



DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE DE MOTORES ELÉTRICOS E AQUISIÇÃO DE DADOS EM UMA BANCADA DINAMOMÉTRICA EM ESCALA REDUZIDA

Palavras-Chave: Controle, Dinamômetro, Torque, Rotação, Motores elétricos, Aquisição

Autores(as):

Giovani Moreira da Silva, FEM – Unicamp

Maria Augusta de Menezes Lourenço, FEM – Unicamp

Prof^a. Dr^a. LUDMILA CORRÊA DE ALKMIN E SILVA, FEM – Unicamp

1. INTRODUÇÃO

Os veículos automotores de quatro rodas representam um dos meios de transporte mais utilizados no Brasil. Portanto, para avaliar o seu funcionamento adequado bem como aprimorar suas características, os dinamômetros de chassi representam as principais plataformas de análises de veículos. Os dinamômetros de chassi permitem realizar testes de consumo de combustível, durabilidade, desempenho, emissões de poluentes e emular condições externas (Bertoti, 2018), entre outras possibilidades, auxiliando nos testes padronizados definidos pela norma NBR6601 (ABNT, 2012). Dessa forma, proporcionam condições experimentais controladas, auxiliando o desenvolvimento e regulação pela indústria e pelas instituições de pesquisa (Eckert et al., 2017; Bertoti et al., 2019).

Ainda nesse contexto e compreendendo a relevância do tema, uma nova abordagem de testes em escala reduzida foi proposta por Lourenço (2020) por meio do projeto de um dinamômetro de chassi em escala reduzida, plataforma tomada como base para a atual pesquisa. A abordagem em escala reduzida se apresenta como uma alternativa para a realização de testes preliminares de forma mais rápida e com custo reduzido. Entre as principais características têm-se 2 rolos para cada pneu, ocasionando em um contato duplo, ligados por eixos aos motores e aos pontos de medição de rotação e torque, as distâncias de bitola e entre-eixos ajustáveis para diferentes protótipos, além de uma correia para sincronia entre as rotações dos rolos dianteiros e traseiros.

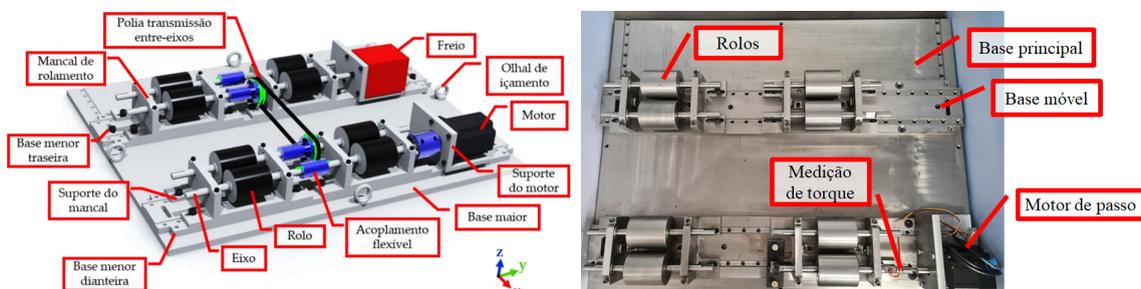


Figura 1 - Visão da base do dinamômetro enfatizando as placas e seus ajustes (Lourenço, 2020).

2. MEIOS E MÉTODOS

2.1 Aquisição de dados

Esta pesquisa, por se basear em componentes rotativos, as principais grandezas de análise são a rotação e o torque. Na bancada, analisar a resposta do veículo com relação a sua aceleração e frenagem

é o foco da pesquisa. Com a leitura de rotações será feita a análise de velocidade instantânea e aceleração do veículo em teste, com a leitura de torque será feita a análise do esforço realizado pelo protótipo no sistema e com os atuadores eletromecânicos a resposta para simulação de diversas situações de pista. Essas informações são de extrema importância para validar que as simulações realizadas na bancada com o veículo em escala sejam representativas das condições reais de operação de um veículo.

