

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE ATÉ 6 CV

Fabricio Hamud Fregonese, fabriciofregonese@gmail.com¹
Stephan Hennings Och, stephan.och@ufpr.br¹

¹ UFPR, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba - PR, 81530-000.

Resumo. Este artigo apresenta um projeto de um banco de ensaios de motores de combustão interna de até 6 cv utilizando um dinamômetro de Correntes de Foucault e um motor de 3,5 cv de potência. Entre os objetivos estão: a implementação do controle de rotação, a realização de testes de desempenho, a comparação dos resultados destes com os mesmos fornecidos pelo fabricante do motor e a avaliação de incertezas no processo de medição. O controle de rotação implementado foi eletrônico, usando um sensor indutivo e um microcontrolador e a medição do torque, analógica, em um mostrador escalonado em quilograma-força-metro. Com os valores dessas duas grandezas calcula-se a potência. Os testes decorreram com o motor à plena carga, reduzindo sua rotação e anotando o torque a cada ponto. Depois de 3 testes realizados nas mesmas condições, foram traçados gráficos de torque e potência do motor e comparados com os mesmos fornecidos pelo fabricante. No resultado, as curvas médias dos testes pouco se desviaram das curvas de referência, que ficaram compreendidas dentro da faixa de incerteza estimada na maior parte dos pontos medidos.

Palavras chave: Bancada de testes. Dinamômetro. Torque. Controle. Potência.

Abstract. This article presents a project of a test bench for internal combustion engines of up to 6 hp using an Eddy Current dynamometer and a 3,5 hp engine. Among the objectives are: the implementation of speed control, the performance of performance tests, the comparison of their results with those provided by the engine manufacturer and the evaluation of uncertainties in the measurement process. The speed control implemented was electronic, using an inductive sensor and a microcontroller and the torque measurement, analogic, on a dial staggered in kilogram-force-meter. With the values of these two quantities, power is calculated. The tests were carried out with the engine at full load, reducing its rotation and recording the torque at each point. After 3 tests performed under the same conditions, graphs of engine torque and engine power were plotted, with the uncertainty values, which were compared with the same provided by the manufacturer. In the result, the average curves of the tests little deviated from the reference curves, which were located within the range of uncertainty estimated in most of the measured points.

Keywords: Test bench. Dynamometer. Curve. Torque. Power.

1. INTRODUÇÃO

As máquinas térmicas, ou no caso os motores de combustão interna (MCI) são amplamente utilizados no cotidiano de todo ser humano para obter trabalho mecânico a partir da queima de um combustível (Brunetti, 2012), seja para o transporte, geração de energia, indústria, entre outros. Força motriz de máquinas estacionárias e móveis, o seu uso se deve à aspectos como o conhecimento envolvido em sua manutenção, a ampla disponibilidade de combustíveis e ao uso em larga escala em países emergentes, onde não há previsão da substituição completa desses motores por elétricos (Grande, 2018).

As montadoras automotivas são responsáveis pelo processo de produção de seus veículos e motores, assim como qualidade e segurança além de fornecer junto ao seu produto especificações como consumo, potência e torque máximo. Essas informações, embora possam serem estimadas por cálculos, tem seus valores exatos verificados por meio de um ou mais tipos de testes ou ensaios, feitos em bancadas ou células de testes. Esses testes são chamados de ensaios dinamométricos, onde os MCI são acoplados à máquina de medição capaz de mensurar alguns dos valores necessários para a validação dos motores, como o torque por exemplo. Essa máquina de medição é o dinamômetro. De tamanhos e potências variadas, cada dinamômetro opera com um limite de potência e rotação, assim como o motor, e ambos devem estar na mesma faixa de operação para que os testes sejam bem-sucedidos. O conjunto MCI-dinamômetro, por sua vez, opera fixo em uma bancada de testes, onde as máquinas são acopladas e alinhadas. A bancada também tem a função de absorver as vibrações do sistema. E é a respeito desse conjunto, essencialmente a bancada, que o presente trabalho tratará.

1.1. Justificativa

Havia no laboratório de máquinas hidráulicas da UFPR um antigo dinamômetro de Correntes de Foucault, que estava fora de funcionamento há muitos anos. Esse equipamento de ensaios, devidamente instalado e funcionando, teria potencial de trazer para a Universidade, alunos e professores, muitos benefícios. Entre eles estão o desenvolvimento profissional dos graduandos e a ampliação do conhecimento por meio da pesquisa científica. Também existe um aspecto motivacional envolvido, pois quando se pode ter acesso à prática do conhecimento teórico adquirido no curso, observa-se maior engajamento por parte dos alunos (Stern, et al., 2019). Sendo assim o projeto visou disponibilizar para benefício dos próprios alunos e professores do curso de Engenharia Mecânica da UFPR, um dinamômetro operante capaz de medir ao menos as grandezas de características de um motor em teste: rotação, torque e potência. De todo modo, os objetivos deste projeto foram: construir uma bancada de ensaios de motores, implementar um controle de rotação no dinamômetro, utilizar o dinamômetro e o motor disponíveis para realizar testes de desempenho, a partir dos testes traçar as curvas de torque e potência do motor, avaliar as incertezas de medição e comparar as curvas traçadas com as fornecidas pelo fabricante do motor.

