

INSTRUMENTAÇÃO DE UMA BANCADA DINAMOMÉTRICA PARA ANÁLISE DE COMBUSTÍVEIS EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Luiz Felipe Rubin Santana, luizfelipe_rs@hotmail.com¹
Charles Rech, charles.rech@ufsm.br¹
Cristiano Frandazolo Maidana, cristiano.maidana@ufsm.br¹
Juan Galvarino Cerda Balcazar, juan.balcazar@ufsm.br¹
Giovani Leone Zobot, giovani.zobot@ufsm.br¹
Pericles Nicolau Balafa, periclesbalafas@gmail.com²
Simone Ferigolo Venturini, sfventurini@gmail.com³

¹Universidade Federal de Santa Maria – Campus Cachoeira do Sul

²Universidade Lasalle Canoas

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo. No presente artigo é apresentada uma metodologia para instrumentação de bancada dinamoétrica para análise de combustíveis em motores de combustão interna. Sua elaboração justifica-se pela necessidade de equipamentos dinamoétricos de custo acessível com alta resolução para medição de torque, potência e consumo específico de combustível em motores. Dessa forma, utilizaram-se componentes eletromecânicos para mensurar a força que reage ao acionamento de um freio de Foucault, acoplado ao eixo de um motor Honda-GX 35, e um sensor fotoelétrico para obtenção da rotação. Para o gerenciamento é utilizado um microcontrolador Arduino UNO, com seu respectivo programa desenvolvido, que realiza a comunicação da bancada em tempo real com planilhas no software Excel®, onde são armazenados e apresentados graficamente os valores de potência, torque e consumo específico obtidos. A instrumentação da bancada dinamoétrica possibilita, além de medições com alta confiabilidade, custo de implementação reduzido – quando comparado com demais equipamentos disponíveis no mercado. Inicialmente, valores originais, especificados pelo fabricante do motor, foram comparados com dados medidos na bancada, obtendo-se diferenças percentuais de 3,75% no torque máximo e 6,50% na potência máxima. A incerteza estática da bancada calculada conforme metodologia descrita por Kline McClintock, foi de 28,36 W para máxima da potência, o que equivale a um percentual de incerteza máxima de $\pm 2,59\%$.

Palavras chave: Análise de combustíveis. Instrumentação. Bancada dinamoétrica. Motores de combustão interna. Gerenciamento eletrônico.

Abstract. This article presents a methodology for dynamometer workbench instrumentation for fuel analysis in internal combustion engines. The project is justified by the need to design low cost dynamometric equipment, with high resolution for measuring torque, power and specific fuel consumption in engines. Thus, electromechanical components were used to measure the force that reacts to the activation of a Foucault brake, coupled to the axis of a Honda-GX 35 engine, and a photometric sensor to obtain the rotation. For data acquisition, an Arduino UNO microcontroller is used, with its respective developed program, which performs the workbench communication in real time with spreadsheets in the Excel® software, where the obtained power, torque and specific consumption values are stored and presented graphically. The instrumentation of the dynamometric bench allows, in addition to measurements with high reliability, reduced implementation cost - when compared to other equipment available on the market. Initially, original values, specified by the engine manufacturer, were compared with data measured on the bench, obtaining percentage differences of 3.75% in maximum torque and 6.50% in maximum power. The static uncertainty of the bench calculated according to the methodology described by Kline McClintock, was 28.36 W for maximum power, which is equivalent to a maximum uncertainty percentage of $\pm 2.59\%$.

Keywords: Fuel analysis. Instrumentation. Dynamometric workbench. Internal combustion engines. Electronic management.

1. INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna ainda preenchem um grande espaço no cenário atual, quando aplicados à propulsão de veículos automotores e máquinas operatrizes. Neste contexto, se faz necessário a realização de estudos que visem melhorar a qualidade, o rendimento, o desempenho e demais características operacionais destas máquinas, tanto para seus fabricantes quanto para usuários em geral. Os avanços da tecnologia do sistema eletrônico de gerenciamento da alimentação de combustível e da ignição no motor a combustão interna trouxeram benefícios consideráveis quanto ao rendimento, ao aumento de potência e à redução da emissão de gases poluentes (SZWARCFITER, 2004). O controle e monitoramento dos parâmetros de injeção e ignição em motores, que originalmente realizava-se de forma mecânica; no dinamômetro, se dá através de sistemas eletrônicos integrados de gerenciamento.

