabView para interface nos testes realizados.

Focando na necessidade de se ter bancadas de testes de alta qualidade e eficientes quanto às medições, Friedrich et al (2017) apresenta uma proposta de metodologia para realização de testes com maior qualidade de validade de medição em motores à combustão em bancadas de teste. São propostos módulos para detecção automática da condição de comportamento estacionário do motor juntamente com a checagem da qualidade dos sinais medidos e das relações físicas para detectar inconsistências (com modelos de Lógica Fuzzy). Para testes de combustíveis, a metodologia de Projeto de Experimentos (*DoE-Design of Experiments*) é empregada para corrigir desvios não desejados dos ajustes de parâmetros para a tomada de decisão dos componentes que são relevantes para a combustão. Eles relatam que o tempo de teste em bancada pode ser reduzido, levando a uma redução de custos de testes e utilização dos equipamentos. A predição dos pontos seguintes de operação da bancada, permitiram corrigir erros na entrada manual de variáveis da bancada com antecedência, sendo a metodologia empregada para motores MAN Diesel e Turbo SE.

De acordo com Franco e Martorano (1998), em seu artigo intitulado "*Evaluations on the Heat Transfer in the Small Two-stroke Engines*", os autores realizaram uma análise abrangente

do processo de transferência de calor em motores pequenos de dois tempos. O estudo abordou diversos fatores que afetam a transferência de calor nesses motores, onde destacam-se a velocidade do motor, a carga, a mistura de combustível e o design da câmara de combustão. Os autores observam que a velocidade do motor é um dos principais fatores que afetam a transferência de calor, uma vez que a velocidade do fluxo de gases de escape e da mistura ar-combustível influenciam a transferência de calor para as paredes do cilindro. A carga, por sua vez, também afeta a transferência de calor, já que a quantidade de combustível queimado afeta a temperatura dos gases de escape e, portanto, a quantidade de calor transferido para as paredes do cilindro. A mistura de combustível, incluindo a proporção ar-combustível e o tipo de combustível utilizado, também podem afetar a transferência de calor nos motores de dois tempos. Por fim, o design da câmara de combustão, incluindo a forma e o tamanho da câmara de combustão, bem como a posição e o número de canais de transferência, também podem influenciar a transferência de calor nos motores dois tempos. Além disso, os autores discutiram diferentes métodos para medir a transferência de calor e avaliaram sua precisão e eficácia. Entre eles, destacam-se o método dos fluxos de calor, que utiliza sensores termopares para medir a temperatura na parede do cilindro, e o método da parede quente, que consiste em revestir a parede do cilindro com um material que possua uma resistência térmica conhecida e medir a temperatura na superfície desse revestimento. Os autores também abordaram o uso de modelos numéricos e simulações computacionais para prever a transferência de calor nos motores de dois tempos. Através da avaliação desses diferentes métodos, os autores concluem que o método dos fluxos de calor é o mais preciso e confiável para medir a transferência de calor em motores de dois tempos.

Metz (1987) descreve o uso do método de teste *Round-Robin* nos testes de emissões automotivas. Este método envolve testar o mesmo veículo ou motor várias vezes em diferentes instalações de teste usando os mesmos procedimentos e equipamentos de teste. Os resultados são então comparados para identificar quaisquer diferenças ou inconsistências no processo de teste. Metz (1987) destaca a importância da colaboração entre as instalações de teste e argumenta que o uso da metodologia de teste *Round-Robin* pode melhorar a precisão e confiabilidade dos testes de emissões, especialmente para emissões não regulamentadas, reduzindo a variabilidade e incerteza no processo de teste. O artigo fornece informações detalhadas sobre o design e implementação de um programa de teste *Round-Robin* para emissões não regulamentadas e apresenta os resultados dos testes, que sustentam a eficácia desta abordagem.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Ensaio do tipo Round-Robin

A Reprodutibilidade é a reprodução bem-sucedida dos dados originais em reanálises independentes, usando a mesma amostra ou abordagem analítica. O teste *Round-Robin* é uma metodologia experimental utilizada para determinar a reprodutibilidade de um processo no qual os testes são realizados várias vezes de forma independente. Os resultados são analisados estatisticamente para avaliar a variabilidade. No teste *Round-Robin*, diversos laboratórios testam amostras idênticas de um ou mais objetos de teste, com o objetivo de determinar a precisão de cada parâmetro relatado em um método de teste. Um teste *Round-Robin* é uma técnica de análise que utiliza algum método estatístico para avaliar um sistema de medição, como por exemplo a Análise de Variância (ANOVA, *ANalysis Of VAriance*).

Barbe et al (2008) destaca que ao utilizar a ANOVA em uma comparação Round-Robin, torna-se possível determinar se as medições realizadas por diferentes laboratórios são, do ponto

de vista estatístico, significativamente diferentes, indicando que as medições sofreram influência de alguma fonte. Isso ajuda a avaliar o desempenho e a precisão das medições e a identificar possíveis problemas ou discrepâncias. A aplicação da ANOVA oferece uma análise estatística robusta que permite uma avaliação objetiva da consistência e confiabilidade dos resultados obtidos em um estudo de comparação *Round-Robin*.

3.2 Análise de Variância

Um conceito essencial em testes de hipóteses é o valor p , este tem como objetivo avaliar a significância estatística de uma diferença ou associação observada entre grupos ou variáveis. Em testes de hipóteses, temos duas hipóteses mutuamente exclusivas: a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1). A hipótese nula afirma que não há efeito ou diferença significativa entre os grupos ou variáveis em estudo, e qualquer diferença observada é devido ao acaso. A hipótese alternativa, por outro lado, afirma que existe um efeito ou diferença significativa que não pode ser explicada pelo acaso. O valor p é calculado com base na diferença observada entre os grupos ou variáveis, bem como na variabilidade dos dados. Ele representa a probabilidade de obter um resultado tão extremo (ou mais extremo) do que o observado, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. Em outras palavras, o valor p indica a probabilidade de obter os dados observados, considerando que não há efeito real ou diferença entre os grupos. Quando o valor p é baixo (geralmente menor que 0,05), significa que a probabilidade de obter a diferença observada entre os grupos devido ao acaso é muito baixa. Nesse caso, temos evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula (H_0) e aceitar a hipótese alternativa (H_1), concluindo que existe uma diferença ou efeito significativo entre os grupos ou variáveis. Por outro lado, quando o valor p é alto (geralmente maior que 0,05), indica que a probabilidade de obter a diferença observada entre os grupos devido ao acaso é alta. Nesse cenário, não temos evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula (H_0), e não podemos afirmar que existe uma diferença ou efeito significativo.

