



## MAPEAMENTO DA ALIMENTAÇÃO DE UM MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA EM TERMOS DE CONSUMO ESPECÍFICO PARA PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Rafael Silvestre de Sena, rafa-silvestre@hotmail.com<sup>1</sup>

José João Batista Neto, jjb.engmec@gmail.com<sup>1</sup>

Rômulo Luís Fernandes Martins, rlfmartins@uesc.br<sup>1</sup>

Ingrid Heloisa da Silva Alves, ihsalves@uesc.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Santa Cruz (UESC), Rodovia Jorge Amado, km 16, 45662900 - Ilhéus, BA – Brasil, Telefone: (073) 36805106, Fax: (073) 36805230

**Resumo.** Para atingir melhores resultados na Shell Eco-Marathon, é essencial que todas as equipes deem seu melhor em prol de diminuir as perdas energéticas existentes no protótipo bem como desenvolver métodos que utilizem da melhor maneira a energia proveniente do motor. Após meses de pesquisa da equipe de trem de força do Grupo Santa Cruz (UESC), surgiu a necessidade de conhecer o comportamento energético do motor utilizado pela equipe para, assim, definir o regime de trabalho em que o motor apresente a maior eficiência. Para isso, uma investigação foi executada para diversos pontos de operação do motor variando-se a razão ar - combustível e encontrando a alimentação ideal para cada combinação torque x velocidade angular. A aplicação de carga foi executada com o auxílio de um dinamômetro hidráulico e o controle da alimentação através de um sistema de injeção eletrônica de combustível. Foi possível conhecer as condições nas quais o motor apresenta sua maior autonomia de trabalho, bem como quantificar a sua eficiência. O ponto de maior eficiência encontrado para o motor em questão foi de 28,25% em 5000 RPM x 2 N.m.

**Palavras chave:** Injeção eletrônica. Eficiência energética. Powertrain.

### 1. INTRODUÇÃO

Visando incentivar pesquisa, desenvolvimento e inovação, a Shell promove desde 1985 o campeonato Shell Eco-Marathon. Trata-se de uma competição onde alunos do mundo inteiro têm como desafio construir, projetar e pilotar protótipos de eficiência energética que visam obter a maior autonomia. Visando obter bons resultados, os alunos do Grupo Santa Cruz (projeto de extensão composto por alunos de engenharia mecânica da Universidade Estadual Santa Cruz) dividiram o foco dos estudos relacionados à concepção do protótipo em 4 equipes: mecanismos, estrutura, aerodinâmica e trem de força.

A equipe de trem de força, responsável pelo desenvolvimento deste artigo, tem como objetivo estudar, projetar e construir os sistemas que envolvem a propulsão do protótipo que inclui motor, transmissão e os sistemas de controle relacionados aos itens anteriores. Após definir o regime de trabalho do protótipo na pista, surgiu a necessidade de conhecer a eficiência do motor para poder prever os resultados da equipe na competição.

Quando falamos de motores a combustão interna, a eficiência está associada ao consumo específico ( $C_s$ ). Esse parâmetro é definido por Martins (2006) como um conceito de eficiência da conversão de energia em um motor, que basicamente diz o quanto de energia o motor entrega por grama de combustível consumido, expresso pela Equação 1.

$$C_s = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_e} \quad (1)$$

nos quais,  $\dot{m}_f$  - vazão mássica de combustível ( $\text{g/s}$ )  
 $\dot{W}_e$  - potência útil (J)

O consumo específico do motor varia de acordo com situação de uso em que o mesmo se encontra, em termos de velocidade angular (RPM) e torque (N). Esse efeito existe graças à variação da intensidade de diversos fatores como perdas por bombagem, perdas mecânicas e perdas térmicas. Porém, para garantir o menor consumo específico possível em todos os pontos, é necessário que a quantidade de gasolina injetada varie de acordo com a eficiência volumétrica do motor, obtendo sempre uma razão ar – combustível perfeita em termos de eficiência energética para todos os pontos do motor. Vale ressaltar que essa “razão perfeita”, neste caso, difere da razão estequiométrica. Trata-se daquilo que Brunetti (2012) chama de “mistura econômica” que é levemente mais pobre que a mistura estequiométrica e resulta no consumo

específico mínimo. Como essa variação não é linear, os meios mecânicos de alimentação tornam-se limitados, sendo assim conveniente a utilização de um sistema de injeção de combustível controlado eletronicamente.

