

## Aplicação de sistema de aquecimento de rolamentos para redução de variabilidade de ensaios em motores de corrente contínua sem escovas<sup>★</sup>

João P. Z. Machado<sup>\*</sup> Rodolfo C. C. Flesch<sup>\*</sup> Mauricio M. Schaefer<sup>\*\*</sup>  
Gabriel Thaler<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, (e-mails: joao.zomer.m@posgrad.ufsc.br, rodolfo.flesch@ufsc.br, thaler.gabriel@posgrad.ufsc.br).

<sup>\*\*</sup> Nidec Global Appliance, R&D Labs, Joinville, SC, (e-mail: mauricio.m.schaefer@nidec-ga.com).

---

**Abstract:** This paper presents an experimental study on the impact of the temperature of bearings employed in a dynamometer bench for motor performance testing on the test results. To evaluate the relationship between the variables, an automatic test bench capable of measuring small variations of electric power was developed, adapted with a heating system for the motor bearings. The tests were performed with low-power brushless DC motors (electric power of about 10 W) and with grease lubricated metal ball bearings. The results showed that raising the operating temperature of the bearings to a point above that they would naturally reach during operation guarantees a fixed condition for the tests, thus reducing the variability of electrical power between tests from 0.82% to 0.04%. As a consequence, the use of the temperature control system for the bearings is capable of reducing the power variability within a test, as well as guaranteeing that tests performed in different time instants are under the same condition. Those characteristics enable the possibility of performing consecutive tests and improve the reproducibility of the test results.

**Resumo:** Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre o impacto da temperatura dos rolamentos de mancalização empregados em uma bancada de dinamômetro para ensaio energético de motores nos resultados dos ensaios. Para avaliar a relação entre as variáveis, foi desenvolvida uma bancada automática de ensaios capaz de medir pequenas variações de potência elétrica, adaptada com um sistema de aquecimento dos rolamentos de mancalização do motor. Os ensaios foram realizados com motores de corrente contínua sem escovas de baixa potência (na ordem de 10 W) e com rolamentos de esferas metálicas lubrificadas com graxa. As avaliações realizadas mostraram que elevar a temperatura de operação dos rolamentos para um ponto acima do que atingiriam naturalmente durante a operação garante uma condição fixa para os ensaios, reduzindo a variabilidade de potência elétrica entre ensaios de 0,82% para 0,04%. Deste modo, a utilização do sistema de controle de temperatura dos rolamentos é capaz de reduzir a variabilidade da potência dentro de um ensaio, bem como garantir que ensaios realizados em períodos diferentes estejam na mesma condição, ampliando a possibilidade de realização de ensaios consecutivos e favorecendo a comparação de resultados de ensaios realizados em períodos diferentes.

*Keywords:* dynamometers; bearings; temperature control; friction loss.

*Palavras-chaves:* dinamômetros; rolamentos; controle de temperatura; perdas por atrito.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Motores elétricos de corrente contínua sem escovas estão presentes em um grande espectro de aplicações, desde

refrigeração até a indústria aeroespacial, por conta da alta eficiência energética, da alta razão de torque por unidade de corrente, da resposta dinâmica rápida, da baixa necessidade de manutenção e da alta durabilidade que apresentam (Ziaeinejad et al., 2011). Esse tipo de motor também possibilita soluções otimizadas para cada aplicação, de maneira superior ao motor de corrente contínua convencional, dada sua ampla faixa de operação de velocidade angular e torque (Derammelaere et al., 2017), resultado da comu-

---

<sup>\*</sup> Este trabalho foi apoiado pela Nidec Global Appliance, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do projeto 432116/2018-4, e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

tação eletrônica, tipicamente realizada por um inversor de frequência (Viswanathan e Jeevanathan, 2014).

Como o rendimento desses motores está cada vez maior, as variabilidades do sistema de medição de potência, e consequentemente de rendimento, são cada vez mais críticas para a correta avaliação desses produtos, dado que são esperados pequenos incrementos de eficiência como resultado de esforços de pesquisa (Aarniovuori et al., 2014). Assim, variabilidades inerentes à bancada de ensaio de motores podem se confundir com os pequenos incrementos de eficiência esperados, o que dificulta a correta caracterização desses incrementos. A incerteza do sistema de medição também é uma preocupação ao lidar com normalização de produtos, pois os ensaios de rendimento devem ser realizados com a menor incerteza possível para permitir uma classificação correta nas classes de eficiência definidas nas normas locais (Caruso et al., 2021).