O valor p , portanto, desempenha um papel crítico na interpretação dos resultados estatísticos. Ele nos permite tomar decisões informadas sobre a existência de diferenças ou efeitos significativos, fornecendo uma medida objetiva para avaliar a força das evidências em favor de alguma das hipóteses pré-estabelecidas. É importante lembrar que o valor p não nos diz a magnitude ou a relevância prática da diferença ou efeito observado; apenas indica se essa diferença é estatisticamente significativa ou não. Por isso, é fundamental interpretar o valor p em conjunto com outras informações relevantes, como o valor F de Fisher, para uma análise completa e coerente dos resultados estatísticos.

A Análise de Variância é uma técnica estatística utilizada para analisar a diferença entre as médias de três ou mais grupos ou populações. A fundamentação teórica da ANOVA envolve a decomposição da variabilidade total dos dados em componentes que representam a variação entre os grupos e a variação dentro dos grupos. Para aplicar a ANOVA de forma adequada, alguns pressupostos devem ser atendidos. O primeiro é a independência das observações, ou seja, as medições devem ser realizadas de forma independente e não devem estar relacionadas entre si. Além disso, os dados devem seguir uma distribuição normal, onde as médias de cada grupo são distribuídas de acordo com uma curva gaussiana. Outro pressuposto é a homogeneidade das variâncias, que significa que as variâncias dos grupos devem ser aproximadamente iguais.

Considere k grupos distintos, cada um com n observações. A ANOVA busca responder se existe uma diferença significativa entre as médias dos grupos. A hipótese nula afirma que não há diferença significativa, enquanto a hipótese alternativa sugere que pelo menos uma

média difere das demais. A decomposição da variabilidade total é realizada através da soma dos quadrados (SS) e dos graus de liberdade (df). A decomposição é expressa da seguinte forma:

$$SS_T = SS_B + SS_W, \quad (3.1)$$

onde:

- SS_T = é a soma dos quadrados total, que mede a variabilidade total dos dados;
- SS_B = é a soma dos quadrados entre os grupos, que mede a variabilidade entre as médias dos grupos;
- SS_W = é a soma dos quadrados dentro dos grupos, que mede a variabilidade dentro de cada grupo.

Os graus de liberdade associados a cada componente são definidos como:

- $df_T = kn-1$ é o número total de graus de liberdade;
- $df_B = k-1$ é o número de graus de liberdade entre os grupos;
- $df_W = kn-k$ é o número de graus de liberdade dentro dos grupos.

A estatística F é então calculada para testar a significância das diferenças entre as médias dos grupos:

$$F = MS_B/MS_W, \quad (3.2)$$

onde:

- MS_B é a média dos quadrados entre os grupos, calculada como $MS_B = SS_B/df_B$, sendo df_B os graus de liberdade associados a SS_B .
- MS_W é a média dos quadrados dentro dos grupos, calculada como $MS_W = SS_W/df_W$, sendo df_W os graus de liberdade associados a SS_W .

A estatística F segue uma distribuição F de Fisher com df_B e df_W graus de liberdade. Ao comparar o valor calculado de F com o valor crítico da distribuição F, é possível determinar se as diferenças entre as médias dos grupos são estatisticamente significativas.

Uma das principais vantagens da ANOVA é a capacidade de lidar com um grande número de grupos de maneira eficiente, em comparação com testes de comparação de pares individuais. Além disso, a ANOVA também permite realizar comparações múltiplas para identificar quais grupos diferem entre si, usando técnicas como o teste de *Tukey*.

3.3 Normas aplicadas a Bancadas de Testes de Motores à combustão

Dependendo do tipo de motor e tamanho há normas específicas que podem ser utilizadas pelas empresas quando estas não possuem uma própria. A Norma internacional ISO 15550 *Internal combustion engines – Determination and method for the measurement of engine power-General requirements*, apesar de ser específica para a medição da potência do motor, contém requerimentos referentes às medições de temperatura a serem tomadas. Por exemplo, para a medição da temperatura antes da entrada de mistura ar combustível no cilindro assim como na saída de exaustão (T_{ba} , T_{gcyl} e T_{g1}), recomenda-se uma incerteza de não mais que $\pm 25K$ ($\pm 25^\circ C$). Já para a medição da temperatura ambiente atmosférica no local de instalação do motor em um dado ponto (T_a), admite-se uma incerteza de não mais que $\pm 2K$ ($\pm 2^\circ C$). Para medição

da temperatura do combustível (T_1), a bancada deve fazê-lo com incerteza não maior que $\pm 5K$ ($\pm 5^\circ C$). Em todos estes casos, a condição de referência padrão é a da pressão barométrica total de $p_f=100$ kPa, a temperatura do ar de $T_r=298$ K ($25^\circ C$), umidade relativa de $\phi_r=30\%$.

3.4 Seleção de Termopares

Segundo Carnochan, Dickinson e Joiner (1986), um termopar é um dispositivo de medição de temperatura que utiliza o princípio do efeito termoelétrico. Ele consiste em dois metais diferentes. Quando a junta fria e a junta quente (contato de medição), estão expostas a diferentes temperaturas, ocorre o fenômeno do efeito termoelétrico. Isso resulta na geração de uma diferença de potencial elétrico, representada como ΔV . Essa diferença de potencial é uma medida direta da diferença de temperatura entre as junções T_1 e T_2 .