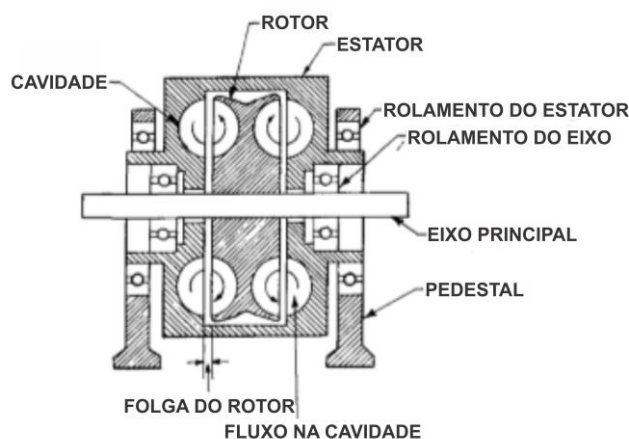
### 1.1. INJEÇÃO ELETRÔNICA

O sistema de injeção eletrônica é utilizado para calcular e injetar quantidades exatas de combustível na câmara de combustão com base em valores de variáveis de funcionamento medidos por sensores instalados no motor e um banco de dados previamente aferidos e inseridos na memória do sistema. Tal calibração é feita experimentalmente em bancada com o auxílio de um dinamômetro que é utilizado para aplicar uma carga bem controlada ao motor possibilitando variar a dosagem de combustível e observar a resposta ótima do mesmo. O sistema ainda pode ou não ser dotado de sensores que fazem correções em tempo real nos cálculos de acordo com as respostas do motor ao combustível injetado.

### 1.2. DINAMÔMETRO

Brunetti (2012) afirma que o dinamômetro é composto por uma carcaça metálica, cujo papel é servir como estator, bi apoiada por mancais coaxiais ao eixo de um rotor interno que é acoplado ao eixo do motor, como ilustrado na Figura 1. Essa configuração permite que o estator fique livre para girar. Além disso, é acoplado à carcaça do dinamômetro um braço que fica apoiado sobre uma célula de carga.

Figura 1. Diagrama esquemático de um dinamômetro hidráulico (Adaptado de N. N. Narayan Rao, 1968)



## 2. METODOLOGIA

O sistema de injeção (Fig. 2) em questão neste trabalho é constituído por um tanque de gasolina pressurizado (Fig. 3), um bico injetor, um corpo de injeção, um sensor de abertura da borboleta, um sensor de posição do eixo/tacômetro e uma unidade de controle do motor (ECU) (Fig. 4). O tanque pressurizado é constituído por uma garrafa pet de 500 mL com duas mangueiras em sua tampa: uma para a entrada de ar comprimido conectada a um compressor através de uma válvula reguladora de pressão, e outra para saída de combustível conectada ao bico injetor através de um filtro. O sensor de abertura da borboleta é aproveitado do próprio servo motor responsável por controlar a borboleta. O corpo de injeção serve para acoplar o bico injetor ao motor e alojar a válvula borboleta de controle do ar. O sensor de posição do eixo/tacômetro indica a o bico o momento exato de injetar o combustível além de mensurar a velocidade angular do motor em tempo real.

Figura 2. Visão completa do sistema (Autoria própria, 2019)

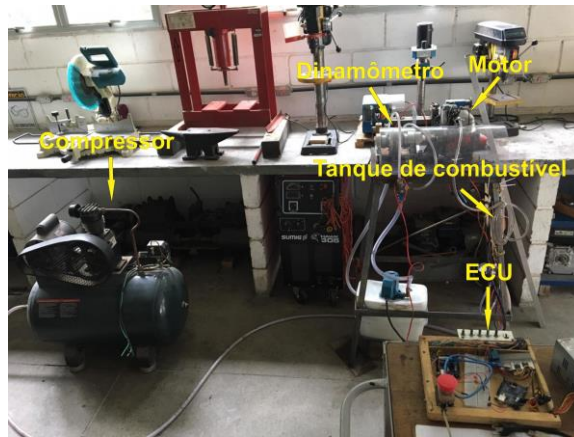


Figura 3. Tanque pressurizado (Autoria própria, 2019)



Figura 4. Unidade de controle do motor (Autoria própria, 2019)



Neste caso, foi adaptado o bico injetor de uma Honda Pop 110 a um motor MM4 de 43cc que equipa o modelo de roçadeira EM4350UHG da MAKITA. A ECU é controlada por uma placa microcontroladora (Arduino Uno).