Embora parte dos motores já possua seu próprio sistema de mancalização, aqueles presentes em aplicações especiais dependem da mancalização disponível no produto final. No caso de motores elétricos utilizados em compressores de refrigeração, por exemplo, o rotor é acoplado ao sistema de compressão do fluido refrigerante e tem seu próprio mancal na estrutura do compressor. Assim, para a realização de ensaios que caracterizem somente o motor, se faz necessário o uso de uma mancalização auxiliar que permita o seu funcionamento padrão (Machado, 2018). Nesse caso, o mais comum é que sejam empregados dois rolamentos de esferas para garantir o movimento rotacional livre do eixo juntamente com o rotor (Henao-Sepulveda et al., 2005).

Nos rolamentos de esferas existem quatro elementos: as pistas interior e exterior, o elemento rolante e a gaiola. A interação entre os elementos rolantes e as pistas é definida como um movimento de rolagem, enquanto a interação entre os elementos rolantes e a gaiola é definida como um movimento de deslizamento, sendo a interação entre elementos rolantes e a gaiola a que gera um atrito mais elevado no comportamento dos rolamentos (Henao-Sepulveda et al., 2005). Durante a operação, o atrito entre os elementos resulta em uma perda de energia no movimento rotacional, verificado pelo acréscimo de temperatura dos elementos do rolamento – de maneira mais perceptível na gaiola do rolamento – caracterizando esse fenômeno como torque de arrasto, que se opõe ao movimento do eixo (Nagore, 2014). Tal variação da temperatura afeta diversos parâmetros críticos dos rolamentos relacionados ao desempenho, como viscosidade do lubrificante, capacidade de carga e distribuição de carga, refletidos em variação de potência durante sua operação (Takabi e Khonsari, 2013).

Quando o torque imposto pelo rolamentos é fixo, a perda mecânica resultante é compensada para que se possa determinar a eficiência do motor. Entretanto, com a variação de temperatura afetando o desempenho dos rolamentos a parcela a ser compensada deixa de ser fixa ao longo do tempo. Assim, quando esses rolamentos são aplicados em bancadas de ensaio de baixo torque e baixa rotação – e consequentemente de baixa potência – o comportamento da temperatura passa a ser mais perceptível, e a minimização do seu impacto passa a ser mais relevante. Exemplos de ensaios comparativos que necessitam dessa configuração são as análises para desenvolvimento de inversores

de frequência, em que os ganhos de eficiência elétrica são baixos e incrementais, como a certificação de componentes eletrônicos, o desenvolvimento de modos de chaveamento e a comparação de parâmetros de controle do inversor, visto que são esperadas baixas variações de corrente, na ordem de 10 mA (Chuang et al., 2009). Além disso, para utilização do rolamento por longos períodos de tempo sem danos e degradação de desempenho, as características do rolamento devem ser identificadas e o lubrificante apropriado deve ser utilizado, o que pode não ser viável caso os rolamentos operem em diferentes condições durante os ensaios (Houper, 2002).

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da temperatura dos rolamentos de mancalização na variabilidade de ensaios de eficiência energética de motores de corrente contínua sem escovas. Para isto, foi desenvolvida uma bancada de ensaios automática para medição de pequenas variações de potência em ensaios, adaptada com um sistema de aquecimento dos rolamentos. A partir dos resultados experimentais, foi proposto um método de ensaio para reduzir a variabilidade das grandezas afetadas pela temperatura dos rolamentos.

O restante do trabalho é organizado como segue. Na seção 2 é apresentado o equacionamento das perdas por atrito em um rolamento, bem como o impacto que esse efeito tem nas grandezas de interesse em ensaios de eficiência de motores. Na seção 3 é apresentada a bancada de ensaios construída para avaliar pequenas variações de potência, juntamente com o sistema de aquecimento para minimizar variações entre ensaios. Na seção 4 é apresentado o procedimento seguido para a coleta de dados, bem como são apresentadas análises e discussões sobre os dados experimentais. Por fim, na seção 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, com um parecer sobre os benefícios e as limitações do emprego do método proposto.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A potência gerada por um motor sob ensaio ( $P_{elétrica}$ ) é igual à soma da potência mecânica ( $P_{mecânica}$ ), medida pelo dinamômetro, e do somatório de perdas ( $P_{perdas}$ ) (Kang et al., 2008), conforme:

$$\begin{aligned} P_{elétrica} &= P_{mecânica} + P_{perdas}, e \\ P_{perdas} &= P_{pm} + P_{pb}, \end{aligned} \quad (1)$$