Logo, a operação de um termopar é baseada na geração de uma diferença de potencial elétrico ΔV devido à diferença de temperatura entre a junta fria e a junta quente, onde o Metal A e Metal B estão conectados. Essa diferença de potencial ΔV pode ser medida e usada para calcular a temperatura da junção quente (T_2) com base nas propriedades termoelétricas dos metais A e B.

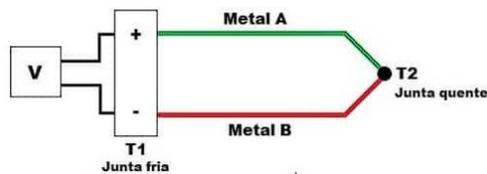


Figura 3.1 – Representação esquemática de um termopar.

Os termopares utilizados neste trabalho são do tipo J. A relação entre a diferença de temperatura (ΔT) e a diferença de potencial (ΔV) para um termopar tipo J pode ser aproximada usando a seguinte equação

$$\Delta V = \alpha \times \Delta T , \quad (3.3)$$

onde:

- ΔV é a diferença de potencial medida em volts (V).
- α é o coeficiente de Seebeck do termopar tipo J em volts por grau Celsius ($V/^\circ C$).
- ΔT é a diferença de temperatura entre as junções de medição e referência em graus Celsius ($^\circ C$).

4 METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados os procedimentos adotados para a validação da bancada de testes térmicos (Figura 4.1) para ferramentas portáteis a combustão interna, abrangendo a escolha da máquina para teste, o ciclo operacional de teste e descrição dos parâmetros neste estudo comparativo *Round-Robin*. A bancada de testes é equipada com um sistema de exaustão HVAC, esta exaustão é ligada à uma central de monitoramento que ajusta automaticamente a exaustão e o insuflamento da cabine de acordo com a temperatura ambiente e concentração de gases nocivos. A instrumentação da máquina é conectada a uma torre de aquisição de dados

com um software não-comercial específico da empresa para realização das leituras em tempo real dos termopares e das condições de operação do motor.

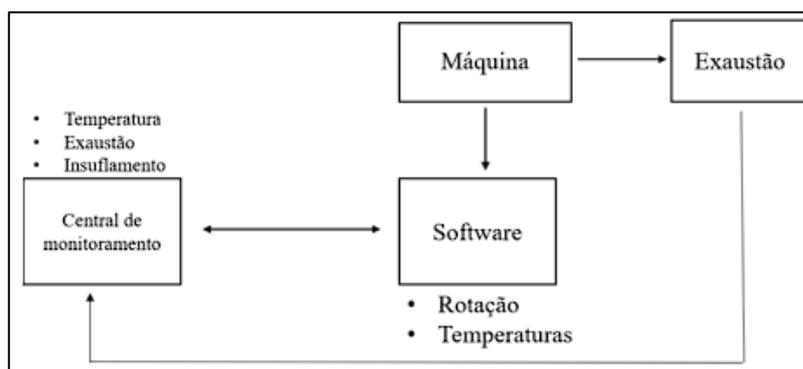


Figura 4.1 – Representação esquemática da bancada de testes.

A primeira rodada do teste *Round-Robin* foi realizado na Alemanha. Lá, a máquina foi instrumentada com termopares em pontos estratégicos, que serão descritos neste capítulo. Após esta primeira rodada do *Round-Robin*, a mesma máquina instrumentada e os mesmos equipamentos de medição foram enviados ao Brasil para instalação, comissionamento e realização da segunda rodada do teste *Round-Robin*.

4.1 Máquina para teste

A ferramenta portátil selecionada para ser o objeto de teste foi uma roçadeira. Esta utiliza um modelo de motor à combustão interna monocilíndrico do ciclo Otto de dois-tempos. A Tabela 4.1 apresenta detalhadamente as especificações do motor.

Tabela 4.1 – Especificações técnicas e de operação do motor utilizado neste estudo.

Tipo de ciclo	Otto de dois-tempos
Sistema de alimentação	Carburador
Sistema de ignição	Centelha
Diâmetro do cilindro	44 mm
Temperatura da vela de ignição	195 +/- 10 °C
Lubrificação	Mistura óleo-combustível na proporção 1:50
Rotação de alta	9500 rpm
Rotação de lenta	2800 rpm

4.2 Ciclo de teste

A escolha do ciclo de teste é fundamental para avaliar termicamente as ferramentas portáteis a combustão interna, por isso, a mesma máquina será submetida a sua rotação máxima nominal. Essa configuração representa o uso em situações de alta exigência. O ciclo de teste também abrangerá um breve espaço de tempo após o desligamento da máquina, afim de se avaliar o comportamento térmico pós aquecimento. Nos primeiros 200 segundos de teste o processo de aceleração da máquina será manual, ou seja, a rotação será variável pois em baixas

temperaturas ocorre instabilidade para manter a rotação máxima. No entanto, de 200 segundos até 1230 segundos, a máquina será mantida em sua rotação máxima de 9500rpm. Aos 1230 segundos a máquina é desligada e serão coletados dados por mais 70 segundos, totalizando os 1300 segundos do ciclo de teste. A Tabela 4.2 contém organização do ciclo de teste:

Tabela 4.2 – Ciclo de teste e frequência de medições.

Passos	Rpm	Período [s]	Frequência Medição Temperaturas [s]
Aceleração	Variável	0-200	0,2
Aquecimento	9500	201-1230	0,2
Resfriamento	0	1231-1300	0,2

4.3 Posicionamento dos termopares

Termopar da vela de ignição T_K (Figura 4.2). A vela é uma parte essencial do sistema de ignição, e a temperatura nela reflete diretamente a eficácia da queima do combustível. Monitorar essa temperatura ajuda a identificar problemas de mistura ar/combustível, detonação precoce ou excesso de calor.

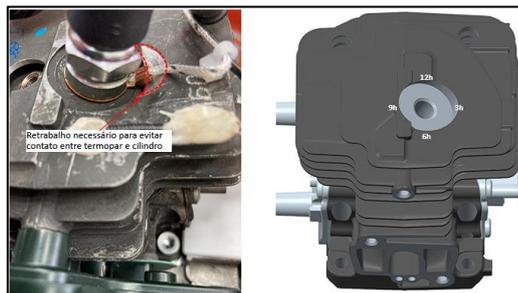


Figura 4.2 – Localização do termopar da vela de ignição.

