



COMPARAÇÃO DE AMPLIFICADORES DE CORRENTE PARA SISTEMAS DE CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÃO

Iago Alves Pereira, iago.pereira@ufu.br
Leandro de Souza Leão, leao@ufu.br
Aldemir Aparecido Cavalini Junior, aacjunior@ufu.br
Valder Steffen Junior, vsteffen@ufu.br

LMEst – Structural Mechanics Laboratory, Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, 38408-196, Brazil

Resumo. A presença de defeitos em máquinas rotativas é um problema que oferece perdas financeiras e redução na segurança do trabalho nos setores da indústria. Nas últimas décadas, houve um grande investimento em pesquisas para desenvolver técnicas de controle ativo de vibração com a finalidade de evitar o aparecimento e a propagação de defeitos. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da força gerada por um atuador eletromagnético (AEM) em função da frequência e comparar as características de dois amplificadores de corrente, a fim de decidir qual equipamento será utilizado em um sistema de controle ativo de vibração de uma máquina rotativa. A comparação entre os amplificadores e o estudo do comportamento do AEM serão feitas utilizando diagramas de Bode, obtidos a partir da caracterização dinâmica do atuador. Um experimento foi realizado para comparar o amplificador de corrente Maxon Motor, modelo ADS 50/10 50V/10 20158 com o Monster Motor Shield, utilizado em micro-controladores do tipo Arduino, o que representa uma tecnologia mais econômica financeiramente. Por fim, concluiu-se que o amplificador Maxon Motor é o mais indicado para o sistema de controle e que a força gerada pelo amplificador, em função da frequência, apresenta comportamento não linear.

Palavras chave: Amplificador de corrente, atuador eletromagnético, força eletromagnética, diagrama de Bode.

1. INTRODUÇÃO

Defeitos são recorrentes em máquinas rotativas em todo âmbito industrial. Com o surgimento dos defeitos, as máquinas rotativas apresentam um acréscimo em sua amplitude de vibração (1x), além de ser possível notar super harmônicos no sinal de vibração (2x, 3x, entre outros), o que diminui a segurança do trabalho e aumenta as chances de grandes perdas econômicas, como o caso do acidente ocorrido com a turbina da General Eletrics em 1970 (Dimarogonas *et al.*, 2013). Neste contexto, várias técnicas de controle de vibração foram desenvolvidas, destacando-se o controle usando ligas memória de forma (“Shape Memory Alloy” ou SMA), materiais piezoelétricos e AEMs.

As SMAs são ligas metálicas capazes de recuperar à sua forma original após sofrerem deformações permanentes quando aquecidos a cima de uma determinada temperatura. Tendo em vista este comportamento, os livros Perkins (1976), Funakubo *et al.* (1987) e Jackson *et al.* (1972) abordam os principais conceitos relacionados às características da transformação de fase martensítica das SMAs. Um dos exemplos da aplicação das SMAs para controle ativo de vibração foi realizado por Baz *et al.* (1990), o qual utilizou atuadores de SMA para controlar o primeiro modo de flexão de uma viga engastada.

Segundo Santana (2002), os materiais piezoelétricos são materiais, sintéticos ou naturais, que são capazes de apresentar dois tipos de efeitos, o piezoelétrico direto e o piezoelétrico inverso. Estes efeitos definem a função do PZT, podendo ser utilizado como sensor ou atuador. O efeito direto é caracterizado pela distribuição de cargas elétricas no material após uma deformação mecânica, comportando-se como um sensor. Já o efeito inverso é caracterizado pelo aparecimento de deformação mecânicas quando o corpo é submetido a um campo elétrico em sua direção de polarização, comportando-se como um atuador. Um exemplo de aplicação de PZTs é o trabalho feito por Raja *et al.* (2002), o qual utilizou, como sensores e atuadores, materiais com características piezoelétricas para realizar um controle ativo de vibração em vigas engastadas.