2. METODOLOGIA

A máquina de medição utilizada foi o dinamômetro alemão de 1959, do tipo de Correntes de Foucault, da marca *Zöllner*, modelo *Elektric Brake Typ 1*, que funciona segundo o princípio de indução eletromagnética. Os eixos do motor e do dinamômetro são acoplados e giram na mesma velocidade angular, o dinamômetro é responsável pelo controle da rotação, ou seja, pela frenagem através da dissipação de energia, para que seja possível a leitura do torque. Nos dinamômetros desse tipo, dentro da carcaça dos mesmos o eixo conta com um disco metálico maciço, nele acoplado. Quando esse disco gira, o movimento relativo entre ele e o campo magnético (Souza, 2005) criado pela passagem de correntes em bobinas que o circundam, faz com que sejam induzidas correntes parasitas, ou correntes de Foucault, no disco. A frenagem se dá por dissipação de calor (efeito Joule) das correntes parasitas no disco. Por isso o equipamento conta com um sistema de refrigeração à água para dissipar o calor gerado durante a absorção de energia transmitida para o dinamômetro.

O objeto de teste utilizado foi o motor monocilíndrico, concedido pela fabricante Branco® proprietária da marca do mesmo Briggs&Stratton, de 3,5 cv, 4 tempos, carburado, modelo 0831 32 0005 H1. Ele trabalha apenas com gasolina como combustível. O torque máximo, segundo o manual do fabricante é de 7,5 Nm e a rotação máxima oscila entre 5500 e 6000 rpm.

A bancada foi primeiramente projetada com o auxílio do *software CAD SolidWorks® 2018* e depois montada fisicamente. O projeto foi pensado para que fosse possível a regulagem de distância entre motor e dinamômetro nos dois eixos horizontais perpendiculares entre si, denominados de X e Y, o eixo Z representa a altura. Para isso o dinamômetro ficaria fixo e a posição do MCI seria ajustável. Então duas barras, denominadas “Trilhos Base Longitudinais”, indicadas em azul na Figura 1, que estariam paralelamente ao eixo do motor e do dinamômetro fariam a ligação entre o dinamômetro e os “Trilhos Base Transversais”, indicado em amarelo também na Figura 1 abaixo. Os Trilhos Base Transversais, por sua vez, têm a função de conectar o motor aos Trilhos Base Longitudinais.

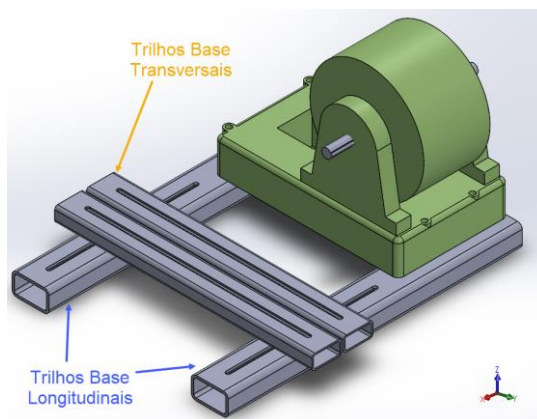


Figura 1: Base da bancada – Desenho 3D (Autor próprio, 2019)

Ambos os trilhos são barras de aço de perfil retangular, com rasgos ao longo de suas superfícies com o intuito de dar à estrutura liberdade de movimentação nos eixos X e Y, permitindo à bancada a característica de ser adaptável à mais de um motor diferente, visto que a fixação do MCI, nos Trilhos Base Transversais, pode ser feita mais próximas ou mais distantes do dinamômetro, e o motor pode ficar mais à esquerda ou à direita. Esta característica foi um dos principais

parâmetros de projeto da bancada, Além da adaptabilidade, outra característica positiva importante a ser ressaltada é que o alinhamento (entre eixo do motor de combustão interna a ser testado e do eixo do dinamômetro) fica facilitado devido aos Trilhos Base Longitudinais serem solidários ao motor e ao dinamômetro. Não existe regulagem para a altura e esta deve ser feita com calços de qualquer espécie de acordo com o motor utilizado.

Visto que o motor a ser ensaiado será um motor monocilíndrico, há naturalmente muita vibração envolvida pelo fato de se tratar de um número ímpar de cilindros. Para atenuar a vibração transmitida do mesmo para o sistema bancada-dinamômetro, foram utilizados coxins entre o MCI e a bancada.