Os termopares da câmara de combustão são termopares com objetivo de se ter um mapeamento das temperaturas em pontos estratégicos da câmara de combustão, sendo estes pontos: topo do cilindro T_ZY_DA (Figura 4.3); os quatro lados da pista de deslizamento do cilindro como o lado onde esta localizado o volante aletado do motor T_ZY_RU_AN; lado oposto ao volante T_ZY_RU_AB; lado da admissão T_ZY_RU_EI; lado do escape T_ZY_RU_AU (Figura 4.4b) e o termopar de engripamento T_ZY_FR (Figura 4.5).

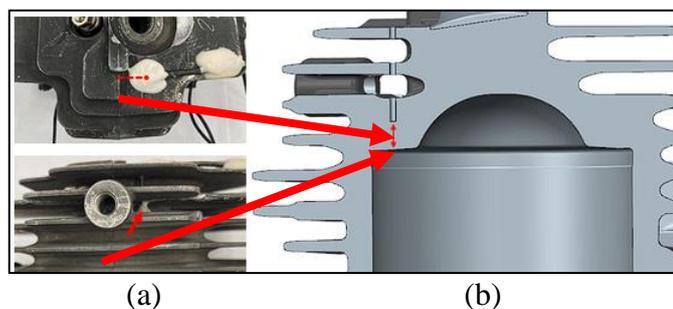


Figura 4.3 – Localização do termopar do topo do cilindro.
(a) Vistas lateral e superior (b) Detalhe do posicionamento vertical em corte.

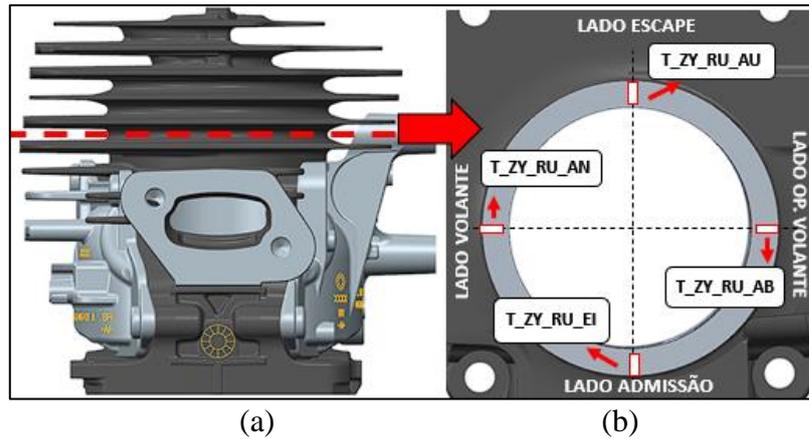


Figura 4.4 - Localização dos termopares da pista de deslize.
(a) Vista lateral. (b) Vista superior em corte.

O termopar de engripamento T_{ZY_FR} (Figura 4.5) é um termopar essencial para se ter uma leitura de temperatura no ponto onde comumente ocorre o engripamento nos motores de roçadeiras. Este ponto fica localizado perto da janela de escape (Figura 4.5b) no lado contrário ao do volante aletado do motor, pois é o lado com maior concentração de calor.

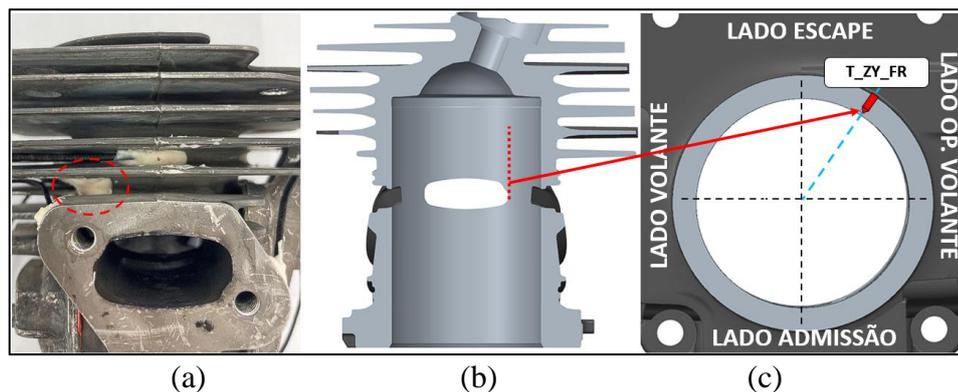


Figura 4.5 – Localização do termopar de engripamento.
(a) Vista lateral. (b) Detalhe posicionamento vertical ao lado da janela de escape. (c) Detalhe vista superior em corte

Termopares no cilindro, localizados nos parafusos de fixação do escape (Figura 4.6), lado do volante $T_{ZY_SD_AN}$ e lado oposto ao volante $T_{ZY_SD_AB}$. Os parafusos desempenham um papel crucial na fixação de componentes e no funcionamento adequado do sistema. No entanto, quando expostos a altas temperaturas, esses parafusos podem sofrer dilatação, corrosão, enfraquecimento ou até mesmo falhas estruturais, comprometendo a integridade e segurança do equipamento.

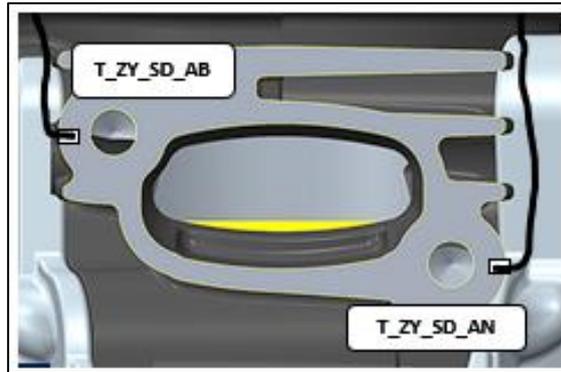


Figura 4.6 - Localização dos termopares de parafusos do escape.