Por fim, os AEMs são dispositivos que geram forças de controle por meio de campos magnéticos, possibilitando atenuar as vibrações sem que haja contato entre o eixo da máquina rotativa e os atuadores. Segundo Arredondo *et al.* (2008), os AEMs também podem ser utilizados como mancais de máquinas rotativas, suportando o eixo por levitação. Leão *et al.* (2017) afirma que esta característica oferece vantagens significativas em relação as técnicas tradicionais (mancais hidrodinâmicos e mancais de rolamento), uma vez que não há a necessidade de lubrificação e não há contato entre o eixo e o mancal. Explorando estas características, Sreedhar (2013) propôs um AEM para uma centrifuga laboratorial para evitar a contaminação das amostras pelo óleo do mancal hidrodinâmico do equipamento. Gorne (2013)

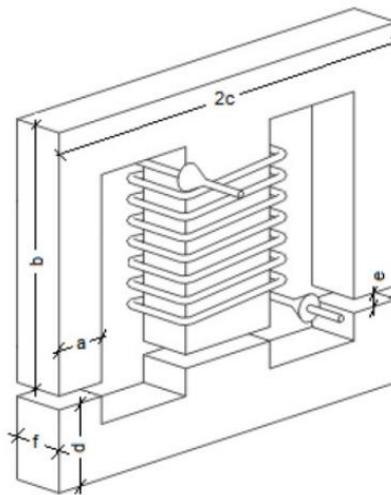
mostra a aplicação de mancais magnéticos em tornos de comando numérico de alta velocidade. Segundo Cavalini Jr (2013) e Koroishi (2013a), os AEMs também podem compor um mancal do tipo híbrido, em que há tanto a sustentação mecânica, via rolamentos, quanto à possibilidade deste mancal se mover, controlando as vibrações presentes no rotor.

Devido às vantagens apresentadas, este trabalho apresenta o estudo do comportamento da força gerada por um AEM, em função da frequência, e o comparativo entre dois amplificadores de corrente para decidir qual equipamento será usado em trabalhos futuros para controle de vibrações em eixos de máquinas rotativas na presença de defeitos. A caracterização dinâmica que será apresentada tem como objetivo conhecer as possíveis defasagens do sistema de controle (placa de aquisição e controle, amplificador de corrente e AEM) em cada componente.

2. FORÇA ELETROMAGNÉTICA

O AEM é composto por um núcleo ferroso envolto por um solenoide. O solenoide é a parte do atuador responsável por gerar o campo eletromagnético do sistema. Ele é composto por um fio longo enrolado em formato helicoidal com espiras próximas umas das outras e com movimentação de corrente elétrica. Essa configuração produz um campo magnético razoavelmente uniforme por todo interior do solenoide (Serway e Jewett, 2008). Por outro lado, os materiais ferromagnéticos têm a função de direcionar os campos magnéticos, reduzindo sua dispersão. Quando estes materiais são expostos aos campos magnéticos, ocorre um alinhamento dos momentos dipolares magnéticos de seus átomos (Halliday *et al.*, 2007), fazendo com que o núcleo ferroso do atuador apresente uma forte atração por materiais ferromagnéticos. Dito isso, os atuadores eletromagnéticos têm sua força descrita pela Eq. (1). A força eletromagnética gerada por uma bobina depende de parâmetros geométricos mostrados na Fig. 1.

Figura 1: Eletroímã do atuador eletromagnético (Morais, 2010)



Visto os parâmetros apresentados na Fig. 1, a formulação que define a força eletromagnética, segundo Koroishi (2013b), é dada por:

$$F_{AEM} = \frac{N_e^2 I^2 \mu_o a f}{2 \left((e \pm \delta) + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (1)$$

onde a , b , c , d , e e f são parâmetros geométricos, N_e é o número de espiras, μ_o é a permeabilidade magnética do vácuo, δ representa os deslocamentos realizados pelo eixo devido à sua vibração, I é a corrente elétrica que percorre a bobina e μ_r é a permeabilidade relativa do material ferromagnético.

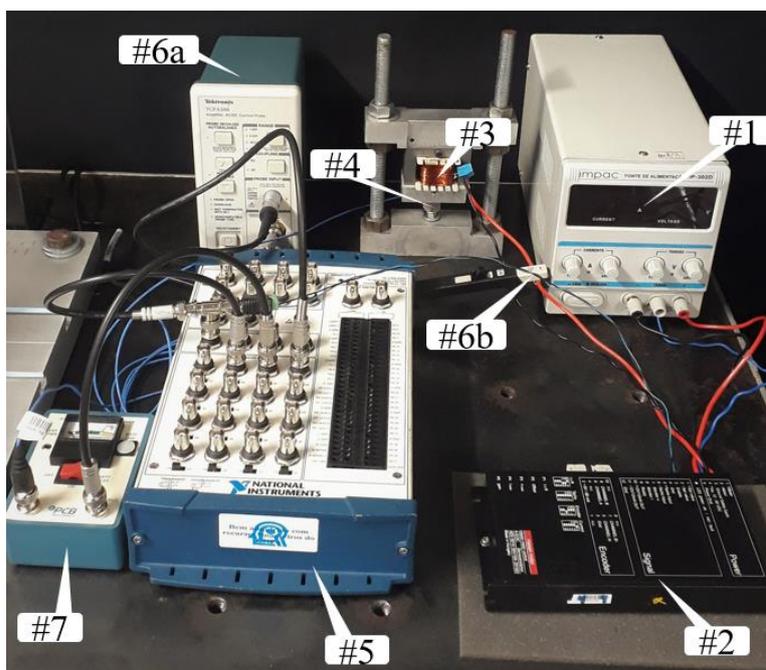
3. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A caracterização experimental dos amplificadores e o estudo do comportamento do AEM é composta dos seguintes equipamentos, como mostra a Fig. 2:

1. Fonte de alimentação externa, Impac, modelo IP-302D;

2. Amplificador de corrente, Maxon motor, modelo ADS 50/10 201583;
3. AEM;
4. Sensor de força, PCB Piezotronics, modelo 208C03;
5. Placa de aquisição, National Instruments, modelo NI USB-6259;
6. Sistema de medição de corrente, Tektronix, modelo TCP A300;
7. Condicionador de sinais, PCB Piezotronics, modelo 480C02.

Figura 2: Experimento montado com amplificador Maxon Motor.



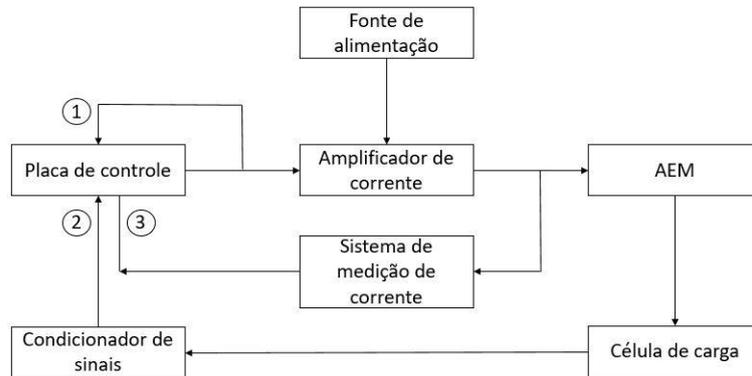
É importante salientar que para a comparação entre os dois amplificadores de corrente, o mesmo layout de experimento foi mantido, sendo alterado apenas o amplificador Maxon Motor pelo Monster motor shield acoplado a um Arduino Mega 2560. A Fig. 3 apresenta o amplificador de corrente Monster motor shield.

Fig. 3: Amplificador de corrente Monster Motor Shield.



A placa de controle National Instruments é usada para gerar os sinais de excitação (tensão elétrica aplicada no amplificador de corrente) e adquirir os sinais de resposta (força e corrente). Neste caso, excitações senoidais com amplitude 0,5 V e bias de 2 V são aplicadas com diferentes frequências (0-300 Hz). O esquema de aquisição está representado na Fig.4. Por fim, função do Arduino Mega neste experimento é realizar a comunicação entre a placa National e o shield, uma vez que este amplificador de corrente funciona somente com sinais de controle do tipo PWM. Portanto, o Arduino recebe o sinal de excitação gerado pela placa National e o converte em um sinal do tipo PWM.