4.2.1 Medição de torque

Para a medição de torque, a abordagem foi o uso de extensômetros (*strain gauges*), transdutores que variam sua resistência elétrica de acordo com a deformação da estrutura. A variação da resistência elétrica em um circuito de ponte de Wheatstone gera um sinal de saída de tensão elétrica proporcional à deformação no ponto de medição e, portanto, proporcional ao torque aplicado. Na pesquisa desenvolvida por Lourenço (2020) a medição por meio de extensômetros foi escolhida, pela facilidade de manuseio, precisão (Andolfato, Camacho e Brito, 2004), e versatilidade, permitindo ser adaptada a cada sistema específico e para diferentes aplicações (Ribeiro, 2016). A leitura do sinal desse componente é um dos maiores desafios por se tratar de um elemento que irá ler a deformação e se comunicar com um computador externo em tempo real.

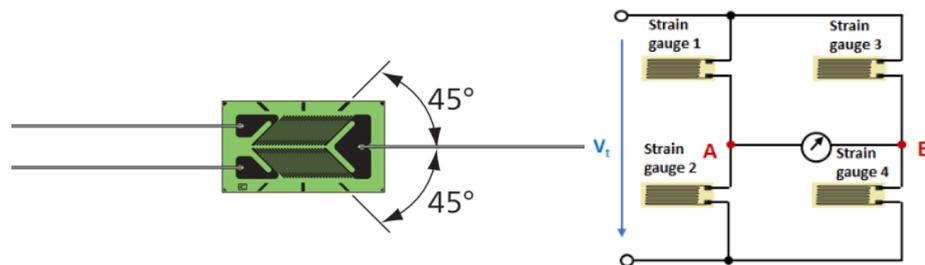


Figura 2 – Imagem do Extensômetro para medição de torque e da ponte de Wheatstone -
Fonte: <https://learnchannel-tv.com/pt/tecnologia-de-sensor/ponte-de-wheatstone/ponte-de-wheatstone-com-strain-gauges-extensometros/> Acesso em: 24 jul. de 2023

4.2.2 Medição de rotação

Uma das principais possibilidades de medição de rotação é por meio de *encoders* do tipo óptico interruptivo, por ser um dispositivo simples e com aplicação difundida, de baixo custo. A medição de rotação por meio do encoder acontece pela interrupção de luz infravermelha por um disco vazado (um obstáculo à passagem da luz). O receptor do encoder detecta que a luz do emissor não foi recebida, gerando pulsos elétricos proporcionais à rotação (Webster e Eren, 2014).

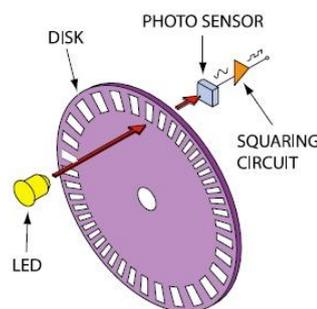


Figura 3 – Funcionamento do encoder e imagem do Photo Sensor utilizado -
Fonte: <https://www.analogictips.com/rotary-encoders-part-1-optical-encoders/>
Acesso em 24 jul. de 2023.

2.2 Controle dos motores elétricos

Para a bancada base desta pesquisa, foi definido por Lourenço (2020) a utilização de motores elétricos de passo por apresentarem um controle de posição mais preciso, quando comparado às demais

opções. A aplicação desses motores no dinamômetro de chassi em pequena escala visa representar carregamentos externos como resistência ao aclave e resistência aerodinâmica (Eckert, 2017).