Termopares do cárter, como o do rolamento do cárter lado volante T_KG_LS_AN, rolamento do cárter lado oposto ao volante T_KG_LS_AB (Figura 4.7a) e do parafuso do silenciador no cárter T_KG_UN (Figura 4.7b). No motor dois tempos, o cárter é responsável por realizar o processo de compressão e admissão de mistura ar-combustível para o cilindro, bem como o resfriamento do pistão. Monitorar a temperatura do cárter é essencial para garantir o correto funcionamento do motor, pois uma temperatura inadequada pode levar a diversos problemas. Se a temperatura estiver muito alta, pode ocorrer vaporização prematura da mistura ar-combustível no cárter, resultando em uma lubrificação inadequada das partes móveis do motor, como o pistão e o virabrequim. Isso pode causar desgaste excessivo e danos aos componentes internos do motor. Por outro lado, se a temperatura do cárter estiver muito baixa, a viscosidade do óleo lubrificante pode aumentar, dificultando a circulação do óleo e causando atrito excessivo entre as peças móveis, o que também pode levar a desgaste prematuro e danos.

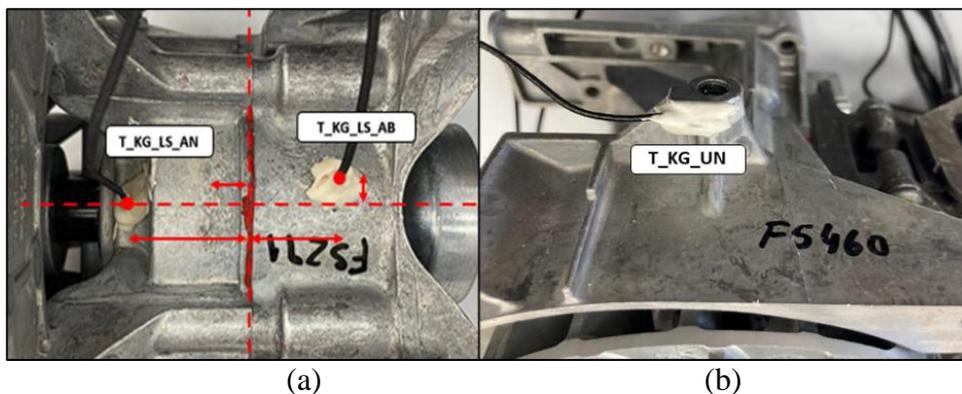


Figura 4.7 - Localização dos termopares do cárter.
(a) Lado volante e lado oposto ao volante. (b) De parafuso.

O termopar do carburador T_VG_DS (Figura 4.8) serve para monitorar a temperatura da mistura ar/combustível em diferentes condições de operação. Em temperaturas além da ideal para a operação do carburador, bolhas de ar podem se formar nos canais injetores de combustível, obstruindo sua passagem para o tubo de Venturi e afetando o funcionamento da máquina, seja por ocasionar uma mistura muito pobre, apagando o motor, ou causando vibrações devido ao fornecimento irregular de combustível. Por outro lado, uma temperatura muito baixa dificulta a solubilização da mistura ar-combustível e resulta em dificuldades para dar partida na máquina, aumentando o número de puxadas para que o motor ligue.

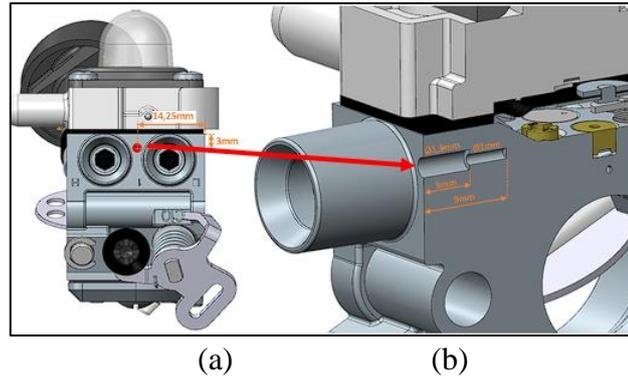


Figura 4.8 – Localização do termopar do carburador.
 (a) Vistas frontal (b) Detalhe do posicionamento lateral em corte.

Termopares para avaliação térmica do ar de entrada e saída, o de entorno da máquina T_KL_AL (Figura 4.9a), que fica localizado à 15cm da entrada do filtro de ar, termopar do filtro de ar T_KL_SR (Figura 4.9b) e o termopar da saída de ar espiral T_KL_LU (Figura 4.9c). Estes termopares são importantes pois se, por exemplo, a temperatura próxima à entrada do filtro de ar estiver muito alta, isto afeta a densidade do ar, a quantidade de oxigênio disponível para a combustão e, conseqüentemente, a eficiência do motor. Já o termopar de saída é importante para o segurança do operador da máquina.

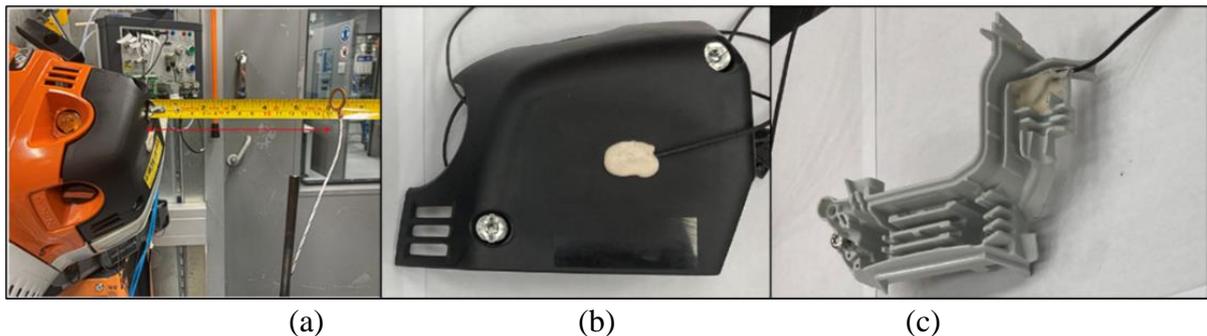


Figura 4.9 – Localização dos termopares de avaliação térmica do ar.
 (a) De entorno. (b) De entrada do filtro de ar. (c) De saída do ar.