O acoplamento entre os eixos do dinamômetro e do motor foi feito através de dois pares de juntas universais e duas cruzetas de aço, similar ao sistema de transmissão de um cardan automotivo. Porém o eixo responsável por ligar os pares de juntas universais precisou ser projetado especialmente para a aplicação, devido a pouco espaço longitudinal. Esse eixo foi usinado a partir uma barra de $\frac{3}{4}$ " de largura, de aço carbono 1040. O produto final conta com dois rasgos de chaveta de 15 mm de comprimento e 4 de largura, conforme o rasgo de chaveta já usinado nas juntas compradas, em ambos os lados, dois furos roscados (M8) ao centro das faces nas extremidades, chanfros de 1 mm nas extremidades, para auxiliar na montagem e seu comprimento total de 94 mm. A Figura 2 ilustra o descrito anteriormente e o acoplamento já montado.



Figura 2: Acoplamento com juntas universais, cruzetas e eixo projetado sob medida (Autor próprio, 2020)

É importante lembrar que foi calculado o coeficiente de segurança (C_s) do eixo fabricado. A Equação (1), que define C_s (Norton, 2013), divide a resistência ao cisalhamento do material (σ_{cr}) pela tensão máxima de torção ($\sigma_{Tm\acute{a}x}$) para obter C_s .

$$C_s = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{Tm\acute{a}x}} \quad (1)$$

A tensão máxima de torção, é obtida através da Eq. (2), onde “ T ” é torque, “ c ” é raio e “ J ” é o momento de inércia polar de um círculo (Norton, 2013), calculado pela Eq. (3).

$$\sigma_{Tm\acute{a}x} = \frac{T \cdot c}{J} \quad (2)$$

$$J = \frac{\pi \cdot c^4}{2} \quad (3)$$

Para base dos cálculos e obtenção de “ J ” o valor de “ c ” usado foi o diâmetro do eixo em metros, dividido por 2. Na sequência, para obtenção da tensão máxima de torção, utilizou-se o valor de torque máximo entregue pelo motor, segundo o manual de instrução e operação do mesmo: 7,5 Nm. O valor de $\sigma_{Tm\acute{a}x}$ obtido foi de 5,525 MPa. Por fim, a resistência ao cisalhamento do material, segundo Gustavo (2019), em geral equivale de 0,6 a 0,8 do valor da resistência à tração do material (σ_{tr}), valor este, ainda segundo o autor, que é de 580 MPa para o aço ao carbono 1040. Por segurança, o valor de σ_{cr} foi escolhido considerando o pior dos casos, ou seja, 60% do valor de σ_{tr} , 348 MPa. Desse modo, substituindo os valores na Eq. (1) o coeficiente de segurança obtido para esta aplicação foi de 63. Um número bastante elevado à primeira vista, porém vale lembrar que o maior problema aqui enfrentado não seja o cisalhamento devido ao torque, mas possivelmente o momento fletor alternado na fadiga, o que explica o sobre dimensionamento.

Com o cálculo do C_s feito e seu resultado satisfatório, o motor e dinamômetro que já estavam fixados na bancada foram acoplados pelo sistema escolhido. As juntas foram fixadas em ambos os eixos com um parafuso e uma arruela larga e os pares de juntas se ligaram através do eixo fabricado, que não ficou visível. Desse modo, o alinhamento no eixo X ficou definido e foi possível fixar os Trilhos Base Transversais nos Trilhos Base Longitudinais utilizando uma barra roscada

M10 e arruelas largas. Entre os trilhos, ficou uma barra de compensação de cada lado, indicada pela seta branca na Figura 3 para garantir o alinhamento no eixo Z.

Abaixo dos Trilhos Base Longitudinais, 2 vibra-stops (as setas amarelas na Figura 3 indica dois dos 4 vibra-stops que estão parcialmente visíveis) de cada lado foram aparafusados nas extremidades, para atenuar a vibração que a bancada viesse a transmitir para o solo ou balcão, no caso, sobre onde ela ficaria posicionada.

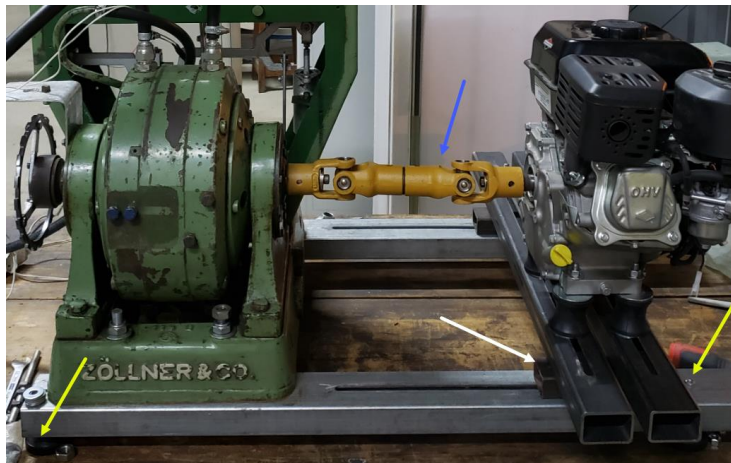


Figura 3: Montagem da bancada com acoplamento (Autor próprio, 2020)

O modo de dissipação de energia nos dinamômetros de Correntes de Foucault é através do efeito Joule, portanto se faz necessário um sistema de arrefecimento para evitar sobreaquecimento durante os testes (períodos críticos de frenagem). Por esse motivo, um sistema adaptado foi montado utilizando água como fluido de arrefecimento, um radiador automotivo, uma bomba hidráulica, mangueiras e um reservatório (não se fez uso de sensor de temperatura).