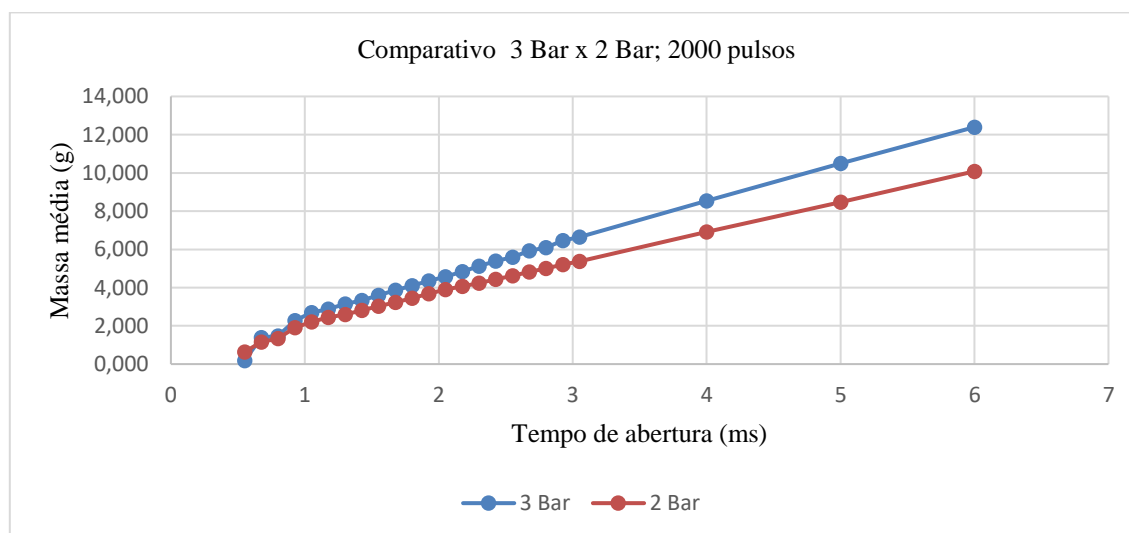
O primeiro passo para o mapeamento do motor é o teste de vazão do bico injetor. Essa calibração serve para mapear a vazão mássica de gasolina em função da pressão de alimentação e o tempo de abertura do bico injetor.

## 2.1. MEDIDA DE VAZÃO DE COMBUSTÍVEL

Foram selecionadas duas pressões de trabalho e intervalos de tempo de abertura do bico para que fossem traçados os mapas característicos de vazão mássica do bico injetor. Esses testes tiveram como objetivo, também, analisar a viabilidade de usar o bico injetor em questão (se sua vazão mínima seria suficiente para manter o motor em marcha lenta) bem como o desempenho da ECU (se o microcontrolador processaria os dados em tempo hábil para enviar os pulsos para o bico mesmo em altas rotações).

Os testes consistiam em enviar dois mil pulsos para o bico injetor que abria, a cada pulso, com o tempo de abertura previamente configurado. A gasolina proveniente dos dois mil pulsos foi injetada num erlenmeyer e posteriormente mensurada numa balança de precisão. Cada ponto de pressão x tempo foi aferido três vezes para obter uma média mássica da vazão. O resultado desse teste está exposto na Figura 5.

Figura 5. Gráfico comparativo da vazão mássica em 3 bar e 2 bar (Autoria própria, 2018)



Para escolher qual pressão trabalhar, foi analisada a taxa de variação da vazão pelo tempo de abertura do bico. Concluiu-se que a taxa em 3 bar era maior e por isso a precisão de controle da vazão seria menor. Além disso para pulsos com largura menor que 1 ms notou-se um comportamento anômalo mais acentuado para a pressão de 3 bar. Este comportamento anômalo é comum aos bicos injetores. Como a taxa em 2 bar se mostrou satisfatória e com anomalias menos severas, decidiu-se por trabalhar nesta pressão.

Após validar o uso da ECU, do bico injetor e escolher uma pressão de trabalho, foi necessário criar um mapa teórico de injeção baseado no consumo do motor em marcha lenta (previamente mensurado com o auxílio de um carburador) e no consumo do motor numa teórica eficiência volumétrica máxima. Tornou-se necessário calibrar o mapa da injeção eletrônica ajustando a quantidade de gasolina ideal para minimizar o consumo específico do motor em diversas situações de uso. Para isso, foi necessário utilizar um dinamômetro e implementar os dados de consumo e de torque do motor à ECU para que os dados de consumo específico fossem analisados.

