

METODOLOGIA DE INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA E MEDIÇÃO DE POTÊNCIA EM EIXOS DE TRANSMISSÃO: APLICAÇÕES EM MAQUINÁRIO AGRÍCOLA E DE TERRAPLANAGEM

Gilberto P. Zluhan^{1*}, Antonio da Silva¹, Alexandre M. Ferreira¹, Dhyonatan S. Freitas¹, Fabiana R. R. Padilha¹
¹ Centro Universitário SENAI Santa Catarina – Campus Joinville

1. Introdução

O monitoramento do desempenho energético em sistemas rotativos é fundamental para o desenvolvimento de máquinas pesadas mais eficientes. Em aplicações de alto torque, como em colhedoras de grande porte ou tratores de terraplanagem, os eixos de transmissão são submetidos a regimes de carga estocásticos e ambientes agressivos [1]. Tradicionalmente, a validação desses sistemas ocorre em bancadas dinâmométricas controladas. Entretanto, existe uma lacuna tecnológica significativa na transição para o campo: a dificuldade de manter a integridade dos sinais de sensores em rotação e a repetibilidade das medições sob vibração severa. O problema de pesquisa reside na obtenção de dados de potência com confiabilidade que permitam comparar diferentes configurações de projeto em tempo real. Este trabalho justifica-se pela necessidade de reduzir coeficientes de segurança excessivos, promovendo a redução de peso e consumo de combustível, essenciais para a sustentabilidade industrial [2]. A medição de torque fundamenta-se na relação entre a deformação superficial e o momento torsor aplicado em um eixo circular. O estado da arte aponta para uma transição de sistemas de telemetria indutiva para soluções de baixo custo com transmissão via rede CAN (*Controller Area Network*) ou sistemas *wireless* de alta frequência [4,6]. Contudo, em eixos de alto diâmetro submetidos a torques elevados (acima de 10.000 Nm), o uso de *slip rings* de baixa impedância ainda oferece a melhor relação sinal-ruído para experimentos de curta duração [3]. Pesquisas recentes destacam que os erros em medições indiretas (via pressão hidráulica ou corrente de motor) pode chegar a 15%, enquanto a extensometria direta mantém incertezas abaixo de 2% [7].

2. Experimento

A pesquisa adotou uma abordagem quantitativa e aplicada com testes em laboratório. A potência (P) foi calculada conforme a Equação 1, onde P é a potência em kW, T é o torque em Nm e rpm é a rotação do eixo [1].

$$P = \frac{T * rpm}{9550}$$

A instrumentação e aquisição de dados, utilizaram extensômetros (*strain gages*) e foram colados no eixo a 180 graus entre si conforme Figura 1 [5]. A fixação utilizou adesivos de cianoacrilato de alta resistência e proteção com camada de borracha butílica. A transmissão dos sinais (rotativo) para o sistema de aquisição (fixo) foi realizada via coletor rotativo (*slip ring*). A rotação foi obtida via sensor indutivo de alta resolução posicionado em engrenagem adjacente ao eixo. O procedimento de calibração e tratamento de dados foi realizada *in loco* por meio de braço de alavanca e pesos padrões para determinar a constante de escala (mV/V para Nm). Os testes em campo envolveram ciclos de operação real: em diferentes velocidades para máquinas agrícolas e movimentação de carga para equipamentos de terraplanagem. Os dados foram selecionados via filtro passa-baixa para remoção de ruídos de alta frequência inerentes à vibração mecânica.

3. Resultados e Discussão

A aplicação do método permitiu mapear o perfil de potência consumida em diferentes fases da operação. A Figura 2 apresenta os dados obtidos de uma máquina *baseline*. Observou-se que, embora o padrão *baseline* apresente picos de torque durante a entrada em carga, a estabilização energética ocorre de forma eficiente, sugerindo uma melhoria no escalonamento das marchas ou na resposta do sistema de transmissão.