Vale também comentar sobre o dispositivo de segurança de eixo construído. Como os eixos acoplados giram em velocidades bastante altas (e.g. acima de 3000 rpm), uma falha ou soltura de algum componente pode causar sérios acidentes. Então um dispositivo protetor de eixo foi adaptado a partir de chapas metálicas dobradas circundando o eixo. Na Figura 4 abaixo, que ilustra a montagem completa da bancada, é possível ver as mangueiras que integram o sistema de arrefecimento e também o dispositivo protetor de eixo mencionado anteriormente.

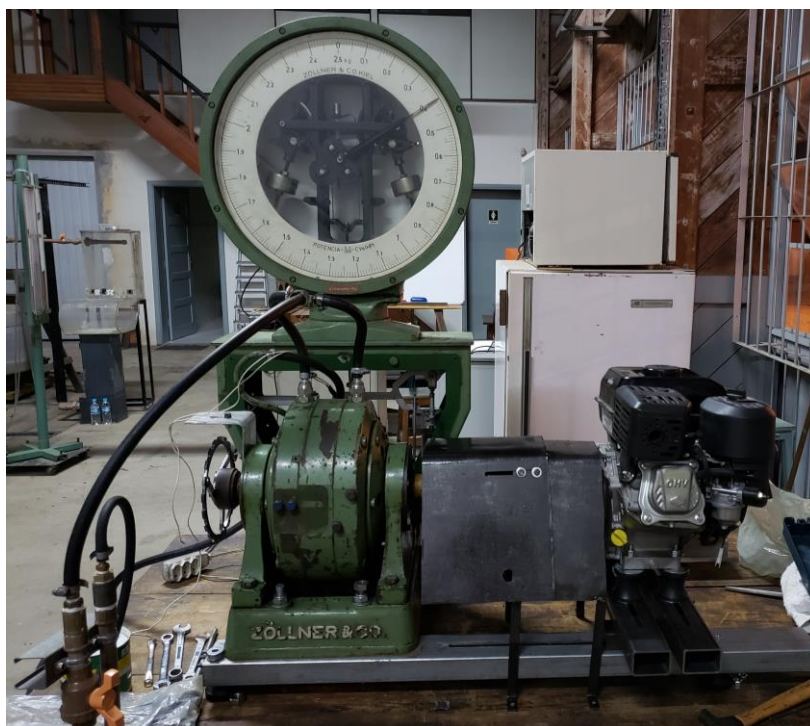


Figura 4: Montagem completa da bancada e sistema dinamômetro-MCI com acoplamento, proteção de eixo e sistema de arrefecimento (Autor próprio, 2020)

2.1. Torque e rotação

A medição de torque foi feita utilizando o dispositivo original do dinamômetro, que apesar de se tratar de uma máquina antiga, conta com um bom sistema de alavancas, com inclusive amortecimento de vibração. Onde a força de frenagem é transmitida por um dos braços de alavanca até o relógio mostrador, que converte a medida de força vezes distância diretamente em unidade de torque, exibida analogicamente no mesmo.

A rotação por sua vez precisou de um sistema de controle, que foi feito eletronicamente, em parceria, pelos alunos do curso de Engenharia Elétrica da UFPR Francisco Eduardo Liebl, Lukas Zaballa e Guilherme Mendes. O sistema de controle de rotação é muito importante porque sem ele o dinamômetro não freia o motor e desse modo não há leitura de torque. Dentre os possíveis métodos de medição, foi escolhido o modo que explora o princípio da impedância elétrica (oposição que um circuito elétrico faz à passagem de corrente quando submetido a uma tensão), e para isso foi utilizada uma roda de relutância variável (ou roda fônica) de 20 dentes, fabricada em aço carbono através do processo de corte a laser, acoplada ao eixo girante do dinamômetro na sua parte de trás, e um sensor indutivo automotivo que realiza a leitura da velocidade do eixos, à partir da roda fônica. A função do sensor indutivo é detectar a proximidade de um metal por meio da indução magnética. Composto de um indutor e um ímã permanente, o sensor detecta por meio da perturbação do seu campo magnético, gerada quando algum material ferromagnético se aproxima, e emite um sinal. Para a medição da rotação, se faz uso deste princípio para contar os pulsos gerados pela rotação de um componente metálico dentado, a roda de relutância variável, no caso. O sensor indutivo, posicionado próximo aos dentes da roda, detecta os pulsos todas as vezes que um dente se aproximar. Correlacionando o número de pulsos detectados em um intervalo de tempo, por exemplo 60 segundos, é possível obter quantas vezes o eixo gira em um minuto (unidade convencional de rotação, rpm). A roda fônica, por sua vez, é de aço, possui 20 dentes, 5 mm de espessura, 180 mm de diâmetro externo e 40,3 mm de diâmetro inteiro. O sistema de controle da rotação (Liebl et al., 2019), feito com um microcontrolador STM32F103C8 e um código programado, se dá através de um computador, utilizando o *software Uniplot*, conectado ao sistema elétrico, conectado por sua vez ao dinamômetro.