Entre as principais estratégias de controle presentes na literatura, a utilização do controle do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) se destaca devido a sua capacidade de ajuste para diferentes aplicações de acordo com seus coeficientes (proporcional, integral e derivativos). Assim, para minimizar o erro entre a curva desejada e a real, a soma dos termos ponderados pelos coeficientes, quando adequadamente ajustados, faz o sinal convergir para o desejado atenuando o erro final (Gomes, 2008). A formulação desse controlador é apresentada na Equação (1).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Equação 1– Equação correspondente ao controle PID.

Onde K_p é o ganho proporcional do sistema, que ajusta a intensidade da resposta proporcional do controle do erro; K_i é o ganho integral, que controla a soma de acúmulo de erros no sistema; e por fim, K_d é o ganho derivativo que controla a resposta de aos erros ao longo do tempo (t).

3. RESULTADOS

A Figura 4 mostra o estado atual da bancada, com a adição de acoplamentos, correia, sistema de medição de torque e acabamento da superfície dos rolos, bem como o protótipo de veículo (elaborado no trabalho de Lourenço, 2020), sendo clara a evolução quando comparada com o estágio apresentado na Figura 1. Além disso, toda a parte de aplicação e controle dos motores, tratamento de dados no Matlab/Simulink® também já está implementada e desenvolvida. Parte dessa evolução foi elaborada e desenvolvida durante este projeto de pesquisa, como será detalhado a seguir.

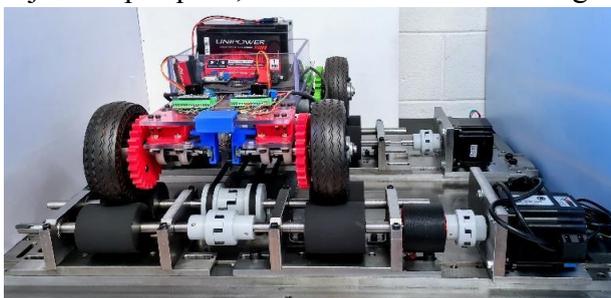


Figura 4 – Estado atual da construção do dinamômetro de chassi em pequena escala.

3.1 Medição de torque

A Figura 5 apresenta o aprimoramento do sistema de medição de torque. Para a otimização do protótipo anteriormente desenvolvido, foi adicionado um sistema que consistia na utilização de uma bateria de lítio, simplificando e adicionando uma capacidade de tempo de leitura superior ao desenho original com pilhas AAA. Essa modificação trouxe um ganho significativo, aumentando em 78,6% o tempo de operação do sistema, saindo de cerca de 2 horas e 24 minutos para algo em torno de 4 horas de operação ininterrupta, além de possibilitar tornar o sistema recarregável e fechado, não necessitando realizar constantes manutenções das pilhas e diminuindo o impacto no descarte após o uso.

A Figura 5 apresenta o novo sensor de torque, já com a utilização da bateria de lítio e a alocação dos componentes. Com um conjunto mais robusto e com maior tempo de leitura disponível, foi possível gerar o gráfico de medições estáticas preliminares para avaliar o funcionamento do sistema. O teste para avaliar a funcionalidade do sistema consistiu no travamento dos rolos, e a alocação de um braço de alavanca onde foi possível acrescentar pesos padronizados, podendo validar as leituras realizadas pelo sistema de medição de torque. O gráfico da Figura 5 apresenta a leitura realizada. O pico observado por

volta do oitavo segundo, corresponde a inicialização do sistema e oscilação do braço, dessa forma não afeta as leituras posteriores.