com as perdas sendo subdivididas nesse trabalho em perdas relacionadas ao motor e perdas provenientes da bancada. As perdas no motor ( $P_{pm}$ ) são inerentes ao funcionamento do mesmo, como perdas no ferro (Mi et al., 2003) e na bobina (Thompson et al., 2010). As perdas na bancada ( $P_{pb}$ ) são relacionadas com a transmissão do movimento rotatório axial, sendo atribuídas no caso de dinamômetros passivos com o transdutor de torque em linha, o elemento de imposição de carga e os rolamentos utilizados (Valladolid et al., 2020). A perda de potência por atrito no rolamento, por sua vez, pode ser calculada segundo o modelo SKF (SKF, 2018) por:

$$P_{rolamento} = 1,045 \times 10^{-4} M\omega, \quad (2)$$

caso o momento de atrito total  $M$  seja conhecido. Nos rolamentos, o atrito é inferido a partir a resistência do rolamento ao movimento, definido como a soma dos atritos

rolante e deslizante do mecanismo com o atrito do lubrificante (Kim et al., 2015). Seu equacionamento é dado por:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{vedação} + M_{arraste}, \quad (3)$$

sendo  $M$  o momento de atrito total,  $M_{rr}$  o momento de atrito, que considera efeitos da quantidade de lubrificante e aquecimento por cisalhamento de entrada,  $M_{sl}$  o momento de atrito deslizante, que contabiliza os efeitos da qualidade e condição da lubrificação,  $M_{vedação}$  o momento de atrito das vedações e  $M_{arraste}$  o momento de atrito por perdas de arraste e agitação no lubrificante. Além disso, conhecendo o momento de atrito total, a geração de calor pode ser calculada por:

$$Q_f = \frac{2\pi\omega}{60}M, \quad (4)$$

sendo  $M$  o momento de atrito total definido em (3) e  $\omega$  a velocidade angular (Takabi e Khonsari, 2013).

Para avaliar o impacto da temperatura dos rolamentos na potência elétrica, foi realizado um ensaio aquecendo os rolamentos de mancalização de um motor por um meio externo. Após certo tempo de assentamento da temperatura, a fonte de calor foi removida e a resposta do sistema foi avaliada, com o motor elétrico em operação no ponto de carga. O comportamento temporal da temperatura do enrolamento e da potência elétrica são apresentados na Figura 1.

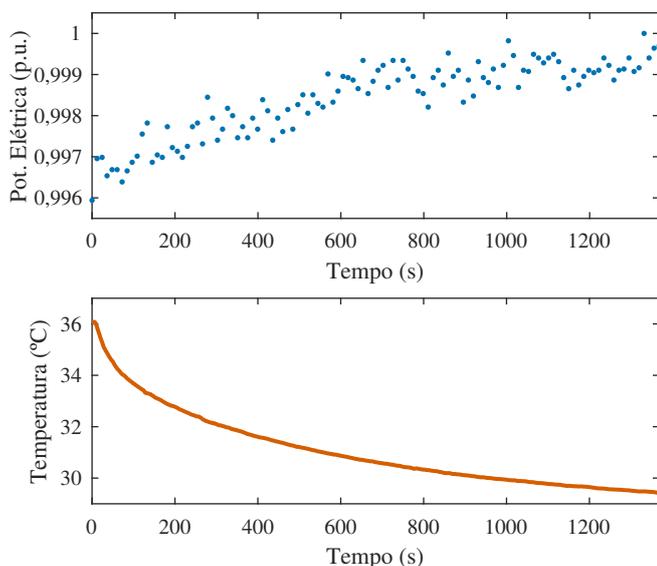


Figura 1. Resposta temporal da potência elétrica e temperatura média dos rolamentos. O ensaio foi realizado com carga fixa de 100 mNm e 1000 RPM.

Com base nos dados apresentados na Figura 1, é possível perceber o comportamento do rolamento. À medida que o rolamento esfria, o torque de atrito aumenta e, consequentemente, o motor elétrico precisa aumentar sua potência para manter uma mesma condição de torque. A relação entre temperatura do rolamento e potência elétrica pode ser mais claramente observada na Figura 2. Pelos dados, é possível calcular que uma queda de potência elétrica de 0,3% é esperada para um aumento de temperatura de cerca de 5 °C.

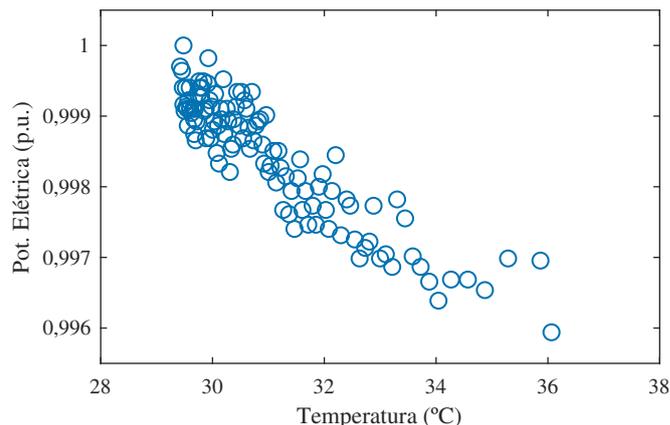


Figura 2. Relação entre potência elétrica e temperatura dos rolamentos, com base nos dados da Figura 1.