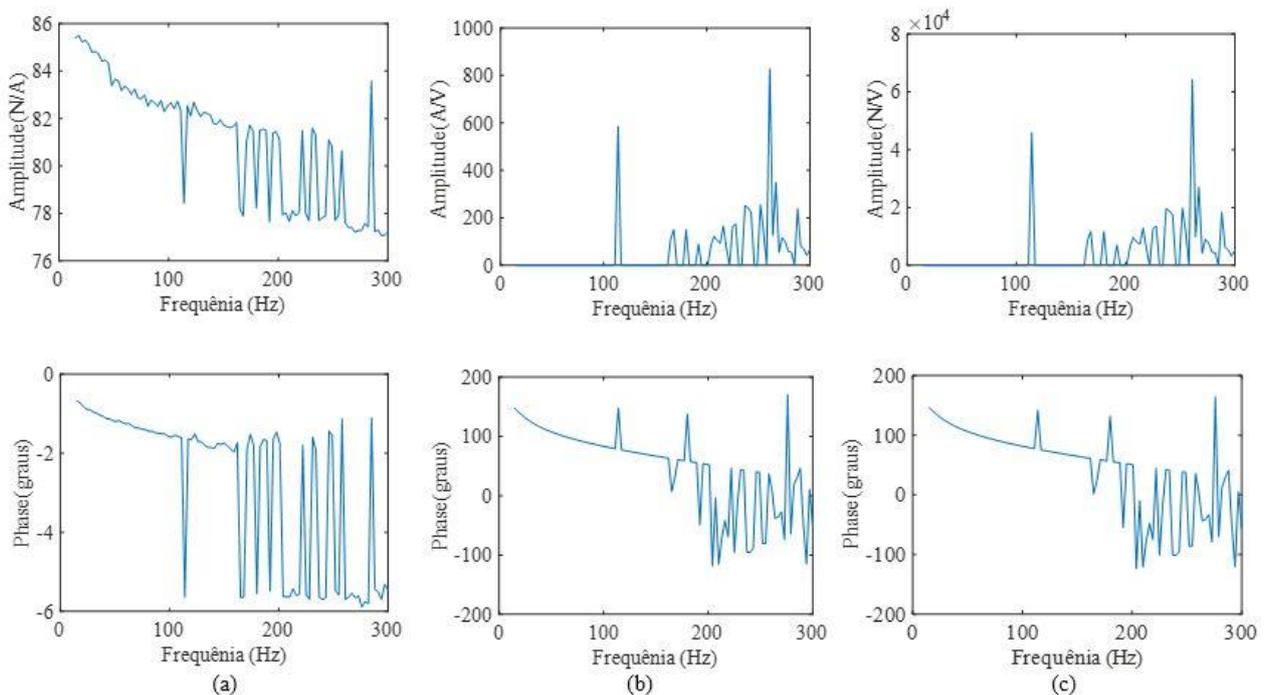
Figura 4: Esquema de Ligações do experimento; Sinal 1: senóide gerada pela placa de controle National Instruments; Sinal 2: Resposta de força medida pela célula de carga; Sinal 3: Corrente medida após o amplificador.



4.RESULTADOS

Após a coleta de dados, foram obtidos três diagramas de Bode comparando os sinais mostrados na Fig. 4, representados por [1], [2] e [3], para cada um dos amplificadores, com o intuito de determinar suas características e o comportamento da força gerada pelo AEM.

Figura 5: Diagramas de Bode do Monster Motor Shield para os pares de sinais [2] e [3] (a); [1] e [3] (b); [2] e [1] (c).



Analisando os diagramas de Bode do sistema com o amplificador de corrente Monster Motor shield, percebe-se que o equipamento obteve a maior fonte de defasagem em todo o sistema, acrescentando cerca de 150° de atraso em relação ao sinal gerado pela placa National Instruments. Além disso, pode-se observar que após 150 Hz o sinal apresenta bastante ruído, não tendo precisão para trabalhar após esta faixa. Ademais, nota-se que o AEM resultou em uma defasagem de, aproximadamente, 5 graus. Vale ressaltar que foi utilizado a frequência de “default” do pino digital PWM 4 da placa Arduino Mega 2560.

A Fig. 6 mostra o diagrama de Bode do sistema de controle com o amplificador Maxon Motor. Nota-se que o equipamento resultou em, aproximadamente, 60 graus de defasagem, comportando-se como a maior fonte de defasagem do sistema. Ademais, o AEM apresentou comportamento semelhante a configuração anterior, resultando em uma defasagem de, aproximadamente, 5 graus.

Ao comparar os diagramas de Bode para ambos amplificadores, nota-se que os resultados do segundo amplificador são mais satisfatórios que os do primeiro. A explicação para este fenômeno pode ser visualizada na Fig. 7, na qual são apresentados sinais temporais considerando uma excitação de 30 Hz. Percebe-se que o sinal gerado pelo amplificador de corrente Monster motor shield apresenta maior quantidade de ruído que o sinal temporal do amplificador Maxon motor. Figura 6: Diagramas de Bode do amplificador Maxon motor para os pares de sinais [2] e [3] (a); [1] e [3] (b); [2] e [1] (c).

