

DETERMINAÇÃO DE CURVA DE COASTDOWN E ROAD LOAD EM PROTÓTIPO BAJA SAE

Lucas Volpato Celeste, celeste@alunos.utfpr.edu.br
Laura Maria Magalhães, lauramagalhaes@alunos.utfpr.edu.br
Janaina Fracaro de Souza Gonçalves, janainaf@utfpr.edu.br
Elizabeth Mie Hashimoto, ehashimoto@utfpr.edu.br
João Pedro Errera Bonilha, joaopedrobonilha@alunos.utfpr.edu.br
Felipe Boim, felipeboim@alunos.utfpr.edu.br
Esther Perri Grego, estherperrigrego@alunos.utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. João Miguel Caram, 731 - Pioneiros, Londrina - PR, 86036-700

Resumo. O presente artigo visa desenvolver um sistema embarcado para coleta e análise de dados a fim de determinar e validar o modelo de Road Load de um protótipo Baja SAE, dando enfoque na análise das forças resistivas ao movimento, como resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento e gradiente de inclinação, para otimizar o desempenho do veículo. O sistema de telemetria integrado ao protótipo utiliza o microprocessador Raspberry PI 3B e o microcontrolador base Arduino UNO para processar e armazenar dados de rotação e velocidade, coletados por um sensor indutivo. A análise inclui cálculos de RPM, velocidade e Road Load, obtidos a partir de um teste de Coastdown. Junto a uma simulação computacional no software Ansys, é possível determinar o coeficiente de arrasto aerodinâmico. Os resultados demonstram que o sistema é efetivo na medição precisa das forças resistivas, gerando gráficos detalhados em função do Road Load. O coeficiente de arrasto calculado com o sistema é condizente com o esperado, validando a metodologia e fornecendo dados confiáveis para otimizar o desenvolvimento e desempenho do protótipo.

Palavras-chave: Road load. Coastdown. Baja SAE.

Abstract. This paper aims to develop an embedded system for data acquisition and analysis in order to determine and validate the Road Load model of a Baja SAE prototype, with a focus on analyzing the resistive forces to motion, such as aerodynamic drag, rolling resistance, and road gradient, to optimize vehicle performance. The telemetry system integrated into the prototype employs a Raspberry Pi 3B microprocessor and an Arduino UNO-based microcontroller to process and store rotational speed and velocity data collected by an inductive sensor. The analysis includes calculations of RPM, speed, and Road Load, obtained from a coastdown test. Additionally, a computational simulation using Ansys software is performed to determine the aerodynamic drag coefficient. The results demonstrate that the system is effective in accurately measuring resistive forces, generating detailed graphs as a function of Road Load. The drag coefficient calculated with the system is consistent with expected values, validating the proposed methodology and providing reliable data to support the optimization of the prototype's development and performance.

Keywords: Road load. Coastdown. Baja SAE.

1. INTRODUÇÃO

Como todo protótipo Baja SAE visa melhoria contínua, a busca pelo aprendizado e aprimoramento interno se reflete nas estratégias utilizadas pelas equipes para alcançar um nível mais alto a cada protótipo concebido. Para conseguir ter objetivos e metas claros no desenvolvimento de novos protótipos, faz-se necessário a coleta e tratamento de dados essenciais ao projeto.

O presente texto visa discorrer sobre uma das estratégias criadas para a determinação de alguns dos parâmetros necessários para a análise do comportamento dinâmico do protótipo, entre eles as curvas de Road Load e Coastdown, baseando-se na norma SAE J1263.

Para atender às necessidades do projeto, como dimensionamento do trem de força, tuning da transmissão CVT, validação de simulações computacionais e melhorias na dinâmica longitudinal, foi pensado em um sistema de captação de dados embarcado no protótipo, para coleta de valores de RPM do motor, velocidade de roda, velocidade de deslocamento e inclinação.

Obtendo o conjunto de forças que opõem ao movimento do veículo, além da aplicação no protótipo Baja SAE, estes parâmetros são necessários para determinação da potência e consumo energético em qualquer veículo automotor. Dessa forma, é possível utilizar os mesmos conhecimentos aqui aplicados para qualquer outro modal, levando até mesmo a uma análise de redução de poluentes e pegada de carbono.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema proposto seguiu uma abordagem experimental e computacional, fundamentada na necessidade de quantificar as forças resistivas ao movimento do veículo Baja SAE. O objetivo principal foi implementar um sistema embarcado de telemetria capaz de coletar dados precisos de velocidade e rotação, e utilizar essas informações para determinar o modelo de *Road Load* por meio de ensaios experimentais (*coastdown*) e simulação computacional. A equipe definiu como critérios essenciais para o sistema: confiabilidade na aquisição dos dados, baixo custo de implementação, facilidade de manutenção e integração ao protótipo. Com base nesses critérios, optou-se por um sistema híbrido, envolvendo um microcontrolador Arduino UNO e um microprocessador Raspberry Pi 3B, aproveitando a infraestrutura eletrônica já embarcada no veículo.