## 2.2. DINAMÔMETRO HIDRÁULICO

Foi utilizado um dinamômetro hidráulico tipo “freio d’água”, como pode-se observar na Figura 6.

Figura 6. Dinamômetro hidráulico utilizado (Autoria própria, 2019)





A carcaça possui furos que servem para entrada e saída de água. A água que entra é jogada contra cavidades presentes no rotor que, por estar girando, expulsa a água no sentido radial por força centrífuga. O desenho da cavidade obriga a água a se direcionar às cavidades presentes no estator que está em equilíbrio com a célula de carga. Dessa maneira, a água transfere sua quantidade de movimento para o estator, aplicando, assim, um esforço torçor que é medido através da célula de carga. Sendo assim, quanto maior a massa de água presente no dinamômetro, maior a quantidade de movimento transferida para o estator e maior o esforço torçor medido pela célula de carga. Assim, é possível manipular a carga aplicada no motor através da quantidade de água presente dentro do dinamômetro. A força lida na célula de carga multiplicada pela distância entre a linha de centro do eixo e o ponto de apoio do braço resulta no torque aplicado pelo motor. É importante ressaltar que, como há um cisalhamento da água dentro do dinamômetro, a mesma acaba aquecendo, tornando necessária uma circulação do fluido para que ele resfrie. Além da força aplicada pela água no estator, existe também forças de atrito atuando nos selos mecânicos e nos rolamentos presentes no dinamômetro, mas felizmente tais forças estão no mesmo sentido de ação das forças medidas pela célula de carga, evitando, assim, imprecisões nas leituras.

### 2.3. MAPEAMENTO DE CONSUMO ESPECÍFICO DO MOTOR

Com a célula de carga do dinamômetro e o bico ligados à ECU, foi possível então mensurar os primeiros dados de consumo específico do motor. Para isso, utilizou-se da relação previamente estabelecida no teste de vazão do bico injetor entre tempo de abertura do bico e massa de combustível injetada. Iniciaram-se, então, os testes para regulagem do mapa de injeção e construção do mapa de consumo específico. Os testes consistiram em tornar constante a abertura da borboleta de admissão (TPS), que varia entre 0 (completamente fechada) e 18 (completamente aberta), e alterar a vazão de água no dinamômetro para controlar a carga aplicada no motor para que o mesmo estabilizasse em uma velocidade angular (RPM) desejada. Após chegar a esse ponto de TPS x RPM, inicia-se o teste que consiste em variar o tempo de abertura do bico injetor, por meio de uma variável dentro do programa da injeção que multiplica o tempo de abertura do bico por uma constante controlada por um potenciômetro, e analisar o consumo específico resultante da mistura ar combustível em questão. Esses passos foram repetidos submetendo o motor a diversas situações até que o mapa de injeção tivesse pontos suficientes para estimar o comportamento ideal na faixa de trabalho desejada.

## 3. RESULTADOS

Após os testes mencionados no tópico anterior, foi possível conhecer a relação entre tempo de abertura do bico injetor e consumo específico para cada situação de RPM x TPS a que o motor foi submetido (exemplos: Fig. 7, Fig. 8 e Fig. 9) e conhecer qual seria, aproximadamente, a alimentação de combustível que proporciona o menor consumo específico para cada situação. Como o objetivo principal do estudo foi conhecer a região de trabalho em que o motor apresentava sua melhor eficiência para aplicar o regime de trabalho previamente definido pela equipe de trem de força, a quantidade de pontos foi satisfatória para tirar conclusões, já que um mapa completo requisitaria muito tempo de trabalho e maior precisão dos sistemas de controle. Além disso, o mapa completo nos traria informações de regiões que não são de interesse.