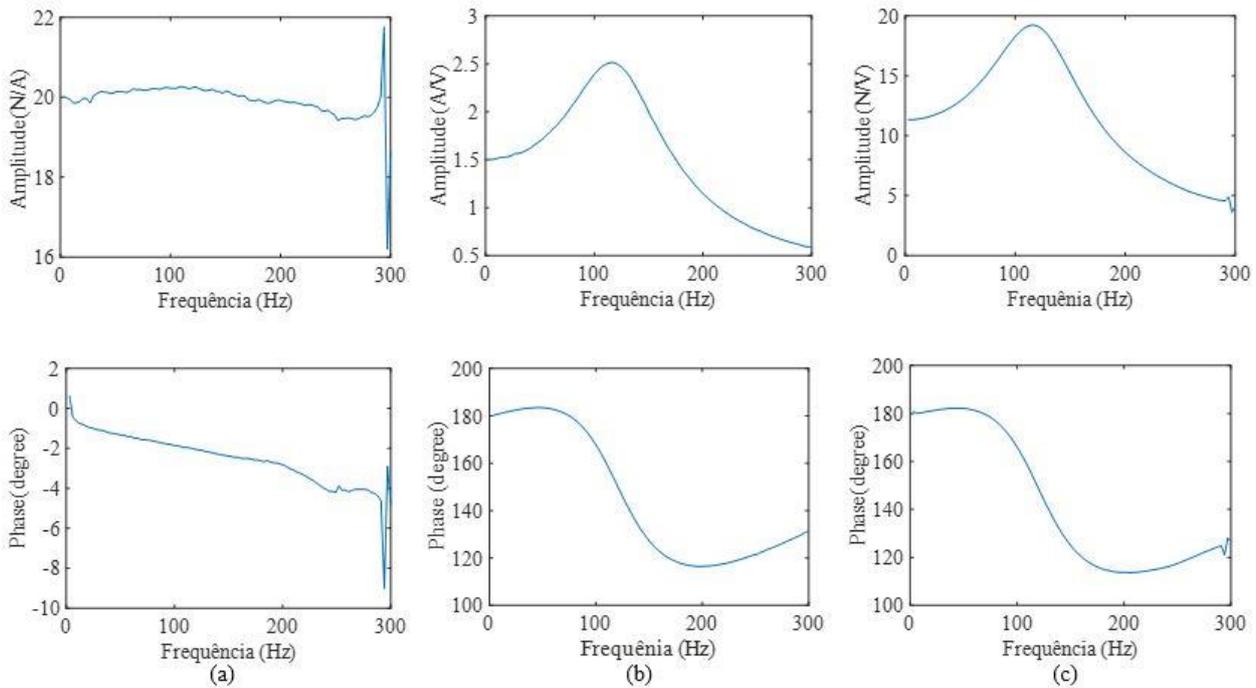
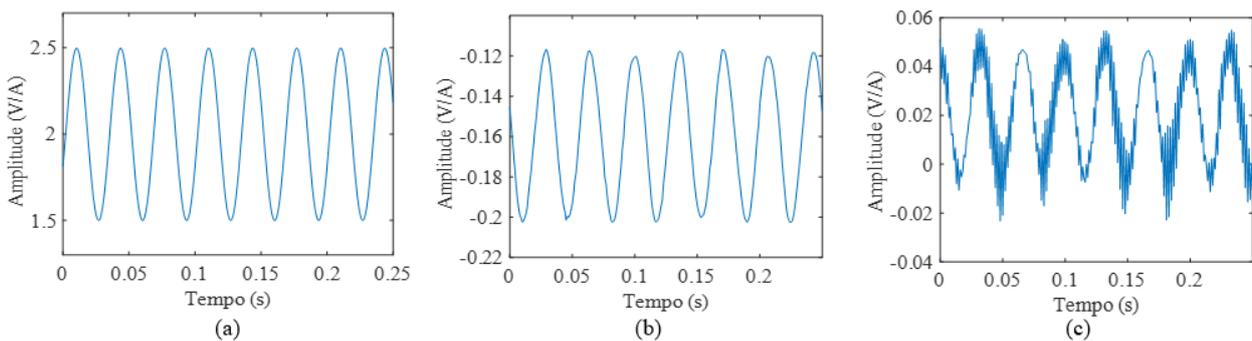


Figura 7: Sinais temporais: (a) gerado pela placa de controle; (b) amplificador de corrente Maxon Motor; (c) Monster Motor Shield.