A coleta de dados foi realizada utilizando um sensor indutivo PNP, modelo LJ12A3-4-Z/BY, que detecta pulsos gerados por uma roda fônica de 36 dentes integrada ao disco de freio do veículo. Como cada dente é seguido por um espaço, são detectados 72 pulsos por rotação do eixo, o que permite elevada resolução de posicionamento. O Arduino foi programado para monitorar as transições de sinal, armazenando os tempos entre pulsos por meio da função millis(), utilizando um cristal de quartzo de 16 MHz. Com base nesses dados, foram calculadas, velocidade linear, a partir da circunferência do pneu, período da rotação, frequência e RPM do eixo. Para reduzir ruídos nas medições, foi implementado um filtro de média aritmética com descarte de valores fora do padrão estatístico, aumentando a confiabilidade dos dados adquiridos.

Os dados coletados foram enviados do Arduino para o Raspberry Pi via comunicação serial. Uma aplicação em Python foi desenvolvida para realizar a aquisição contínua dos dados, armazenando os vetores de tempo e velocidade. A coleta era iniciada automaticamente quando o veículo atingia 40 km/h e encerrada quando a velocidade atingia a zero, caracterizando o ensaio de *coastdown* conforme a norma SAE J1263.

Com os dados de velocidade em função do tempo, foi possível obter numericamente a aceleração e o deslocamento total durante o ensaio. A partir disso, foram calculados os termos integrantes para determinar a força resistiva total (*Road Load*), representada pela equação:

$$F_{\text{tração}} = F_{\text{aerodinâmica}} + F_{\text{rolagem}} + F_{\text{gradiente}} \quad (1)$$

Onde $F_{\text{aerodinâmica}}$ é a força de resistência aerodinâmica exercida sobre o carro, F_{rolagem} é a força de resistência a rolagem, exercida pelo conjunto de dinâmica longitudinal do carro, e $F_{\text{gradiente}}$ é a força exercida para vencer uma dada inclinação. Essas forças foram calculadas utilizando as equações clássicas da dinâmica veicular. O gráfico resultante da força total resistiva em função da velocidade foi ajustado por um polinômio de segundo grau, com a seguinte forma:

$$RL = A \cdot V^2 + B \cdot V + C \quad (2)$$

Obtendo assim os coeficientes relacionados a Força de arrasto Aerodinâmico (A), o coeficiente da força de atrito dinâmico (B), e o coeficiente de Resistência à Rolagem (C). Utilizando a estimativa da força de arrasto, foi estimado o coeficiente de arrasto do protótipo pela equação:

$$C_d = \frac{2A}{\rho A_f} \quad (3)$$

A partir de uma simulação computacional de elementos finitos realizada no software Ansys, utilizando um modelo 3D de desenvolvimento do protótipo, buscou-se validar o C_d obtido computacionalmente, com resultados concomitantes.

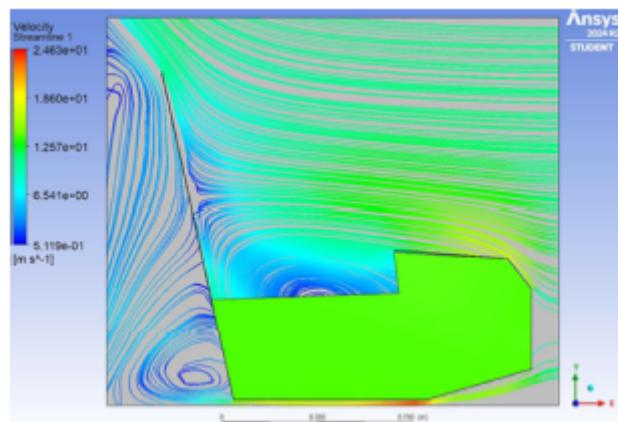


Figura 1 - Simulação do fluxo de ar no protótipo.

Um script em python foi escrito utilizando das bibliotecas Numpy e Matplotlib para realizar a análise dos dados e para plotar os gráficos de interesse do estudo.