2.2. Procedimento de ensaio – Teste de desempenho

Antes de iniciar um ensaio há alguns procedimentos de segurança que devem ser respeitados, como checar parafusos e fixação, nível de combustível do motor e aquecimento do mesmo.

A seguir, encontra-se o exemplo de procedimento que se foi seguido, para realização dos testes de desempenho, ou seja, ensaios à plena carga (100% do acelerador) visando traçar as curvas características de torque e potência do motor.

Estando o MCI ligado e devidamente aquecido, eleva-se a aceleração do mesmo ao seu maior nível. Neste ponto o dinamômetro não estará freando a rotação do motor, então o torque transmitido é zero, mas é possível que o relógio esteja mostrando algum valor de torque, então deve-se anotar esse valor pois ele será utilizado como valor de correção dos próximos valores observados.

Utilizando o computador para controlar a rotação, reduz-se a mesma para um valor redondo próximo do que está, como 5.500 rpm. Cada redução não deve ser demasiada abrupta e deve aguardar um tempo de 15 segundos para estabilização. Neste exemplo é aconselhável que as reduções de rotação sejam de 500 rpm. Após a rotação se estabilizar no valor inserido, anotar o valor de torque exibido no relógio. Ao fim do ensaio, subtrair de cada valor observado, o valor de correção anotado no início do teste.

Repetir os passos até o menor valor possível, nos testes foi de 1.800 rpm, definido experimentalmente, pois menos que isso o sistema de controle não é capaz de assegurar o valor de rotação inserida. Um total de 9 pontos de medição foram definidos para o teste, iniciando em 5.500 rpm até o último em 1.800 rpm.

Finalizado o teste, tendo em vista que os valores de torque exibidos pelo relógio são dados na unidade quilograma-força-metro (kgf.m), para converter os valores de torque corrigidos deve-se multiplicá-los pelo valor da aceleração da gravidade no local. Como a bancada se encontra em Curitiba, o valor de aceleração da gravidade é de 9,78m/s². Dessa forma é possível obter os valores de torque em Newton-metro e traçar a curva de Torque [Nm] vs Rotação [rpm].

Para a curva de potência (*W*) vs rotação (*rpm*) do motor, é necessário multiplicar seus valores de torque pela velocidade angular no ponto, conforme a Eq. (4) a seguir:

$$P [W] = \frac{T [Nm] \cdot n [rpm] \cdot 2 \cdot \pi}{60} \quad (4)$$

Foram realizados 3 testes de desempenho, no mesmo dia, sob as mesmas condições, conforme o procedimento descrito acima. Os valores foram calculados da seguinte forma: para o torque, a indicação foi observada, anotada e posteriormente corrigida, ou seja, subtraído da parcela referente ao seu erro sistemático. Essa parcela por sua vez foi determinada através da média dos valores marcados pelo ponteiro antes e depois do teste, com o motor desligado. Após encontrada a variação, para converter o valor da indicação (kgf.m) em unidades do SI, os valores foram multiplicados pelo valor da aceleração da gravidade na cidade de Curitiba, ou seja 9,78 m/s². Os valores de potência foram calculados de acordo com a Eq. (4).

Após processados os resultados dos 3 testes, foi calculada a média das indicações de cada um dos pontos para servir de base para o resultado da medição.

2.3. Incertezas

O resultado de qualquer medição não é considerado completo sem seu valor de incerteza. Esta é um parâmetro associado ao resultado da medição que indica dúvida sobre a acuracidade do mesmo, e é decorrente da influência de grandezas externas no processo de medição. Os parâmetros numéricos que necessitam ser estimados para cada fonte de incertezas são dois: incerteza padrão (u), relacionada aos erros aleatórios e a correção (C), relacionada aos erros sistemáticos (Es). Os valores de incerteza padrão e correção devem ser estimados para cada fonte de incerteza, a partir de então o passo seguinte é combinar cada um dos valores estimados para cada fonte, mantendo separado correção de incerteza padrão, visto que eles têm causas diferentes. A correção combinada é obtida somando os valores associados a cada fonte de incerteza. Já na combinação da incerteza padrão, deve-se atentar se as variáveis aleatórias em questão têm dependência estatística ou não, e a operação de correlação é a partir do método dos mínimos quadrados. Para o caso de medições indiretas, como no caso dos valores potência, onde seu resultado é obtido através da multiplicação de uma medida de tempo (rpm) por uma medida de torque, conforme Eq. (4), e as grandezas envolvidas são independentes estatisticamente falando, pois não são obtidas com o uso do mesmo sistema de medição, a incerteza deve ser combinada entre as duas variáveis, “rpm” e “T”, que compõe a medida de potência sendo multiplicada uma pela outra (Gonçalves, 2018). No caso de avaliação da incerteza em medições indiretas, que envolvem grandezas de entrada estatisticamente independentes que se multiplicam ou se dividem, a incerteza combinada é calculada de acordo com a Eq. (5) a seguir:

$$u(G) = \sqrt{G^2 \cdot \left(\left(\frac{u(x_1)}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{u(x_n)}{x_n} \right)^2 \right)} \quad (5)$$

Onde $u(G)$ representa a incerteza combinada da grandeza calculada (G) e x_1, x_2, \dots, x_n , representam as grandezas de entrada necessárias para o cálculo anteriormente mencionado. Novamente no caso dos resultados da potência, o cálculo da incerteza para essa grandeza é da forma indicada pela Eq. (5), que adaptada tem a forma da Eq. (6):

$$u(P) = \sqrt{P^2 \cdot \left(\left(\frac{u(T)}{T} \right)^2 + \left(\frac{u(n)}{n} \right)^2 \right)} \quad (6)$$

Onde $u(P)$ é a incerteza de potência, $u(T)$ a de torque e $u(n)$ a de rotação.

Já as incertezas envolvidas no processo de medição de torque foram feitas através do desvio padrão. O valor de incerteza padrão chamada de u_1 foi calculada a partir do desvio padrão dos pontos medidos na mesma rotação e dividido pela raiz quadrada do número de medições, e por fim o cálculo da média desses valores trouxe o valor de u_1 . Por exemplo, foram realizados três testes, em cada um deles 9 leituras em pontos diferentes de rotação, o desvio padrão foi calculado entre 3 valores, um de cada teste, referente ao mesmo ponto de rotação, e então dividido pela raiz quadrada de 3. Ao fim obtém-se 9 valores, a média desses valores corresponde ao valor de u_1 . Esse valor foi calculado em 0,17 Nm.

Outra fonte de incerteza foi identificada, chamada de u_2 , foi referente à leitura no mostrador do equipamento, que segundo o manual de operação do mesmo, teria seu valor de acuracidade dentro de 1% do valor máximo da escala: 2,5 kgf.m. Desse modo convertendo para o SI têm-se que $u_2 = 0,25$ Nm.

Identificadas as duas fontes de incertezas na medição de torque é necessário obter a incerteza padrão combinada (u_c), que é calculada a partir da Eq. (7) (Gonçalves, 2018):

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (7)$$

Substituindo u_1 por 0,17 e u_2 por 0,25 obtém-se que a incerteza de torque combinada $u(T)$ é igual a 0,3 Nm. Desse modo com $u(T)$ calculado e sabendo que $u(n)$ foi determinada experimentalmente durante o processo de calibração e instalação do sensor de rotação, com valor igual a 25 rpm. Substituindo os valores na Eq. (6) para cada um dos 9 pontos de medição e calculando a média entre eles, o resultado obtido é que $u(P) = 0,15$ cv.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a representação gráfica, foram adicionados os valores de incerteza aos pontos médios calculados, e também a curva de referência, em vermelho nos gráficos a seguir, conforme foi fornecida pelo fabricante do motor no seu manual de operação. O primeiro resulta, que segue na Fig. (5), é a comparação entre as curvas de torque medidas e a de referência. nota-se que a curva de referência está praticamente toda dentro da faixa de incerteza, nos pontos medidos. Apenas com a exceção do ponto de 2.000 rpm na curva de torque. Este ponto representa o segundo ponto de maior frenagem, ou esforço

do dinamômetro, o que talvez possa justificar o ponto médio medido ter se afastado da curva de referência dessa forma. 0,34 Nm abaixo do valor de referência sendo que os outros valores comparados não ultrapassaram uma diferença de 0,16 Nm, tendo inclusive valores baixíssimos como 0,8 e 0,9 Nm, portanto, não excederam a incerteza calculada de 0,3 Nm. Infelizmente a curva de referência fornecida pelo fabricante do motor só está compreendida entre 2.000 e 3.600 rpm, o que impediu a comparação dos outros pontos medidos.