Vale ressaltar que, embora aconteça variação de temperatura tanto dos rolamentos como nas bobinas, esses efeitos não são refletidos nas medições de torque e velocidade angular durante o ensaio. Tal fato se deve às malhas de controle presentes no ensaio, que servem para garantir condições fixas de torque e velocidade angular. A Figura 3 apresenta o comportamento típico das variáveis torque e velocidade angular, utilizadas para cálculo da potência mecânica gerada. Ambas as variáveis são mantidas dentro de uma banda de  $\pm 0,5\%$  nos entornos do ponto de carga.

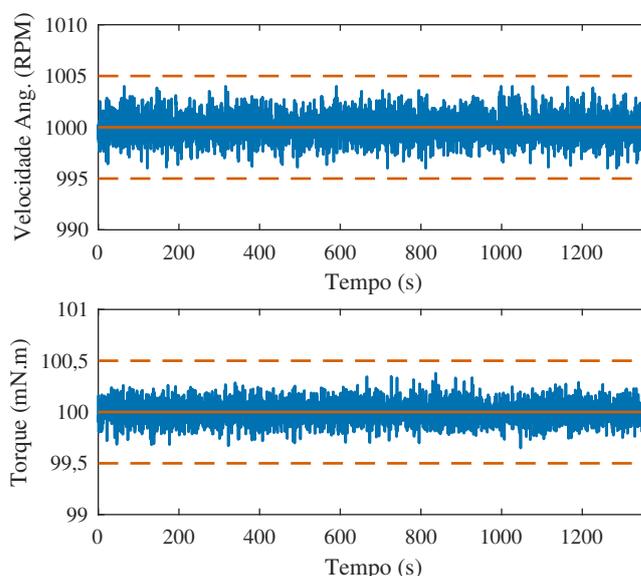


Figura 3. Comportamento das grandezas velocidade angular e torque, medidos no mesmo instante dos dados gerados na Figura 1.

### 3. BANCADA DE ENSAIOS

Esta seção discorre sobre a bancada utilizada para ensaios de eficiência energética em motores elétricos de corrente contínua sem escovas e sobre o sistema de aquecimento instalado para realização dos ensaios comparativos da temperatura de operação dos rolamentos, com e sem aquecimento.

### 3.1 Descrição do Sistema

Para investigar o comportamento térmico dos rolamentos utilizados, foi construída uma bancada de ensaio de motores elétricos. O equipamento foi concebido para operar com diferentes valores de carga no motor e realiza o controle das variáveis torque e velocidade angular para manipular as condições do ensaio. Quanto à construção da bancada, optou-se por utilizar a topologia de dinamômetro passivo – na qual o motor opera rotacionando o eixo e o freio impõe a carga no sistema (Killedar, 2012) – devido aos motores que são ensaiados. Tais motores são acionados por inversores de frequência com comunicação serial, sendo disponível para o usuário a função de aplicar uma determinada velocidade angular no eixo, regulada por uma malha de controle do próprio inversor de frequência. A bancada possui capacidade de rodar ensaios até 500 mNm e 4000 RPM, sendo dimensionada para motores de corrente contínua sem escovas aplicados na refrigeração doméstica.

Na instrumentação da bancada, utilizou-se um transdutor de torque em linha (Magtrol TMHS303) entre o eixo do motor sob ensaio e o eixo do freio de histerese (Magtrol AHB-1), com os elementos sendo conectados por acoplamentos flexíveis para correção de desalinhamentos. O transdutor de torque possui tanto uma saída analógica de torque quanto uma saída digital de *encoder*, para o cálculo da velocidade angular. A velocidade angular é definida por um inversor de frequência conectado ao motor de corrente contínua sem escovas e o torque é imposto pelo freio de histerese, alimentado por uma fonte de corrente contínua. Para medição das variáveis elétricas (tensão e corrente) e cálculo do consumo, é utilizado um wattímetro (Yokogawa WT230) com função de integração de potência no tempo, no esquema de ligação para medição por dois canais. Para análise das formas de onda das variáveis elétricas é utilizado um outro wattímetro (Yokogawa PZ4000), que possui frequência de aquisição muito mais alta, porém não disponibiliza possibilidade de integração por períodos maiores de tempo. A bancada conta, também, com medição de temperatura por termorresistores do tipo Pt100 em duas das bobinas do motor, nos dois rolamentos de mancalização do motor e no freio de histerese. O esquemático simplificado da bancada é apresentado na Figura 4, na qual estão apresentados também os rolamentos, definidos como “A” e “B”. A aquisição, o monitoramento e a análise dos dados são realizados utilizando um software próprio, desenvolvido em ambiente LabVIEW™, que também é responsável pela comunicação com os instrumentos, implementação das malhas de controle e acionamento de elementos auxiliares (como câmera, relés de alimentação e acionamento do sistema de resfriamento do freio de histerese).