Figura 7. Relação consumo específico x tempo de abertura do bico injetor em 3000 RPM e com o TPS na posição 3 (Autoria própria, 2019)

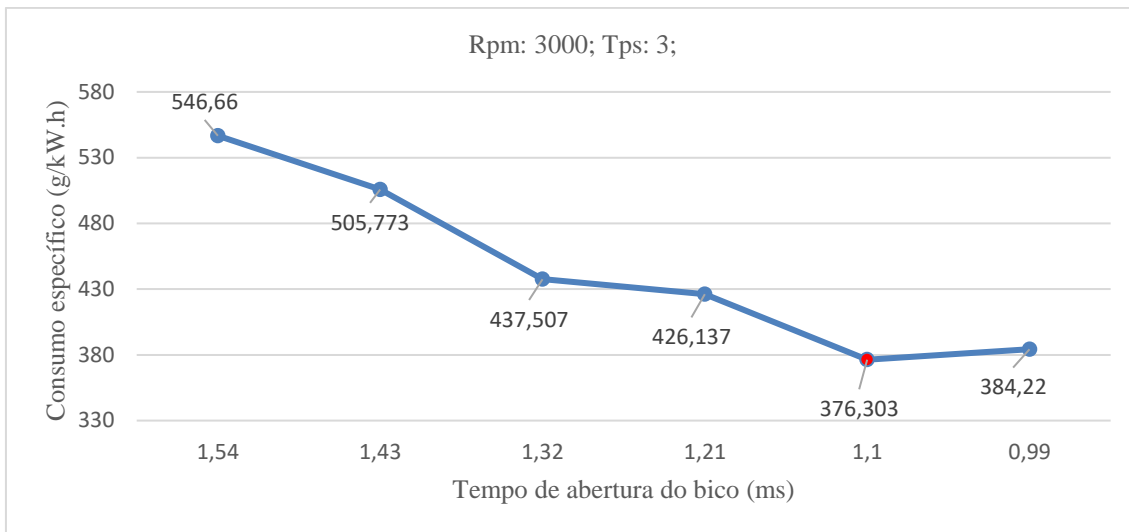


Figura 8. Relação consumo específico x tempo de abertura do bico injetor em 3000 RPM e com o TPS na posição 9 (Autoria própria, 2019)

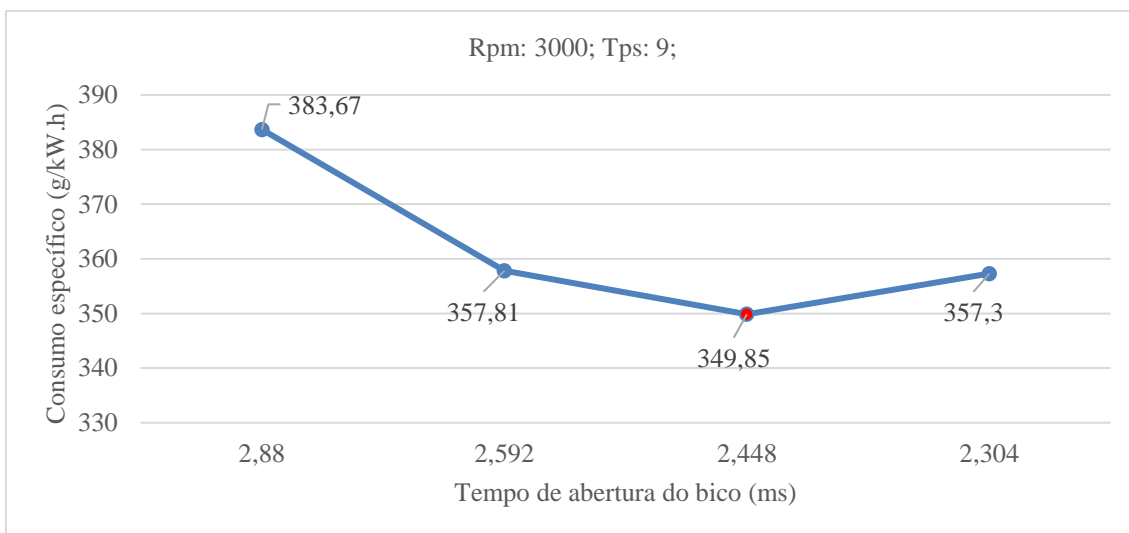
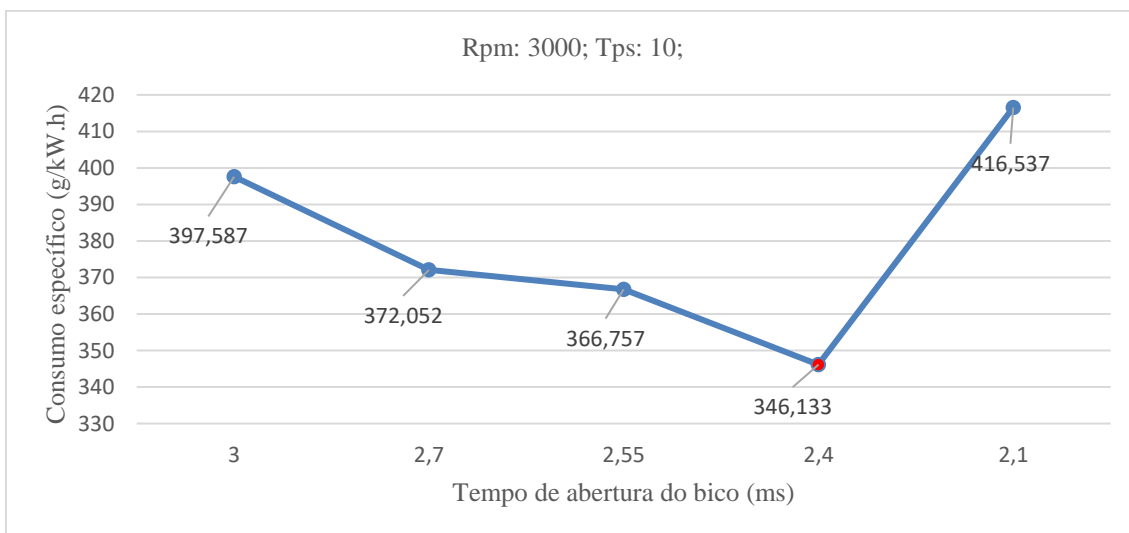