Neste trabalho é proposta uma metodologia de instrumentação e gerenciamento eletrônico de um motor de pequeno porte, visando a redução de custos na avaliação de combustíveis. Assim, o projeto e desenvolvimento da bancada dinamométrica utiliza um motor Honda-GX 35, gerenciado pelo sistema de injeção e ignição eletrônica programável Fueltech FT500 (FUELTECH, 2020).

A medição de torque e potência se dá a partir de célula de carga conectada ao Freio de Foucault, através de um braço em balanço, e sensor de rotação do tipo *encoder* incremental. Para medição do consumo de combustível, aplica-se uma segunda célula de carga conectada diretamente ao reservatório de combustível (RECH, 2002).

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais e Métodos

O dinamômetro é um equipamento largamente utilizado para a medição de torque, potência e consumo específico de combustível em motores automotivos, podendo ser do tipo “freio” ou “inercial”. Basicamente, o equipamento impõe carga ao motor, a qual pode ser medida por meios mecânicos, eletromagnéticos ou princípios hidráulicos. Neste trabalho, é proposto um dinamômetro de freio baseado em correntes parasitas, conhecido como Freio de Foucault. São descritas, na Fig. 1 à Fig. 7 as partes que compõem a bancada dinamométrica, sendo: (A) freio de Foucault; (B) regulador de tensão, para controle da intensidade de frenagem do freio magnético; (C) eixo maciço; (D) acoplamento flexível de eixo; (E) motor de combustão interna Honda-GX 35; (F) gerenciador eletrônico, modelo Fueltech-FT500; (G) sensor óptico reflexivo, para medição da rotação; (H) transdutor eletromecânico (célula de carga), para medição da força de reação à frenagem; (I) arduino UNO para condicionamento de dados; (J) transdutor eletromecânico, para medição do consumo de combustível; (K) módulo condicionador de sinal HX711; (L) regulador de pressão; (M) manômetro; (N) reservatório de combustível; e (O) sistema de monitoramento e análise de resultados via computador, a partir do software Microsoft Excel®.

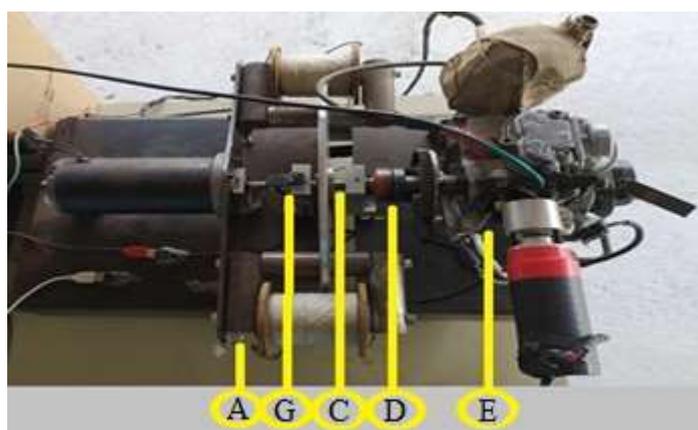


Figura 1. Vista geral da bancada dinamométrica. (Fonte: autores).

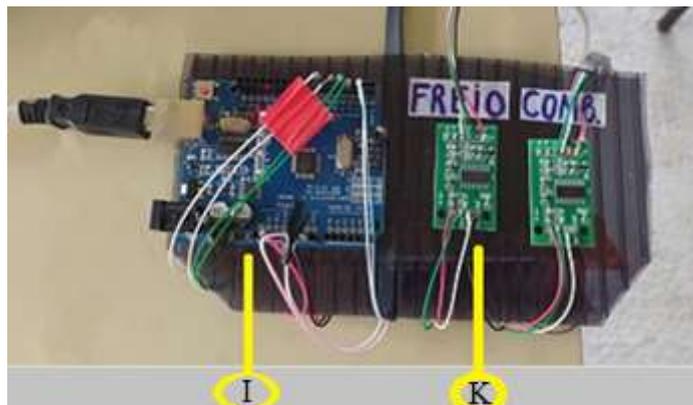


Figura 2. Microcontrolador Arduino UNO juntamente com dois condicionadores de sinal HX711. (Fonte: autores).