### 3.2 Sistema de Aquecimento

Para controlar a temperatura dos rolamentos, foram utilizados resistores de aquecimento fixados no suporte que garante o alinhamento entre rotor, estator e rolamentos. O acionamento e controle de temperatura é feito por modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*), para controle do valor médio de uma fonte de alimentação. No sistema, ambos os resistores (um para cada rolamento) são acionados pelo mesmo sinal de

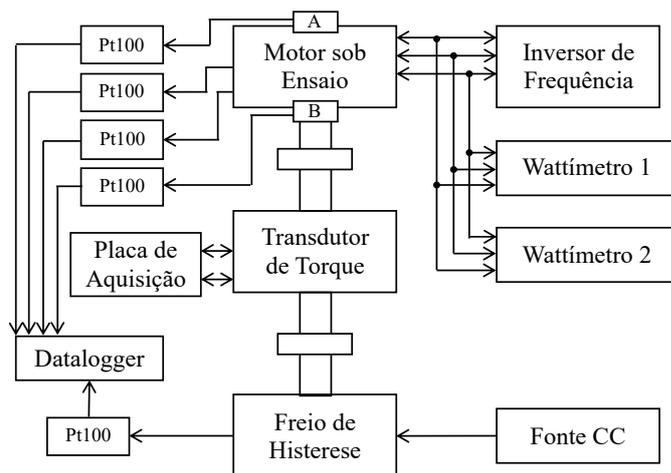


Figura 4. Esquemático simplificado da bancada.

PWM. Na Figura 5, é possível ver a instalação do sistema de aquecimento. Na Figura 5(a) é possível perceber o resistor de aquecimento envolvendo o suporte metálico onde está alojado um dos rolamentos, bem como os pontos de medição por Pt100. A Figura 5(b) se trata da mesma perspectiva da Figura 5(a), porém a aquisição foi feita com uma câmera térmica. É possível perceber pela escala térmica que o resistor de aquecimento atinge cerca de 150 °C, e transfere calor para os rolamentos indiretamente por meio do contato com o suporte metálico.

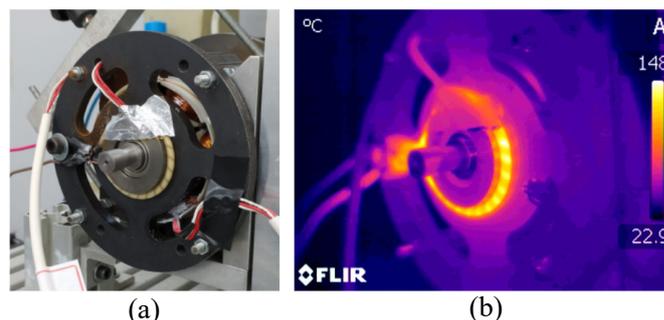


Figura 5. Sistema de aquecimento instalado para garantir a repetibilidade de resultados. (a) Instalação do resistor, envolvendo a peça que dá suporte ao rolamento. (b) Resposta térmica do sistema, averiguada por uma câmera térmica.

Para testar o sistema de aquecimento, foi imposta uma condição fixa no motor de 100 mNm e 1000 RPM, enquanto o resistor de aquecimento foi acionado com razão cíclica fixa de 25%. Com isso, foram medidos os dois pontos de temperatura da bobina, juntamente com a temperatura dos dois rolamentos. O comportamento do sistema é apresentado na Figura 6.