Figura 9. Relação consumo específico x tempo de abertura do bico injetor em 3000 RPM e com o TPS na posição 10 (Autoria própria, 2019)





É possível notar que o ponto de 2 N.m x 5000 RPM apresentou o menor consumo específico ( $296 \text{ g/kWh}$ ) e consequentemente a maior eficiência (28,25%). É possível notar, também, uma grande região com aproximadamente 26% de eficiência, o que permite que o motor apresente um resultado próximo ao obtido no ponto de melhor eficiência, porém numa quantia maior de situações (sendo, assim, mais flexível, por não se resumir a um ponto).

## 5. CONCLUSÕES

É muito comum acreditar que o motor se apresenta mais econômico em rotações mais baixas. Isso acontece pois as máquinas em geral, quando operam em velocidades menores, sofrem menos com efeitos dissipativos de forças inerciais, de atrito ou até mesmo aerodinâmicas, no caso de veículos por exemplo, resultando em um menor dreno de potência, o que tem efeito contrário à diminuição da eficiência, podendo resultar em uma diminuição geral no consumo. Porém, diante do que foi apresentado anteriormente, é possível notar que o motor em questão não apresenta o mesmo rendimento em todas as condições.

Observa-se que a resposta do motor se divide em regiões de mesmo consumo específico, que se formam em torno de um ponto cujo consumo específico é o mais baixo. Um drástico aumento do consumo específico ocorre quando o motor se afasta da região de maior eficiência, sendo possível notar que o consumo específico tende ao infinito quando a carga do motor diminuir, já que, nessa situação, o motor consome o combustível mas não disponibiliza nenhuma potência útil.

Conclui-se que o motor em questão apresenta uma extensa região, entre 4000 RPM até 6000 RPM, em que a eficiência é apenas 2% menor que a eficiência máxima (que foi 28,25% em 5000 RPM x 2 N.m). Este comportamento proporciona uma maior facilidade na aplicação deste motor pois permite que o controle do veículo oscile sem grande comprometimento no rendimento final.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Grupo Santa Cruz por nos fazer extrapolar os conhecimentos absorvidos em sala de aula, propiciando o desenvolvimento de pesquisas como esta. Agradecemos também ao Laboratório de Manufatura (LAMAN-UDESC) e ao Laboratório de Projetos Mecânicos e Tribologia (LAPMET-UDESC) por fornecer o suporte necessário para a realização dos testes.

## 7. REFERENCIAS

Brunetti, F., 2013. *Motores de combustão interna*. Volume 1.

Martins, J., 2006. *Motores de combustão interna*. Segunda edição.

Narayan Rao, N., "The Basic Theory of Hydraulic Dynamometers and Retarders," SAE Technical Paper 680178, 1968, <<https://doi.org/10.4271/680178>>.

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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