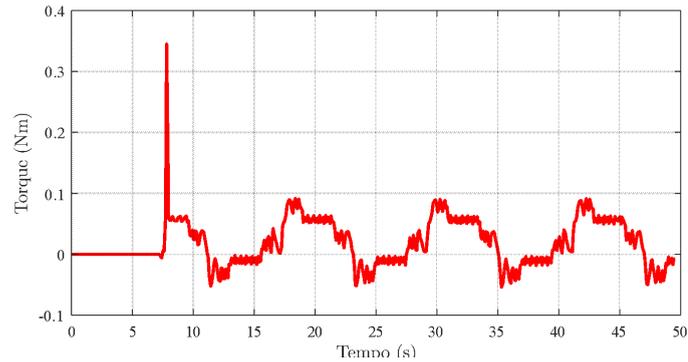
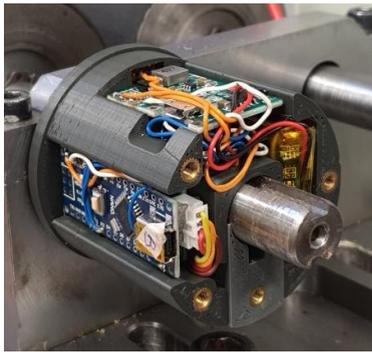


Figura 5 – Sistema de medição de torque após as modificações e gráfico de medição preliminar.

3.2 Controle dos motores elétricos e medição de rotação

Com o objetivo de descrever a relação entre o número de pulsos e velocidade do motor elétrico, e compreender a resposta do motor aos pulsos de controle fornecidos pelo microcontrolador foi realizado um levantamento de alguns pontos com o auxílio de um tacômetro. Esses pontos foram então exportados para o MatLab®, onde foi possível realizar a descrição dessa curva por uma função característica. O gráfico da Figura 6 ilustra a curva obtida.

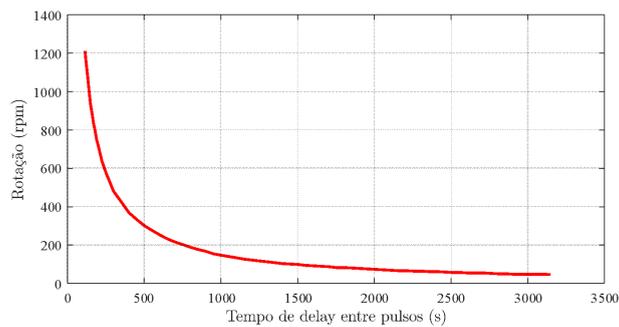


Figura 6 – Curva de pulsos por rotação do motor elétrico.

A curva levantada será usada na implementação da simulação na bancada e na resposta dos motores. Conjuntamente, foi desenvolvido um controle PID simples para fazer o controle de velocidade dos motores de passo da bancada para gerar a leitura de torque com o veículo em escala. Ambos motores possuem um sensor para leitura de quantidade de pulsos. Para realizar a leitura foi obtido por meio de manufatura aditiva, usando a tecnologia de impressão 3D, um disco de 20 fendas para a leitura com o *encoder* óptico. Assim, foi possível estipular a velocidade em RPM dos rolos na bancada e implementar a malha de feedback do controle, que foi validada através da leitura externa com um tacômetro digital.

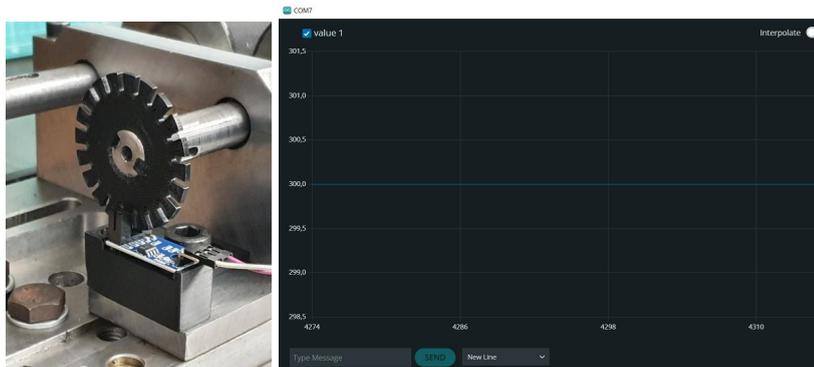


Figura 7 – Posicionamento do *encoder* nos rolos, lendo a rotação em 300 RPM com o controle PID.