Analisando os dados da Figura 6 concluiu-se que a temperatura do sistema assenta após 4,5 h de ensaio na condição proposta, com a região de regime permanente em destaque. O valor médio e a variação após o regime permanente estão apresentados na Tabela 1. Pelos dados, constatou-se que o sistema é capaz de manter as temperaturas de interesse constantes após um certo intervalo de tempo, minimizando o impacto dessas variáveis na hora do ensaio. Após o assentamento das temperaturas, foram realizadas alterações

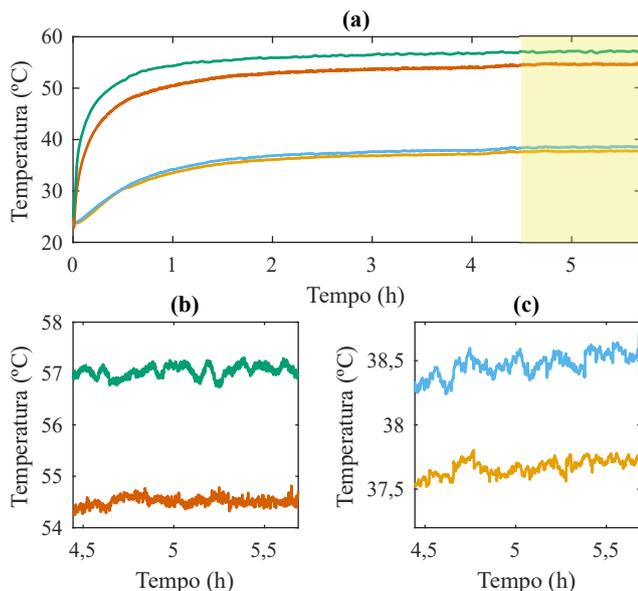


Figura 6. Assentamento de temperatura resultante do aquecimento do motor no ponto de carga. (a) Resposta das temperaturas dos rolamentos e das bobinas ao longo de todo o ensaio de aquecimento. A região em que as temperaturas estão em regime permanente está em destaque. (b) Detalhe do regime permanente das temperaturas dos rolamentos após aquecimento. (c) Detalhe do regime permanente das temperaturas das bobinas após aquecimento.

em parâmetros do inversor, não sendo observadas variações significativas nas medições de temperatura.

Tabela 1. Valores do ensaio em regime permanente

Ponto de medição	Média (°C)	Desvio-padrão (°C)
Bobina (A)	37,67	0,06
Bobina (B)	38,47	0,09
Rolamento (A)	54,51	0,09
Rolamento (B)	56,97	0,11

#### 4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Esta seção discorre sobre o procedimento utilizado para a realização dos ensaios, bem como os resultados obtidos utilizando a bancada proposta e o sistema de aquecimento.

##### 4.1 Procedimento de Ensaios

Para a realização dos ensaios, foram elencados os seguintes pontos para servir como base de padronização e escolha de parâmetros:

- optou-se por utilizar a mesma condição fixa (100 mN m e 1000 RPM, com razão cíclica de 25% no sistema de aquecimento) definida na seção 3.2, visto que a curva de aquecimento do motor e dos rolamentos já estava caracterizada nessa condição;
- a condição de ensaio escolhida apresenta uma potência teórica calculada na ordem de 10 W, sendo mais vulnerável à influência do atrito do que potências mais elevadas;

- as diferentes repetições dos ensaios foram realizadas em dias diferentes, de modo a maximizar a variabilidade relacionada com os rolamentos;
- tanto para os ensaios nos quais foi utilizado aquecimento quanto para aqueles nos quais não foi utilizado, esperou-se 4,5 h para equalização da temperatura;
- cada ensaio teve duração de 10 min;
- a temperatura da sala onde são realizados os ensaios é monitorada e controlada por um sistema auxiliar central, mantendo a temperatura ambiente na faixa de  $(23,0 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$ .

##### 4.2 Resultados e Discussão

Utilizando as premissas definidas na seção 4.1, foram realizadas três repetições para cada configuração. Os ensaios denotados com prefixo “S” são referentes aos dados de ensaios nos quais não foi utilizado o sistema de aquecimento. Os ensaios com prefixo “C” são aqueles nos quais o sistema foi utilizado. O *boxplot* dos resultados de potência elétrica é apresentado na Figura 7.

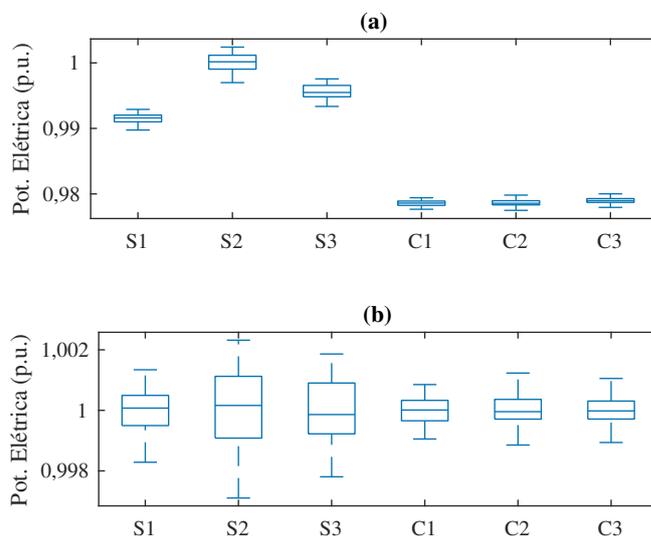


Figura 7. *Boxplot* de resultados dos ensaios. (a) Medições de potência elétrica realizadas, nas quais é possível observar a diferença de valor médio em ensaios “S”. (b) Medições de potência elétrica realizadas com os dados centralizados para facilitar a visualização da diferença na dispersão.