Figura 3. Painel de controle com módulo Fueltech-FT500 e regulador de tensão. (Fonte: autores).

2.2. Projeto e Construção

O motor Honda-GX 35, originalmente, apresenta sistema de alimentação de combustível do tipo mecânico (carburador) que, por sua vez, é substituído por um gerenciador eletrônico programável modelo Fueltech-FT500, a fim de alcançar maiores estabilidade e controle dos parâmetros de injeção de combustível, bem como do ponto de ignição.

Para medição do consumo de combustível, o respectivo reservatório foi suspenso e conectado a uma célula de carga, fixada a um suporte. Para a adequada conexão dos eixos, assim como boa compensação em caso de possíveis desalinhamentos, utiliza-se um acoplamento flexível, entre o eixo do motor e o sistema de freio. O Freio de Foucault é composto por um disco eletro condutor, suportado por mancais de rolamentos, e bobinas eletromagnéticas “em balanço” ligadas a um transdutor eletromecânico e uma célula de carga, a qual é conectada ao sistema de freio a uma distância conhecida.

2.3. Instrumentação e Funcionamento

Para medição de rotação é utilizado um sensor do tipo óptico reflexivo, que capta um ponto demarcado no perímetro do eixo, e envia o sinal para o microcontrolador, o qual converte os sinais em rotações por minuto. Para o cálculo do torque gerado pela ação do freio de Foucault, é obtida a força média na célula de carga durante um minuto (com instabilidade de no máximo ± 10 rpm) fixada à bobina eletromagnética em balanço e multiplicada pela distância até o centro do eixo. O cálculo do consumo de combustível é realizado pela medição da massa inicial e final do reservatório durante o ensaio prescrito.

Em sequência, é criada a lógica de programação para o microcontrolador arduino UNO, responsável por realizar o condicionamento de sinais de todos os sensores utilizados e pelos cálculos de rotação, torque e potência, assim como consumo de combustível. Por fim, utiliza-se uma configuração complementar denominada macro, disponibilizada pela ferramenta PLX-DAQ, a qual sincroniza a aquisição de dados do microcontrolador, em tempo real, com o Microsoft Excel® (PARALLAX, 2014). A Fig. 4 traz a planilha do Microsoft Excel® criada em conjunto com o painel de controle para visualização e pós processamento dos dados adquiridos.