4.4 ANOVA

4.4.1 Tamanho amostral

A alta frequência na aquisição de dados (a cada 0,2s), em um intervalo de medição de 1300s, tem como consequência uma amostra de tamanho $n=6500$. Ocorre que, segundo Sullivan et al (2012), em uma amostra suficientemente grande, um teste estatístico quase sempre demonstrará uma diferença estatisticamente significativa (valor $p < 0,05$), a menos que não haja efeito algum, ou seja, quando o tamanho do efeito entre amostras for exatamente zero. Diferenças muito pequenas, mesmo que significativas estatisticamente, muitas vezes não têm sentido real na análise que está sendo realizada. Por exemplo, se o tamanho da amostra for 10000, é provável que um valor p significativo estatisticamente ($< 0,05$) seja encontrado, fazendo com que o valor p direcione o pesquisador a interpretação equivocada do seu experimento quando na realidade a diferença estatística significativa encontrada no resultado entre os grupos pode não ter sentido real e prático. Assim, os valores de p podem ser considerados inconclusivos a depender do tamanho da amostra. Nos casos como o deste estudo,

cuja amostra tem tamanho $n=6500$, um resultado de valor p estatisticamente significativo significaria apenas que uma amostra de tamanho muito grande foi utilizada. Desta forma, para evitar que ANOVA resulte em uma avaliação equivocada dos resultados, foi realizado um tratamento dos dados onde foram consideradas as medições de temperatura a cada 5 segundos, reduzindo o tamanho da amostra para $n=260$, mantendo um tamanho amostral ainda robusto para aplicação da ANOVA (GLASS, 1972).

4.4.2 Pressupostos para aplicação da ANOVA

Para aplicar a ANOVA de forma adequada, alguns pressupostos devem ser atendidos. O primeiro é a independência das observações, ou seja, as medições devem ser realizadas de forma independente e não devem estar relacionadas entre si. Além disso, os dados devem seguir uma distribuição normal, onde as médias de cada grupo são distribuídas de acordo com uma curva gaussiana. Outro pressuposto é a homogeneidade das variâncias, que significa que as variâncias dos grupos devem ser aproximadamente iguais. Caso esses pressupostos não sejam atendidos, pode ser necessário realizar transformações nos dados ou utilizar técnicas alternativas, como ANOVA não-paramétrica. A verificação de pressupostos será realizada com o auxílio do software de análises estatísticas JAMOVI.

5 RESULTADOS

5.1 Ciclo de teste real

O gráfico da Figura 5.1 apresenta o ciclo real realizado na Alemanha e no Brasil. Como nos primeiros 200 segundos de teste o processo de aceleração da máquina é manual, é percebido no gráfico a ocorrência de uma instabilidade de forma mais acentuada na Alemanha. No entanto, de 200 segundos até 1230 segundos, em ambos testes Alemanha e Brasil a máquina manteve sua rotação máxima de 9500rpm de forma estável. Aos 1230 segundos a máquina foi desligada e foram coletados dados por mais 70 segundos, totalizando os 1300 segundos do ciclo de teste previsto.

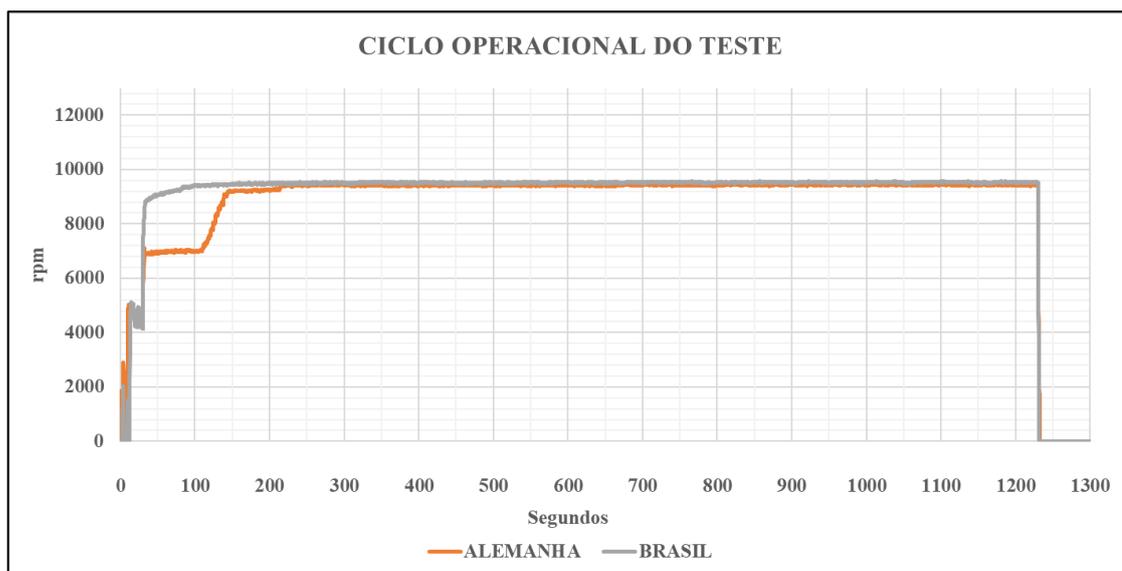


Figura 5.1 - Ciclo real Alemanha e Brasil. Gráfico rpm x tempo transcorrido do teste.

5.2 Verificação de pressupostos da ANOVA

A verificação de pressupostos foi realizada com o auxílio do software de análises estatísticas JAMOV, versão 2.3.28. A Tabela 5.1 apresenta o teste à normalidade dos dados.

Tabela 5.1 – Teste à Normalidade dos dados.