Pela Figura 7(a), é possível perceber que a potência elétrica nos ensaios “S” é superior à potência elétrica dos ensaios “C”, caracterizada pelo maior torque de atrito gerado pelo rolamento. Além disso, fica evidente a redução da variabilidade dos dados dentro de um ensaio na situação com aquecimento, conforme apresentado na Figura 7(b). Os dados dos ensaios são também apresentados na Tabela 2, sendo  $\bar{T}_b$  a temperatura média das bobinas,  $\bar{T}_r$  a temperatura média dos rolamentos,  $\bar{P}$  a potência elétrica média e  $P_\sigma$  o desvio padrão das medições de potência elétrica.

A diferença percentual máxima da potência elétrica dos ensaios “S” foi de 0,82%, enquanto que nos ensaios “C”

Tabela 2. Resultados dos ensaios

Ensaio	$\bar{T}_b$ (°C)	$\bar{T}_r$ (°C)	$\bar{P}$ (p.u.)	$P_\sigma$ (p.u.)
S1	27,35	31,46	0,9918	0,00075
S2	25,58	30,01	1,0000	0,00135
S3	26,49	30,75	0,9958	0,00105
C1	37,92	55,79	0,9415	0,00041
C2	37,93	55,71	0,9415	0,00049
C3	37,91	55,60	0,9419	0,00039

foi de 0,04%. Percebeu-se também uma redução de cerca de 60% do desvio-padrão das medições de potência elétrica nos ensaios “C” em relação aos ensaios “S”. Além da redução na variabilidade da potência, houve o mesmo efeito nas temperaturas monitoradas no sistema. Com o aquecimento, a variabilidade da temperatura média dos rolamentos ficou na faixa de  $(55,7 \pm 0,1)$  °C, enquanto que sem aquecimento ficou na faixa  $(33,7 \pm 0,9)$  °C. Nas bobinas, as faixas de valores ficaram em  $(37,92 \pm 0,01)$  °C e  $(26,46 \pm 0,09)$  °C. Além de aquecer e garantir a repetibilidade de temperatura nos rolamentos, o sistema de aquecimento eleva também a temperatura de ensaio do motor. Tal aspecto pode representar um problema para ensaios de eficiência nos quais é exigida uma condição fixa e padrão de temperatura de bobinas. Para as análises desenvolvidas na bancada, com foco nos resultados comparativos provenientes de alterações em parâmetros do inversor, tal impacto pode ser negligenciado, porém o projeto de aquecimento precisa ser alterado para ter efeito mais localizado nos rolamentos e não em todo o motor.

## 5. CONCLUSÃO

Buscando avaliar o impacto da temperatura de operação dos rolamentos nos ensaios de eficiência energética de motores elétricos de corrente contínua sem escovas, foi implementada uma bancada de ensaios capaz de controlar a condição de operação imposta no motor sob ensaio e avaliar pequenas variações de potência elétrica. A partir dos dados iniciais de potência elétrica e temperatura dos rolamentos, obtidos nesses ensaios em condição fixa, foram feitos esforços para mitigar a influência da variação de temperatura de operação dos rolamentos nos resultados de eficiência do motor sob ensaio.

Foi proposta a concepção de um sistema de aquecimento para analisar a relação entre as duas variáveis. Com a utilização desse sistema, foram realizados ensaios para comparar os cenários com e sem aquecimento forçado dos rolamentos. As avaliações feitas mostraram que a elevação de temperatura de operação dos rolamentos, em um ponto acima do que o atingido durante a operação normal do motor, reduz a variabilidade das medições potência elétrica e melhora a reprodutibilidade entre ensaios. Com isso, torna-se mais fácil compensar a parcela de perdas mecânicas nos rolamentos e determinar a eficiência real do motor.