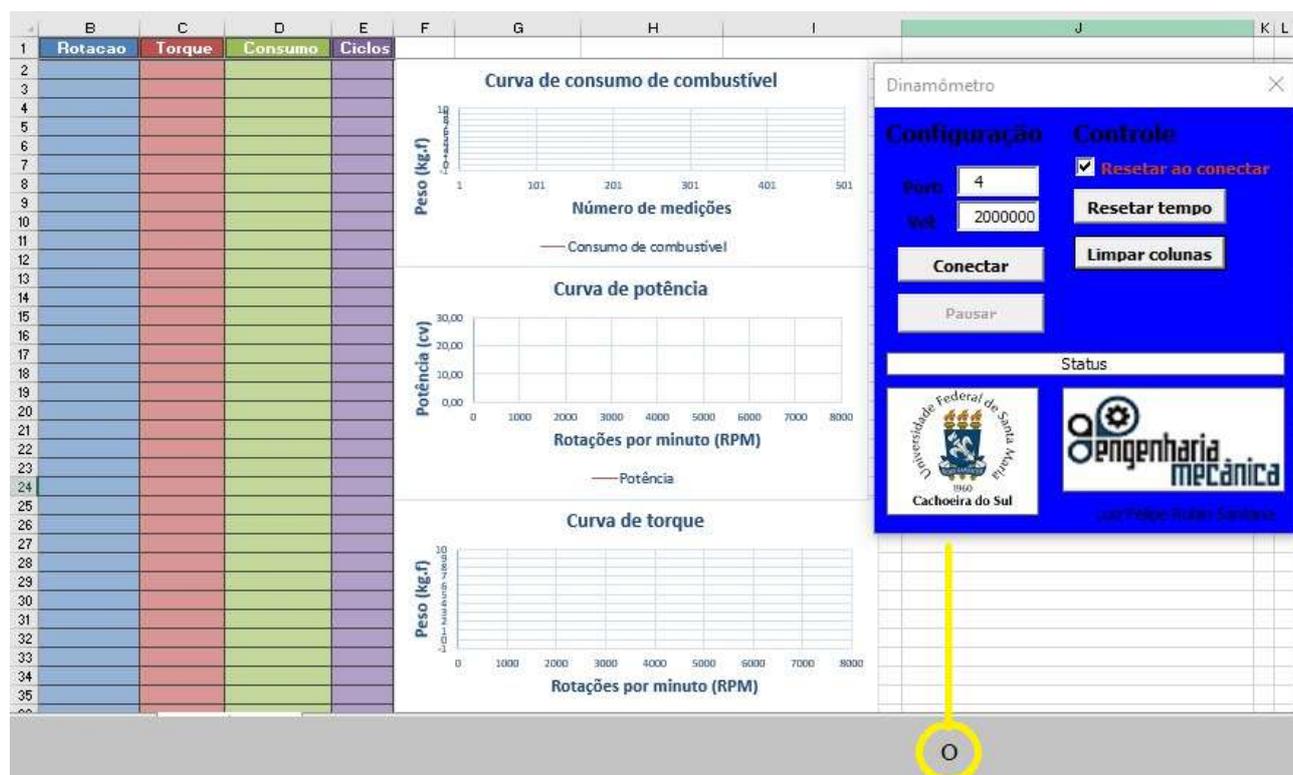


Figura 4. Planilha e painel de controle criado no Microsoft Excel®. (Fonte: autores).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, é realizada a verificação das células de carga, com aplicação de pesos conhecidos para gerar a curva de calibração. Em seguida, o motor é posto em funcionamento para que a leitura da rotação, no programa criado no *software* Excel®, esteja coincidindo com a rotação indicada pelo módulo de injeção eletrônica Fueltech, a fim de certificar-se que a medição está correta.

Para ensaios na bancada dinamométrica, com o programa desenvolvido operando adequadamente, o motor Honda-GX 35 é colocado em funcionamento por cerca de dois minutos, até que as temperaturas de funcionamento entrem em regime permanente. Logo após, o motor é posto em plena carga, ou seja, com 100% de abertura no sistema de admissão, e com o auxílio do regulador de tensão do freio de Foucault mantém-se a rotação do motor em aproximadamente 3500 rpm, por três minutos, em incrementos de 500 rpm. Algumas exceções nas faixas de rotação, entre 6000 rpm até 8000 rpm, mantiveram-se por dois minutos e, acima dessa rotação, um minuto apenas de ensaio, com intuito de evitar o superaquecimento do motor.

O número de amostras é de quatro valores por segundo e, em cada rotação, utiliza-se a média dos valores obtidos durante o tempo de estabilidade do motor de no mínimo um minuto conforme Norma ABNT NBR 1585. O ensaio é repetido três vezes em cada rotação e para a obtenção dos parâmetros de torque, potência e de consumo específico é realizada a média aritmética destes três pontos para cada rotação, conforme apresentados nas Fig. 9 à Fig. 11.

3.1. Medição da rotação

Para a medição da rotação no eixo do motor, é utilizado um sensor óptico reflexivo do tipo TCRT5000, conforme Fig. 5, o qual capta a presença de superfícies reflexivas e envia sinais elétricos a um condicionador de sinais, através de sua saída digital.



Figura 5. Sensor óptico reflexivo. (Fonte: Filipeflop, 2020).

O eixo do motor é demarcado apenas em um ponto do seu perímetro, com uma superfície branca, sendo o restante (de cor escura) não captada pelo sensor. Assim, cada vez que o eixo realiza uma volta completa é detectado um pulso elétrico que, por sua vez, é convertido em termos de rotação.