4. CONCLUSÃO

No contexto da constante evolução tecnológica que o meio automotivo vem apresentando ao longo dos anos e da dificuldade de introduzir veículos mais eficientes no mercado, a pesquisa visa tornar mais simples e rápido o processo de execução de novos veículos em fabricação de larga escala, principalmente na validação dos parâmetros dinâmicos desejados. Visando essa questão, foi feita a construção da bancada de testes, onde foi avaliado a necessidade e aplicação de um sistema atuante para adquirir informações que pudessem gerar análises do protótipo em escala. Utilizando sensores de medição de torque e rotação combinados com um conjunto de atuadores usando motores de passo, a bancada é capaz de gerar esforços no protótipo que simulam as condições de um veículo em escala real, além de possibilitar a análise dos dados de desempenho do veículo. Com a bancada montada foi possível testar individualmente cada sistema e adquirir os dados dos sensores de maneira satisfatória. Essa aquisição possibilitará, na fase de testes do veículo em escala, o cumprimento da rotina de testes previamente definida.

1. REFERÊNCIAS

- ABNT. **Veículos rodoviários automotores leves - determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**. NBR 6601, 2012.
- ALDY, J.; KOTCHEN, M.; EVANS, M.; FOWLIE, M.; LEVINSON, A. e PALMER, K. Cobenefits and regulatory impact analysis: **Theory and evidence from federal air quality regulations**. Environmental and Energy Policy and the Economy, v. 2, 117–156, 2021.
- ANDOLFATO, Rodrigo Piernas, CAMACHO, Jefferson Sidney, BRITO, Gilberto Antônio, 2004. **Extensometria básica. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural** – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – SP, p. 46.
- BERTOTI, Elvis. **Caracterização Dinâmica de uma Bancada Dinamométrica Veicular de rolos Duplos**. 2018. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Eng. Mecânica, Departamento de Sistemas Integrados, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.
- DONG, X.; ZHANG, B.; WANG, B. e WANG, Z. **Urban households' purchase intentions for pure electric vehicles under subsidy contexts in china: Do cost factors matter?** Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 135, 183–197, 2020.
- ECKERT, Jony Javorski. **Desenvolvimento de bancada dinamométrica para validação da influência da estratégia de troca de marchas na dinâmica veicular longitudinal**. 2017. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- ECKERT, J. J., BERTOTI, E., COSTA, E. S., SANTICIOLLI, F. M., YAMASHITA, R. Y., SILVA, L. C. A., DEDINI, F. G., 2017. **Experimental Evaluation of Rotational Inertia and Tire Rolling Resistance for a Twin Roller Chassis Dynamometer**. SAE Technical Papers, pp. 1-12.
- Frota de Veículos 2023. **Ministério dos Transportes, SENATRAN - Secretaria Nacional de Trânsito, RENAAM-Registro Nacional de Veículos Automotores**. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2023>>.
- KUTZ, M., **Mechanical Engineers' Handbook**, Vol. 2: Instrumentation, Systems, Controls, and MEMS, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2005, 928p.
- LOURENÇO, Maria Augusta de Menezes. **Desenvolvimento de dinamômetro de chassi para testes de veículos/robôs em pequena escala**. 2020. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Eng. Mecânica, Campinas, SP.
- MORRIS, A. S., **Measurement and Instrumentation Principles**, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2001.
- SEPEHRI, Nariman. **Demonstration of an Aspect of Data Acquisition in Mechatronics Education**. 2001. Disponível em: <<https://www.ijee.ie/articles/Vol17-6/IJEE1257.pdf>>. Acesso em: 09 de maio de 2023.
- WEBSTER, G. J., EREN, H., **Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal and Radiation Measurement**, 2nd ed. CRC Press - Taylor & Francis Group, 2014.
- GOMES, Sérgio Augusto Pereira, **Comparação entre método de identificação de plantas com resposta ao degrau monotonicamente crescente e sintonia de controladores PID**, 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2008.