Tais resultados apresentam um ganho na redução da variabilidade de ensaios de motores elétricos de corrente contínua sem escovas de baixa potência que utilizam rolamentos de esferas metálicas. Trabalhos futuros relacionados com este tema explorarão a utilização de um controle em malha fechada para garantir que o rolamento atinja a temperatura que ele normalmente operaria, em vez de uma temperatura mais elevada, buscando minimizar a influência do sistema de aquecimento na temperatura do enrolamento

do motor. É proposto também alterar o ponto de medição de temperatura, por meio de uma cavidade no suporte metálico que aloja o rolamento, para que a grandeza possa ser medida diretamente na gaiola do rolamento, o que deverá permitir que a condição de ensaio seja atingida de forma mais rápida, sem necessidade de aguardar a equalização térmica de todo o sistema mecânico.

## REFERÊNCIAS

- Aarniovuori, L., Kolehmainen, J., Kosonen, A., Niemela, M., e Pyrhonen, J. (2014). Uncertainty in motor efficiency measurements. In *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 323–329. IEEE. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960200.
- Caruso, M., Tommaso, A.D., Miceli, R., Nevoloso, C., e Spataro, C. (2021). Uncertainty evaluation in the differential measurements of power losses in a power drive system. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 183(12), 109795. doi:10.1016/j.measurement.2021.109795.
- Chuang, H.S., Ke, Y.L., e Chuang, Y.C. (2009). Analysis of commutation torque ripple using different PWM modes in BLDC motors. In *Conference Record 2009 IEEE Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, 4–9. IEEE. doi:10.1109/ICPS.2009.5463966.
- Derammelaere, S., Haemers, M., De Viaene, J., Verbelen, F., e Stockman, K. (2017). A quantitative comparison between BLDC, PMSM, brushed DC and stepping motor technologies. In *19th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2016*, 1–5. The Institute of Electrical Engineers of Japan.
- Henao-Sepulveda, J., Toledo-Quinones, M., e Jia, Y. (2005). Contactless monitoring of ball bearing temperature. In *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, volume 2, 1571–1573. IEEE. doi:10.1109/imtc.2005.1604416.
- Houptert, L. (2002). Ball bearing and tapered roller bearing torque: analytical, numerical and experimental results. *Tribology Transactions*, 45, 345–353. doi:10.1080/10402000208982559.
- Kang, J.S., Cha, B.J., e Ahn, I.K. (2008). Modeling and experimental evaluation on torque loss in turbine test rig. In *Volume 6: Turbomachinery, Parts A, B, and C*. ASMEDC. doi:10.1115/gt2008-50341.
- Killedar, J. (2012). *Dynamometer: theory and application to engine testing*. Xlibris, Bloomington, Indiana.
- Kim, K.S., Lee, D.W., Lee, S.M., Lee, S.J., e Hwang, J.H. (2015). A numerical approach to determine the frictional torque and temperature of an angular contact ball bearing in a spindle system. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16, 135–142. doi:10.1007/s12541-015-0017-1.
- Machado, J.P.Z. (2018). *Análise e aprimoramento da confiabilidade de sistema de medição de eficiência de motores elétricos*. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação), Universidade Federal de Santa Catarina.
- Mi, C., Slemmon, G.R., e Bonert, R. (2003). Modeling of iron losses of permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(3), 734–742. doi:10.1109/TIA.2003.810635.
- Nagore, L.B. (2014). *Análise experimental da influência de mancais de rolamentos em ensaios de rendimento de*

- motores elétricos de compressores*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SKF (2018). *Rolling bearings 17000*. SKF Group.
- Takabi, J. e Khonsari, M.M. (2013). Experimental testing and thermal analysis of ball bearings. *Tribology International*, 60, 93–103. doi:10.1016/j.triboint.2012.10.009.
- Thompson, M.G., Hoff, C.J., e Gover, J.E. (2010). A model to estimate the effect of DC bus voltage on HEV powertrain efficiency. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1. IEEE. doi:10.1109/vppc.2010.5729106.
- Valladolid, J.D., Albarado, R., Mallahuari, D., e Patino, D. (2020). Experimental performance evaluation of Electric Vehicles (EV) based on analysis of power and torque losses. In *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, volume 2020-February, 933–938. IEEE. doi:10.1109/icit45562.2020.9067241.
- Viswanathan, V. e Jeevananthan, S. (2014). Torque ripple comparison of a two-level and a three-level inverter fed brushless DC motor drives at different switching frequency. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Green Computing, Communication and Electrical Engineering, ICGCCEE 2014*, volume 2, 1491–1496. IEEE. doi:10.1109/ICGCCEE.2014.6922438.
- Ziaeinejad, S., Sangsefidi, Y., e Shoulaie, A. (2011). Analysis of commutation torque ripple of BLDC motors and presenting two methods for its reduction. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, volume 4, 2219–2226. IEEE. doi:10.1109/iceei.2011.6021672.