3.2. Medição do torque

Para a medição do torque, adota-se um sistema com célula de carga fixada na extremidade de uma das bobinas eletromagnéticas do freio de Foucault, por via de um braço em balanço. Quando o freio é acionado, a força de reação é aplicada sobre uma célula de carga, cuja capacidade máxima é de 3 kg_f conforme indicado na Fig. 6. A célula de força utilizada transmite um sinal analógico de ordem baixa, sendo necessário um amplificador e condicionador de sinal (HX711) – Fig. 2, que permite converter o sinal em analógico, além de amplificar a saída, possibilitando seu reconhecimento pelo microcontrolador arduino UNO.

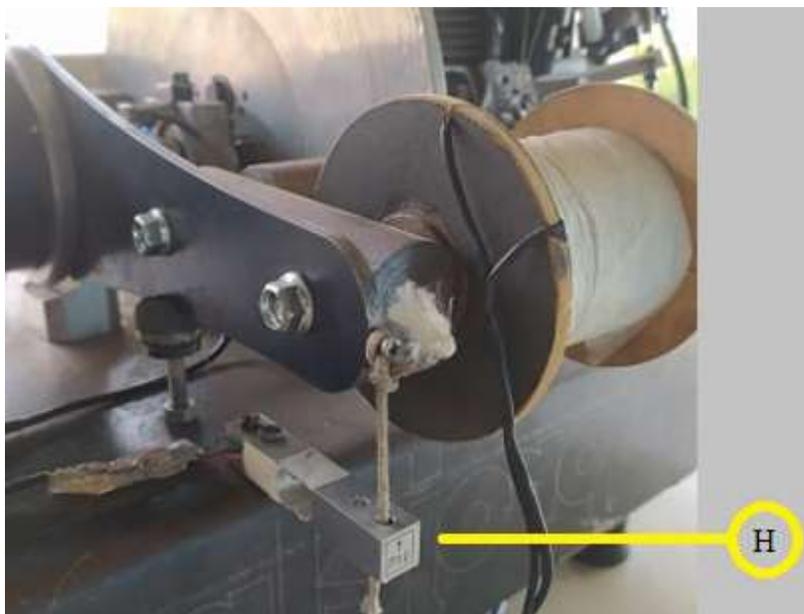


Figura 6. Célula de carga do freio de Foucault. (Fonte: autores).

3.3. Medição do consumo

Para medição do consumo de combustível, o reservatório é mantido suspenso e diretamente conectado à uma célula de carga com capacidade máxima de 0,5 kg_f, conforme indicado na Fig. 7. O combustível é pressurizado pneumaticamente no reservatório, com pressão aproximada de 600 kPa, para ser disponibilizado ao eletro injetor. Através de válvula reguladora, a pressão de injeção é fixada em 300 kPa, obtendo-se a pulverização adequada do combustível no eletro injetor.

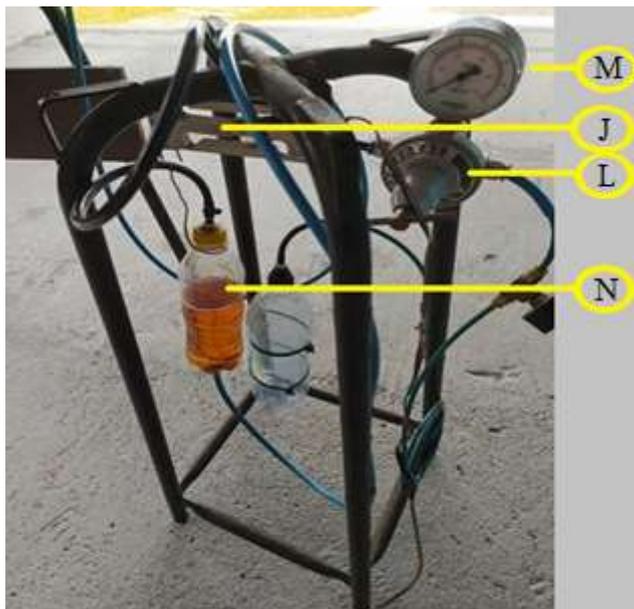


Figura 7. Reservatório de combustível suspenso na célula de carga. (Fonte: autores).