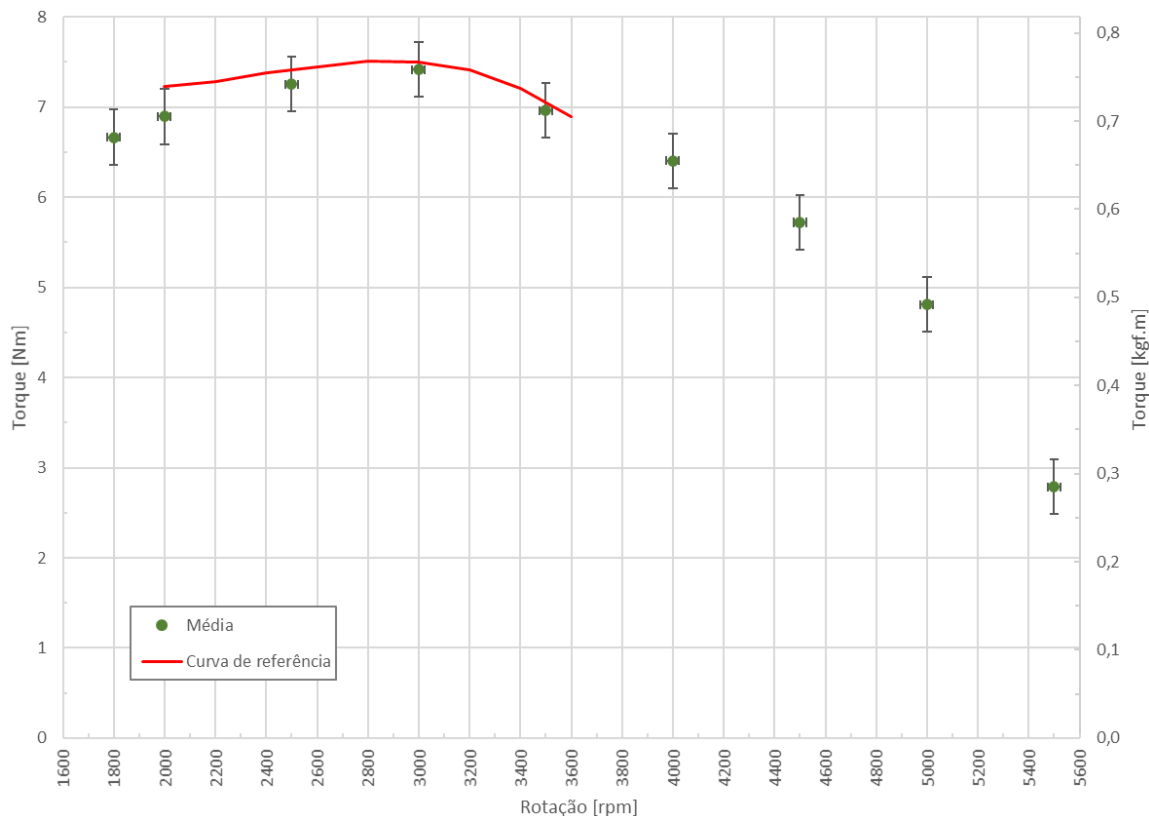


Figura 5: Curva de torque, valores médios com incerteza, e curva de referência do fabricante (Autor próprio 2020)

Avaliando o resultado da curva média de potência, Fig. (6), há pouquíssimo desvio dos pontos calculados, um mínimo de 0,01 cv e máximo de 0,09 cv no ponto de 2.000 rpm, sendo que a incerteza calculada foi de 0,15 cv. Novamente, assim como na análise anterior da curva de torque, o ponto em que se teve maior diferença foi o segundo ponto de maior absorção de energia pelo dinamômetro, o que reforça a hipótese de que o erro é maior nos limites mínimos de torque e potência. Mas os pequenos desvios dos pontos de referência e dos pontos médios medidos, indicam um bom grau de precisão e resultados satisfatórios, uma vez que para isso os objetivos de implementação do controle de velocidade, construção da bancada, realização de testes e avaliação das incertezas foram todos vencidos.

Sendo assim, é razoável assumir que o dinamômetro e o motor montados na bancada projetada e construída nesse trabalho foram capazes de não só cumprir com os objetivos iniciais como também entregar medições válidas de torque nas condições dos testes realizados.

É interessante lembrar que apesar de ser um equipamento bastante antigo, o princípio de funcionamento do dinamômetro não mudou ao longo dos anos, e isso ficou provado quando foram validados os resultados de suas medições no MCI de 3,5 cv.

A importância da realização de vários testes se provou necessária para verificação da dispersão dos valores medidos. Como as medidas de cada um dos pontos, quando comparados os resultados dos 3 testes, pouco divergiram, é razoável afirmar que as medidas apresentaram baixa dispersão e por conseguinte, isso significa que a parcela de erro aleatório na medida de torque é pequena. Já a parcela de erro sistemático é considerável, pois antes e depois de todos os testes, o ponteiro sempre marcava valores acima do zero, mesmo com o motor desligado. Mas graças às ferramentas fornecidas pela metrologia, foi possível obter bons resultados das medições.