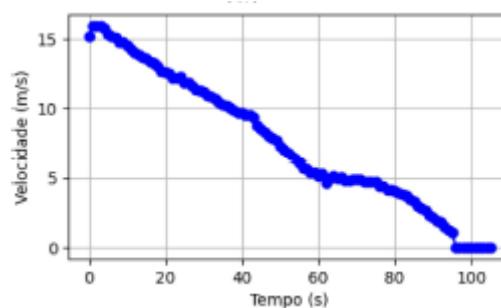


Figura 2 - Gráfico Velocidade do protótipo x Tempo.

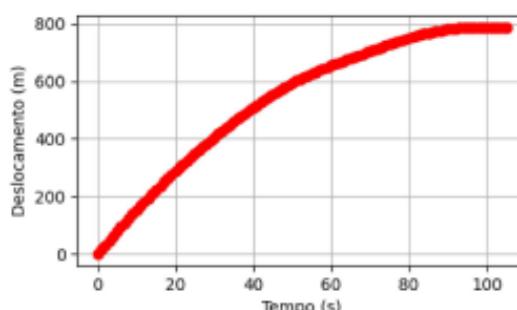


Figura 3 - Gráfico Deslocamento do protótipo x Tempo.

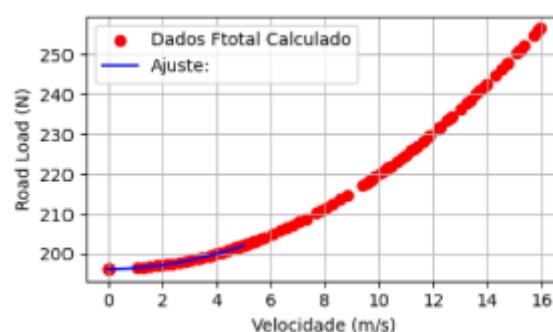


Figura 4 - Gráfico Road Load x Velocidade.

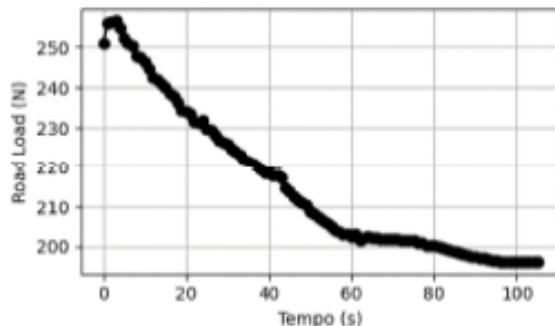


Figura 4 - Gráfico Road Load x Tempo.

A partir do gráfico de Road Load por Velocidade, foi realizado um ajuste de curva para obter os coeficientes A, B e C experimentais, obtendo como resultados estimados:

$$\begin{aligned} A &= 0,7214 \text{ Kg/m} \\ B &= 0,000 \text{ Kg/s} \\ C &= 196,200 \text{ N} \\ Cd &= 1,093 \end{aligned}$$

3. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho foi possível desenvolver um sistema de coleta e análise de dados de acordo com as expectativas do projeto. O sistema foi efetivo e se enquadrou dentro do grau de precisão desejado. A partir disso, foram elaborados os gráficos de movimento de Road Load atuante no protótipo, necessários para a análise e para o modelo de ajuste da equação de Road Load, obtendo então os coeficientes requisitados para um modelo de análise válido para aproximação em futuros protótipos, ou como base para aplicação em outros veículos.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a toda a Equipe LondriBaja, que, orientados pela Profa. Dra. Janaina Fracaro e pela Profa. Dra. Elisabeth Hashimoto, tornaram essas ideias possíveis. Também é necessário um especial agradecimento ao Engenheiro Eletricista Igor Guizelini, pelo conhecimento e auxílio durante o desenvolvimento do sistema de sensoriamento.

4. REFERÊNCIAS

- DIAS, J., 2011. Módulo: Transmissões. Curso de Especialização em Engenharia Automotiva –
UTFPR, Curitiba.
- GILLESPIE, T. D., 1992 Fundamentals of Vehicle Dynamics. First edition. ed. Warrendale: Society of Automotive
Engineers, Inc.
- JAZAR, R. N., 2008. Vehicle Dynamics: Theory and Application. Riverdale: Springer.
- MILIKEN, William F. Douglas L. MILIKEN, 1995. Race Car Vehicles Dynamics”, Warrendale, Society of Automotive
Engineers.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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