3.4. Fundamentação Teórica

Para o cálculo do torque é necessário conhecer a distância b , entre o centro do eixo de transmissão até o ponto de medição da força F , atuante na célula de carga, conforme desenho esquemático, Fig. 8.

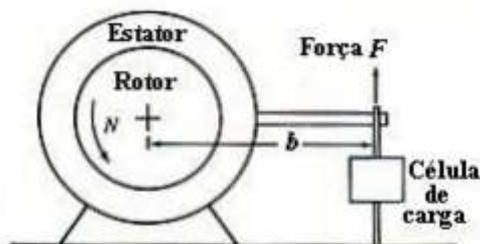


Figura 8. Desenho esquemático de um dinamômetro. (Fonte: adaptado Heywood, 1988.)

Desta forma, calcula-se o torque gerado, conforme a Eq. (1):

$$T = F \cdot b \quad (1)$$

em que T representa o torque, F a força aplicada e b a distância de aplicação da força. Por seguinte calcula-se a potência entregue ao dinamômetro, segundo a Eq. (2):

$$P = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot T \quad (2)$$

em que P representa a potência, N a rotação medida pelo sensor óptico reflexivo e T o torque.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos três ensaios, foram realizadas médias de torque, potência e consumo específico obtidas nas diferentes rotações, as quais estão mostradas nos gráficos, conforme as Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11. Com a finalização dos cálculos, foram calculados pontos de maior torque e maior potência, os quais resultaram em 1,54 N.m e 1,11 kW nas rotações de 6480 rpm e 7120 rpm respectivamente.

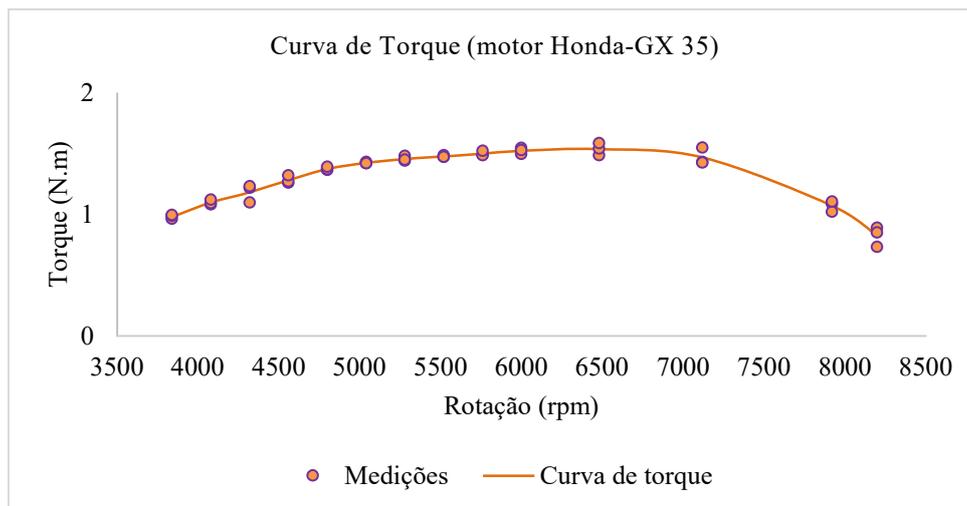


Figura 9. Curva de torque obtido nos ensaios. (Fonte: autores).

Verifica-se que, tanto da curva de torque, quanto da curva de potência, segue a tendência conforme especificada pelo fabricante, Fig. 12.