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)			
Nomenclatura	p	Nomenclatura	p
T_K	<0,001	T_ZY_SD_AB	<0,001
T_ZY_DA	<0,001	T_KG_LS_AN	<0,001
T_ZY_RU_AN	<0,001	T_KG_LS_AB	<0,001
T_ZY_RU_AB	<0,001	T_KG_UN	<0,001
T_ZY_RU_EI	<0,001	T_VG_DS	<0,001
T_ZY_RU_AU	<0,001	T_KL_AL	<0,001
T_ZY_FR	<0,001	T_KL_SR	<0,001
T_ZY_SD_AN	<0,001	T_KL_LU	<0,001

Nota: Um valor- $p < 0,05$ sugere a violação do pressuposto da Normalidade dos dados.

Os resultados sugerem que os dados não estão distribuídos normalmente, o que aumenta a chance de um resultado falso positivo (ou seja, que há diferenças significativas entre as médias dos testes) ao se analisar os dados com uma ANOVA ou outro teste que supõe normalidade. Felizmente, a ANOVA é pouco sensível a desvios da normalidade. Estudos de simulação, usando uma variedade de distribuições não normais, mostraram que a taxa de falsos positivos não é muito afetada por essa violação da suposição (Glass et al. 1972, Harwell et al. 1992, Lix et al. 1996) quando se obtém um grande número de amostras aleatórias ($n > 200$) de uma população, as médias dessas amostras são aproximadamente distribuídas normalmente, mesmo quando a população não é normal. Desta forma, mesmo com a distribuição dos dados de temperatura não seguindo uma distribuição normal, o tamanho da amostra deste estudo ($n = 260$) torna a ANOVA robusta o suficiente para não ser sensível à esta não normalidade. A seguir, na Tabela 5.2 é apresentado o teste à Homogeneidade de Variâncias dos dados.

Tabela 5.2 – Teste à Homogeneidade de Variâncias dos dados.

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)			
Nomenclatura	p	Nomenclatura	p
T_K	0,998	T_ZY_SD_AB	0,954
T_ZY_DA	0,996	T_KG_LS_AN	0,074
T_ZY_RU_AN	0,942	T_KG_LS_AB	0,174
T_ZY_RU_AB	0,967	T_KG_UN	0,120
T_ZY_RU_EI	0,983	T_VG_DS	<0,001
T_ZY_RU_AU	0,789	T_KL_AL	0,270
T_ZY_FR	0,793	T_KL_SR	0,013
T_ZY_SD_AN	0,919	T_KL_LU	0,031

Nota: Um valor- $p < 0,05$ sugere a violação do pressuposto da Homogeneidade de Variâncias.

O resultado do teste de Levene para variâncias iguais demonstra que a maior parte dos valor- p encontrados foram maiores que 0,05. Para estes casos, é aceita a hipótese nula H_0 : "as variâncias são iguais", conclui-se então que a suposição de variâncias iguais (ou quadrado do desvios padrão) não é violada. Para os casos onde o valor- $p < 0,05$ (T_VG_DS, T_KL_SR e T_KL_LU) para validação ou não destas medições, será necessário outro tipo de análise.

5.3 Resultados do teste ANOVA

Os resultados da ANOVA foram obtidos com o auxílio do software de análises estatísticas JAMOVI, versão 2.3.28. A Tabela 5.3 apresenta o teste ANOVA a um fator.

Tabela 5.3 – Teste ANOVA a um fator.

Teste ANOVA a um fator					
Termopares			ANOVA		
Localização Geral	Localização Específica	Nomenclatura	p	F	F -crítico
Cilindro	Vela de Ignição	T_K	0,092	2,842	3,860
Cilindro	Topo do Cilindro	T_ZY_DA	0,060	3,564	3,860
Cilindro	Lado Volante	T_ZY_RU_AN	0,116	2,476	3,860
Cilindro	Lado Saida de Ar	T_ZY_RU_AB	0,150	2,074	3,860
Cilindro	Lado Admissão	T_ZY_RU_EI	0,077	3,148	3,860
Cilindro	Lado Escape	T_ZY_RU_AU	0,089	2,910	3,860
Cilindro	Engripamento	T_ZY_FR	0,137	2,223	3,860
Cilindro	Paraf. Silenciador Lado Volante	T_ZY_SD_AN	0,399	0,711	3,860
Cilindro	Paraf. Silenciador Lado Op. Volante	T_ZY_SD_AB	0,674	0,177	3,860
Cárter	Lado Volante	T_KG_LS_AN	0,291	1,116	3,860
Cárter	Lado Oposto Volante	T_KG_LS_AB	0,063	3,463	3,860
Cárter	Parafuso Silenciador	T_KG_UN	0,129	2,313	3,860
Carburador	Entre parafusos H/L	T_VG_DS	<0,001	29,188	3,860
Entorno	A 15cm da Entrada de Ar	T_KL_AL	0,132	2,277	3,860
Tampa Filtro Ar	Entrada de Ar	T_KL_SR	0,009	6,811	3,860
Espiral	Espiral Escoamento Ar	T_KL_LU	0,024	5,094	3,860

Nota. Um valor- $p < 0,05$ sugere a violação da H_0 : Todas as médias do grupo são iguais.

Para todos os valor- $p > 0,05$, aceita-se a hipótese nula H_0 . Isso significa que a variação entre as médias amostrais não é alta o suficiente em relação à variação dentro das amostras para rejeitar H_0 . Em outras palavras, isso representa que não há evidências suficientes para dizer que a mudança de local da bancada de testes térmicos causou diferenças estatisticamente significativas nas médias das medições de temperaturas. O resultado de uma ANOVA também nos dá o valor estatístico de F , a variância entre os dois grupos. Para saber se o resultado analisado é significativo (isto é, se a probabilidade valor- p tiver um valor inferior a 0,05), o valor de " F " precisa ser pelo menos F -crítico (3,860). Então, para os casos em que o valor- $p < 0,05$ e $F > 3,860$ (T_VG_DS, T_KL_SR e T_KL_LU) para validação ou não destas medições, será necessária uma análise diferente, já que as diferenças das médias de temperatura são estatisticamente significativas. Para estes resultados, será realizada uma análise descritiva. A Tabela 5.4 mostra os valores de média e desvio-padrão, calcula a maior distância entre os

valores e traça uma comparação com as incertezas utilizando como base a Norma internacional ISO 15550 *Internal combustion engines – Determination and method for the measurement of engine power-General requirements*, já mencionada anteriormente neste trabalho. Todos os valores da tabela estão em graus Celsius.