Por fim, ao analisar o diagrama de Bode do sinal [1] e do sinal [3] do sistema de controle com o amplificador Maxon Motor (veja a Fig. 6), nota-se que há um comportamento não-linear da força gerada pelos atuadores em função da frequência, conforme esperado. O núcleo ferroso do AEM apresenta maior amplificação em determinadas faixas de frequência, aplicando forças de maior amplitude na célula de carga.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram obtidos diagramas de Bode associados com a caracterização dinâmica de um AEM para estudar o comportamento de sua força de atração e de sua defasagem, ambas em função da frequência, bem como comparar dois amplificadores de corrente para futuros trabalhos de controle ativo de vibração em máquinas rotativas. Concluiu-se que a amplitude da força de atração do AEM, em função da frequência, teve comportamento não linear para mesma corrente de controle. Além disso, o amplificador Maxon motor apresentou melhores resultados que o Monster motor shield, já que resultou em uma menor defasagem e comportamento bem menos ruidoso, sendo de mais fácil implementação na lei de

controle em trabalhos futuros. Entretanto, a possível causa do resultado ruim nas aquisições com amplificador Monster motor shield podem estar relacionadas a frequência de “default” do pino digital PWM 4 (976,5625 [hz]), uma vez que, em frequências de excitação maiores, essa taxa de discretização do sistema pode piorar a conversão do sinal senoidal em PWM.

Trabalhos futuros serão dedicados à caracterização dinâmica de quatro AEMs com excitações senoidais de diferentes valores de bias e amplitudes para decidir a faixa de trabalho dos atuadores, bem como do sistema de controle ativo de vibrações associado.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores estão gratos pelo suporte financeiro provido pelos órgãos de fomento à pesquisa CNPq (574001/2008-5, 304546/2018-8, e 431337/2018-7), FAPEMIG (TEC-APQ-3076-09, TEC-APQ-02284-15, TEC-APQ-00464-16, e PPM-00187-18), e CAPES através do INCT-EIE.

7. REFERÊNCIAS

- Arredondo, I., Jugo, J. and Etxebarria, V., 2008. “Modeling and control of a flexible rotor system with amb-based sustentation”. *ISA transactions*, Vol. 47, No. 1, pp. 101–112.
- Baz, A.J.E.C., imam, K. and Mccooy, J., 1990. “Active vibration control of flexible beams using shape memory actuators”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 140, No. 3, pp. 437–456.
- Cavalini Junior, A.A., 2013. *Detecção e identificação de trincas transversais incipientes em eixos horizontais flexíveis de máquinas rotativas*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil
- Dimarogonas, A.D., Paipetis, S.A., Chondros, T.G, *Analytical Methods in Rotor Dynamics*, Springer, 2nd ed., Dordrecht, Netherlands, 2013
- Funakubo, Hiroyasu and Kennedy, J.B., 1987. *Shape Memory Alloys*. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 2nd edition.
- Gorne, J., 2013. “Jobst. using active magnetic bearings for high speed machining-conditions and benefits”. In *Proceedings of the 17nd New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies - TEHNOMUS*. Suceava, Romania.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., *Fundamentos de Física 3*. 7^a ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 379p, 2007.
- Jackson, C.M., Wagner, H.J. and Wasilewski, R.J., 1972. *Nitinol—The Alloy with a Memory: Its Physical Metallurgy, Properties, and Application*. NASA-SP 5110, Washington DC, 1st edition.
- Koroishi, E.H., 2013. *Controle de vibrações em máquinas rotativas utilizando atuadores eletromagnéticos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Leao, L.S., Sahinkaya, A., A Cavalini Junior, A., Steffen, J.V. and Sawicki, J.T., 2018. “Crack detection oriented control of rotor vibrations”. In *Proceedings of the 10nd International Conference on Rotordynamics -IFTToMM 2018*. Rio de Janeiro.
- Morais, T.S., 2010. *Contribuição ao Estudo de Máquinas Rotativas contendo não linearidades*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Perkins, J., 1976. *Shape Memory Effects in Alloys*. Plenum Press, New York, 1st edition.
- Raja, S., Prathap, G. and Sinha, P.K., 2002. “Active vibration control of composite sandwich beams with piezoelectric extension-bending and shear actuators”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, No. 1, pp. 63–70.
- Santana, D.C., 2002. *Controle ativo de ruído empregando placas retangulares com atuadores piezoelétricos distribuídos*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Serway, R. A., Jewett Jr, J. W., *Princípios de física: Eletromagnetismo*. V.3, 941p, 2008.
- .Sreedhar, B.K., 2013. “Development of active magnetic bearings and ferrofluid seals toward oil free sodium pumps”. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 265, No. 1, pp. 1166–1174.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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