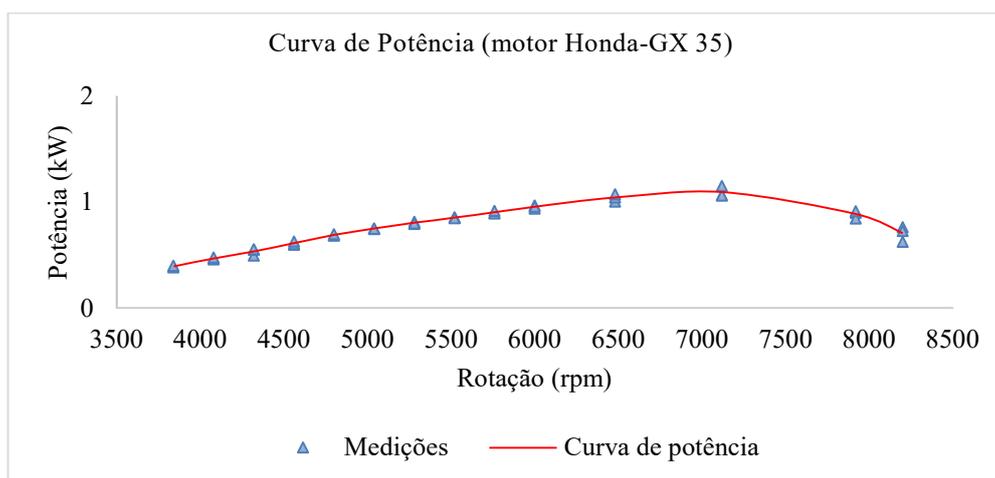


Figura 10. Curva de potência obtida nos ensaios. (Fonte: autores).

Uma vez obtidos os gráficos de torque e potência, pode-se realizar um comparativo, entre os valores obtidos durante os ensaios e os dados disponibilizados pelo fabricante do motor, Fig. 12, através da qual foi verificado uma variação de 3,75% para menos no torque máximo e 6,50% para mais na potência. Com a análise estática, utilizando o método de Kline McClintock (1953), obteve-se uma incerteza da bancada de 28,36 W (0,038 hp) na potência máxima de 1,096 kW (1,49 hp), o que equivale a uma incerteza percentual de $\pm 2,59\%$.

Por seguinte foram analisados os dados referentes ao consumo de combustível, obtendo o resultado de 0,48 l/h na rotação de 7120 rpm. Foi gerado um gráfico da curva de consumo específico do motor, conforme Fig. 11. A partir deste, pode-se avaliar quais são as rotações de menor consumo para operação do motor, ou seja, quanto mais baixo for o consumo específico de combustível, maior é a eficiência na faixa de rotação correspondente.

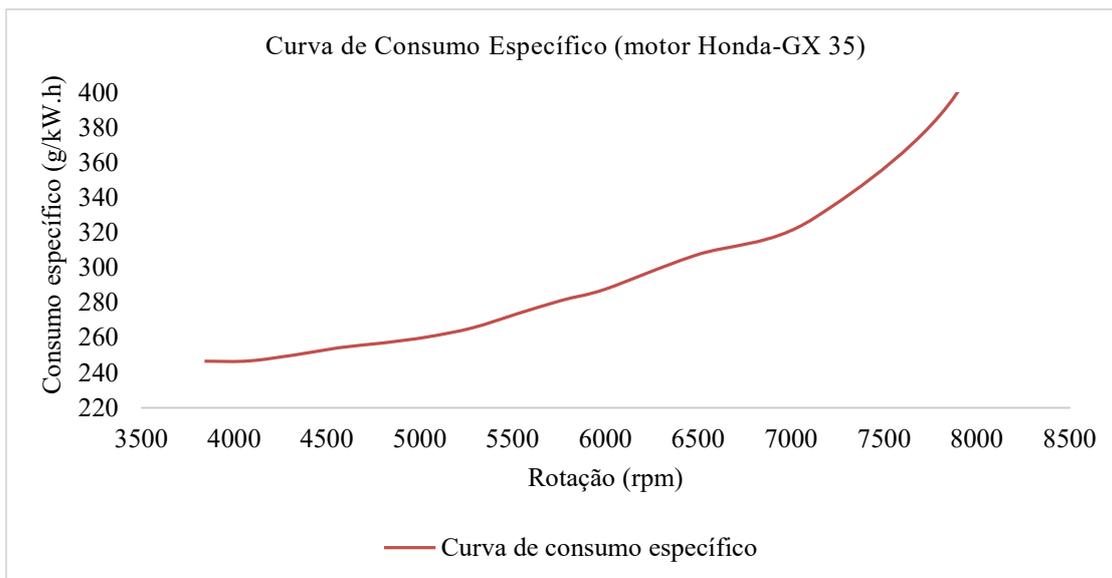


Figura 11. Consumo específico de combustível. (Fonte: autores).