Tabela 5.4 – Tabela de resultados descritivos.

Resultados descritivos [°C]								
Nomenclatura (A)	Média		Desvio-padrão		Maior Valor (F)	Menor Valor (G)	Maior Distância (H)	ISO 15550 (I)
	Alemanha (B)	Brasil (C)	Alemanha (D)	Brasil (E)				
							H=F-G	
T_VG_DS	24,890	26,007	2,740	2,010	C+E= 28,017	B-D= 22,150	5,866	±5
T_KL_SR	28,083	28,411	1,560	1,330	C+E= 29,741	B-D= 26,523	3,218	±25
T_KL_LU	45,872	46,905	5,880	4,760	B+D= 51,752	B-D= 39,992	11,760	±25

A definição da norma que mais se aproxima da temperatura do carburador T_VG_DS é a medição da temperatura de combustível, onde a norma estabelece que a bancada deve fazê-lo com incerteza não maior que $\pm 5^\circ\text{C}$. Assim, embora para a temperatura do carburador T_VG_DS se obteve uma distância possível de $5,866^\circ\text{C}$, podemos considerar o resultado satisfatório para a bancada deste estudo apesar de não existir uma norma específica para esta bancada. Pode-se realizar a mesma análise para T_KL_SR e T_KL_LU, (temperaturas na entrada do filtro e ar e na saída espiral de escoamento de ar) onde a norma recomenda uma incerteza de não mais que $\pm 25^\circ\text{C}$, valor maior do que a maior distância percebida tanto para T_KL_SR ($3,218^\circ\text{C}$) quanto para T_KL_LU ($11,760^\circ\text{C}$), conforme a tabela 5.4.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir dos ensaios do tipo *Round-Robin* demonstraram uma reprodução bem-sucedida dos resultados originais do ponto de vista de significância estatística, utilizando a ANOVA para comparação das médias. Isso simboliza que a bancada de testes continua capaz de medir variações de temperatura em vários locais do motor e da ferramenta com alta precisão e confiabilidade mesmo após testes iniciais da Alemanha, sua desmontagem, traslado e remontagem dos equipamentos no Brasil.

Para os resultados onde a ANOVA apontou uma diferença estatística significativa entre as médias, foi realizado de forma alternativa uma análise descritiva. Esta análise possibilitou a comparação com valores estabelecidos em norma ISO internacional similar e, desta forma, pode-se concluir que a bancada de testes térmicos para ferramentas portáteis a combustão interna foi validada com sucesso em sua totalidade em seu novo ambiente, o Brasil. Propõe-se a utilização do método para futuras análises de resultados de bancadas de teste que não somente térmicas e que não somente em casos de validação de uma bancada.

Ao realizar leituras de temperaturas em estudos subsequentes, recomenda-se a definição prévia de níveis de incerteza ou faixas de valores aceitáveis específicos para a ferramenta portátil em análise. Isto com o objetivo de que se faça não somente uma comparação estatística entre médias, mas também uma ponderação descritiva, objetiva e lógica dos valores medidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbe, K.; Van Moer, W.; Rolain, Y. **“Using ANOVA in a Microwave Round-Robin Comparison”**. In: 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Victoria, BC, Canada, 2008. p. 44-48. DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547001.

Brogueira, H. C. P. S. **“Design of a Test Bench for Micro Combustion Engines”**. Dissertation in Master in Science in Mechanical Engineering. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, June, 2016.

Carnochan, P.; Dickinson, R. J.; Joiner, M. C. **“The practical use of thermocouples for temperature measurement in clinical hyperthermia”**. International Journal of Hyperthermia, v. 2, n. 1, p. 1-19, 1986. DOI: 10.3109/02656738609019990.

Franco, A., & Martorano, L. (1998). **“Evaluations on the Heat Transfer in the Small Two-stroke Engines”**. SAE Technical Paper Series, doi: 10.4271/980762.

Friedrich, C., Compera, Y., Auer, M., Stiesch, G.; Wachtmeister, G. **“An Efficient Test Methodology for Combustion Engine Testing: Methods for Increasing Measurement Quality and Validity at the Engine Test Bench”**. SAE Technical Paper 2017-01-0604, 2017, doi:10.4271/2017-01-0604.

Glass, G. V.; Peckham, P. D.; Sanders, J. R. **“Consequences of Failure to Meet Assumptions Underlying the Fixed Effects Analyses of Variance and Covariance. Review of Educational Research”**, v. 42, n. 3, p. 237–288, set. 1972.

Harwell, M. R. Et al. **“Summarizing Monte Carlo Results in Methodological Research: The One- and Two-Factor Fixed Effects ANOVA Cases”**. Journal of Educational Statistics, v. 17, n. 4, p. 315–339, dez. 1992.

International Standard Organization. **ISO 1550 – Internal combustion engines – Determination and method for the measurement of engine power – General requirements**. Switzerland. 46p., 2002.

Lix, L. M.; Keselman, J. C.; Keselman, H. J. **“Consequences of Assumption Violations Revisited: A Quantitative Review of Alternatives to the One-Way Analysis of Variance F Test”**. Review of Educational Research, v. 66, n. 4, p. 579–619, dez. 1996.

Metz, N. **“Round Robin Testing for Selected Unregulated Exhaust Emissions.”** SAE Transactions, v. 96, p. 1251-1263, 1987. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/44472889>. Acesso em: 9 maio 2023.

R Core Team (2021). **R: A Language and environment for statistical computing**. (Version 4.1) [Computer software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org>. (R packages retrieved from MRAN snapshot 2022-01-01).

Sullivan, G. M.; Feinn, R. **“Using effect size—or why the P value is not enough”**. Journal of Graduate Medical Education, v. 4, n. 3, p. 279–282, set. 2012.

The Jamovi Project. **Jamovi (Version 2.3)** [Software de Computador]. 2022. Disponível em: <https://www.jamovi.org>.