*Autor correspondente: gilberto.zluhan@edu.sc.senai.br

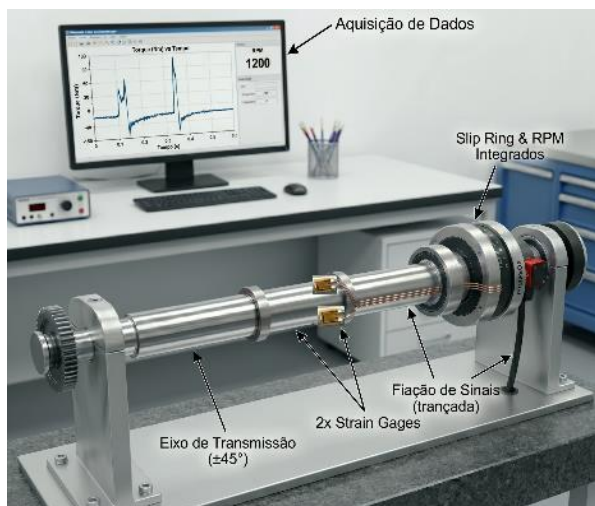


Figura 1. Detalhe da instrumentação no eixo.

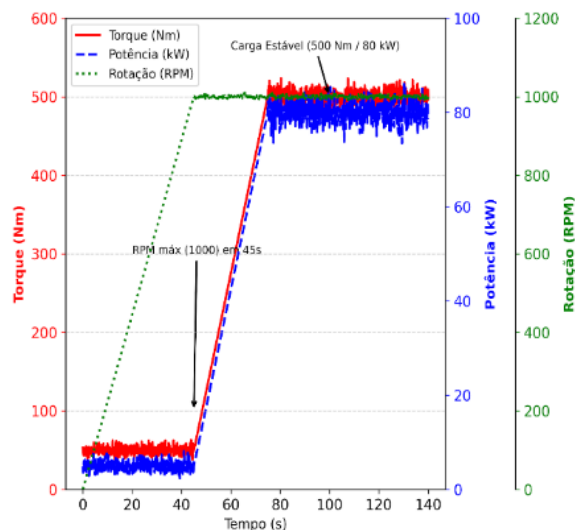


Figura 2. Amostragem da resposta de Torque (Nm), Potência (kW) e Rotação (rpm).

A repetibilidade do método foi de 98,5% entre as rodadas de teste, confirmando que a metodologia é robusta o suficiente para servir como padrão em protocolos de validação de engenharia de campo. A expansão da análise para equipamentos de terraplanagem revelou que o comportamento dinâmico do torque é significativamente mais impactante na fadiga dos eixos do que o valor médio de potência, reforçando a necessidade de instrumentação dinâmica em vez de estimativas estáticas.

4. Considerações Finais

O estudo demonstrou que a integração de extensometria de precisão com sistemas de aquisição robustos é viável para ambientes severos de máquinas pesadas. Como contribuição, o trabalho fornece um guia metodológico para reduzir a lacuna entre o projeto assistido por computador (CAE) e o desempenho real. A expansão para o setor de terraplanagem mostrou-se pertinente, validando a versatilidade da técnica para diferentes áreas da Engenharia Mecânica e Tecnologias Industriais.

5. Referências

- [1] Hibbeler, R. C. Resistência dos Materiais. 10. ed. Pearson, 2018.
- [2] Balbinot, A.; Brusamarello, V. J. Instrumentação e Fundamentos de Medidas. LTC, 2019.
- [3] Fraden, J. Handbook of Modern Sensors. 5th ed. Springer, 2016.
- [4] Lima Filho, A. C. et al. Self-powered telemetric torque meter. *Journal of Dynamic Systems*, v. 133, 2011.
- [5] Santos, J. M. et al. Instrumentation and Field Testing of Heavy Machinery. *Journal of Agricultural Engineering*, v.52, n. 3, 2023.
- [6] Zhang, Y. et al. Wireless torque measurement in rotating shafts. *Sensors*, 2020.
- [7] Patel, H.; Singh, R. Real-time torque monitoring systems. *Measurement*, 2021.