Na Fig. 12 estão indicados os dados originais fornecidos pelo fabricante, utilizados para qualificar a metodologia empregada na instrumentação da bancada dinâmométrica para motores de combustão interna.

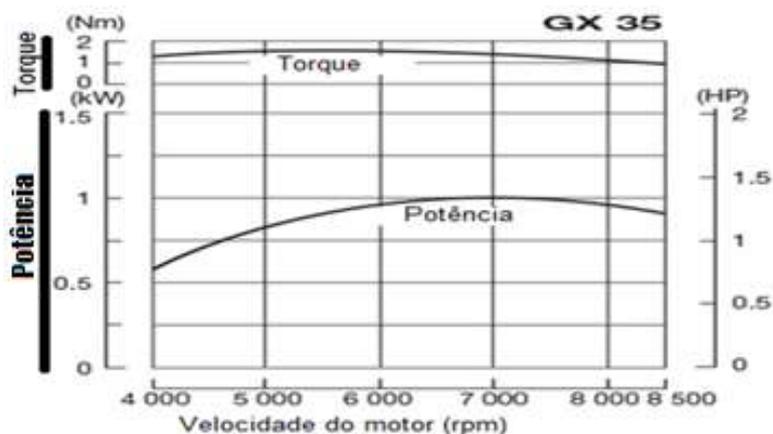


Figura 12. Especificações de torque e potência do fabricante do motor (Fonte: Adaptado Honda, 2017).

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho é proposta a instrumentação de uma bancada dinâmométrica para medição do desempenho de combustíveis em motores de combustão interna. Verificou-se boa concordância entre os resultados obtidos de potência e torque com os dados fornecidos pelo fabricante do motor utilizado, Honda-GX 35, sendo de 3,75% no torque máximo e 6,50% na potência máxima. A incerteza estática da bancada foi calculada utilizando a metodologia proposta por Kline McClintock, obtendo-se 28,36 W para a máxima da potência, o que equivale a um percentual de incerteza máxima de $\pm 2,59\%$.

Por fim, os ensaios de consumo de combustível forneceram valores com redução de aproximadamente 32,79% no consumo de combustível na rotação de 7000 rpm se comparados aos dados fornecidos pelo fabricante. Este resultado pode ser atribuído ao gerenciamento eletrônico de injeção de combustível e ignição e ainda ao aumento da eficiência volumétrica do motor devido à retirada do sistema mecânico de admissão de ar e à diminuição da resistência de entrada de ar no motor.

5. REFERÊNCIAS

- Filipeflop, 2020. “Sensor óptico fotoelétrico reflexivo”. 25 maio 2020 <<https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-obstaculo-infravermelho-ir>>.
- Fueltech, 2015. “Sistema de injeção e ignição eletrônica programável, manual de instalação e operação”. 30 novembro 2020 <<https://fueltech.com.br/pages/manuais-portugues>>.
- Heywood, John, *Internal combustion engine fundamentals*. Estados Unidos da América: McGraw-Hill. 1988.
- Honda, 2017. “Especificações técnicas, características e curva de potência do motor GX-35”. 25 maio 2020 http://www.honda-engines-eu.com/es/engine-model-details?p_p_id=enginedetail_WAR_enginedetail&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-4&p_p_col_count=1&_enginedetail_WAR_enginedetail_display=power-curve&e=30.
- Kline S. J, F; McClintock . A. “Describing uncertainties in single-sample experiments”. *Mech. Engr.* 75:3-8, 1953.
- Szwarcfiter, L. 2004. “Opções para aprimoramento do controle de emissões de poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção de renovação acelerada da frota”. 30 de novembro de 2020 <http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Lila_Szwarcfiter.pdf>.
- Parallax, 2014. “Ferramenta complementar de aquisição de dados de microcontrolador”. 14 de maio 2020 <<https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>>.
- Rech, Charles 2002. “Estudo experimental da relação ar/combustível para máxima potência em um motor de combustão interna, utilizando diversos combustíveis”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

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