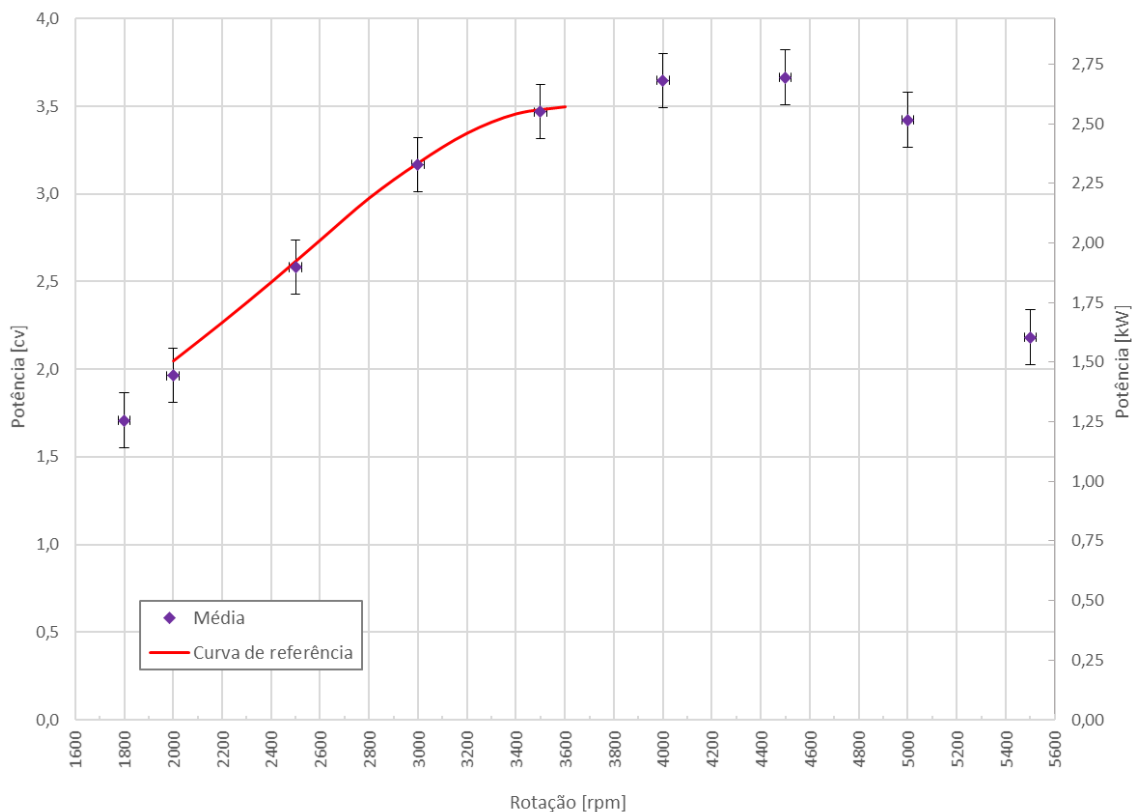


Figura 6: Curva de potência, valores médios com incerteza, e curva de referência do fabricante (Autor próprio 2020)

4. CONCLUSÕES

Após todo o trabalho realizado e descrito ao longo do documento, é seguro afirmar que os objetivos iniciais foram atingidos. A bancada foi projetada e construída, o controle de rotação foi implementado, os testes realizados com sucesso, as incertezas avaliadas e as curvas do motor foram traçadas.

Em suma, com o trabalho realizado ao longo deste projeto, a bancada já está pronta para ser utilizada futuramente, com grande potencial de promover aprendizado e fornecer experiência no assunto, ao longo da vida acadêmica dos alunos de engenharia. Todavia melhorias podem ser feitas na bancada, contribuindo ativamente para complementar o aprendizado de futuros alunos da UFPR, que por ventura vierem a utilizar a bancada e o dinamômetro para realizar mais testes e se desenvolverem na área de motores à combustão.

5. REFERÊNCIAS

- Briggs & Stratton. *Operator's Manual*.
- Brunetti, F. *Motores de Combustão Interna. Vol. 1*. São Paulo, 2012.
- Gonçalves, A. A.; Sousa, A. R. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. Florianópolis, 2018.
- Grande, P. C. *Novas tecnologias: a reinvenção dos motores a combustão*. Revista Quatro Rodas, 2018. 10 Jul. 2020. <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/a-reinvencao-dos-motores-a-combustao/>>.
- Gustavo, L. *Resistência dos Materiais*. IFSP/SJC. São Paulo, 2019.
- Liebl, E.F.; Zaballa, L.; Mendes, G. *Relatório de desenvolvimento disciplina TE333 – laboratório instrumentação e controle turma A*. Curitiba, 2019.
- Norton, R. L. *Projeto de máquinas. Uma abordagem integrada*. 2013.
- Souza, R. D. *Balança Curie e Correntes de Foucault*. F 809 - Instrumentação para o Ensino. Campinas, 2005.
- Stern, A.; Rosenthal Y.; Dresler, N.; Ashkenzaki, D. *Additive manufacturing: An education strategy for engineering students*. ELSEVIER. V. 27, p. 503-514, 2019. 20 Nov. 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.001>>.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.