

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIA PARA OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE UM TRANSFORMADOR DIFERENCIAL LINEAR VARIÁVEL ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO

BRUNO MONTE DE CARVALHO^{1*}, JULIANO DE PELEGRIN²; FÁBIO LUIZ BERTOTTI³; JEAN-MARC STEPHANE LAFAY⁴

¹Mestrando em Engenharia Elétrica, UTFPR, Pato Branco-PR, bruno_monthy@hotmail.com

²Graduando em Engenharia Mecânica, UTFPR, Pato Branco-PR, julianodepelegrin@hotmail.com

³Dr. Pesquisador, UTFPR, Pato Branco-PR, bertotti@utfpr.edu.br

⁴Dr. Pesquisador, UTFPR, Pato Branco-PR, jeanmarc@utfpr.edu.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 2 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

RESUMO: As metodologias para modelagem das características elétricas do LVDT (Transformador Diferencial Linear Variável) ainda são pouco difundidas na literatura, este artigo apresenta resultados de simulação da aplicação de uma metodologia que visa obter essas características, entre elas, resistência elétrica no primário e secundário, indutância mútua, assim como, tensão entre os terminais do secundário, para uma determinada carga aplicada. Foi feita também a comparação com dados experimentais do LVDT construído. Utilizou-se para os testes um LVDT feito com fio de cobre esmaltado de 26 AWG com 800 voltas para cada bobina secundária, 400 voltas para a bobina primária e núcleo composto de ferro. Os resultados mostraram que a curva de tensão obtida através da modelagem consegue descrever a curva real de tensão obtida experimentalmente, com erro mínimo, mostrando que essa técnica pode ser utilizada em trabalhos em que seja necessário modelar um LVDT.

PALAVRAS-CHAVE: LVDT, sensor de deslocamento, modelagem, protótipo.

STRATEGY ASSESSMENT FOR OBTAINING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER THROUGH SIMULATION AND EXPERIMENT.

ABSTRACT: The methodologies to model the electrical characteristics of a LVDT (Linear Variable Differential Transformer) still not widespread in the literature. This article show the results of an application of simulation of a methodology aimed to obtain these characteristics, such as electrical resistance in the primary and secondaries, mutual inductance and a voltage between the secondary terminals according with the charge applied. It was also made the comparison with experimental data of the LVDT built. It was used for the tests a LVDT with enameled copper wire of 26 AWG of diameter with 800 rounds in each secondary coil. In the primary coil was used the same wire with 400 rounds and a core composed of iron. The results showed that the voltage curve obtained through the modeling can describe the real voltage curve obtained experimentally with minimum error, showing that this technique can be used in works that is necessary to model a LVDT.

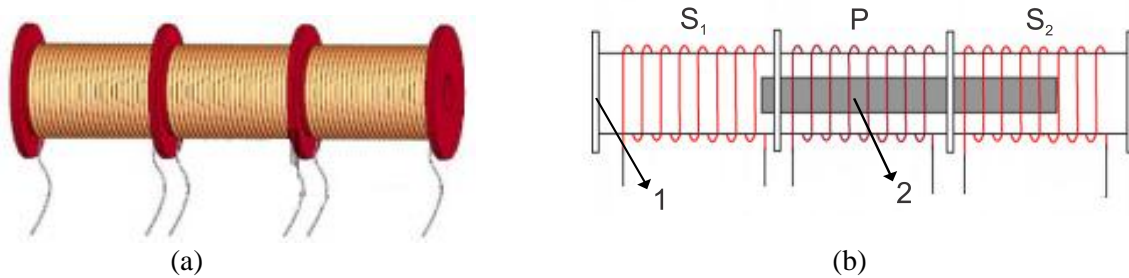
KEYWORDS: LVDT, displacement sensors, modeling, prototype.

INTRODUÇÃO

O sensor de posição LVDT caracteriza-se como um método confiável e de precisão para medição de distâncias lineares. Após a segunda guerra, principalmente pelo uso em torpedos, sistemas de armas e aeronaves este sensor ganhou aceitação na indústria de controle de processo (Kester, 1999). Atualmente é um sensor amplamente utilizado (Raj et al., 2014).

Como mostrado na Figura 1, o sensor é composto por dois enrolamentos secundários (S_1 e S_2) e um primário (P), além de um núcleo ferromagnético (2). O núcleo se move ao longo da estrutura, no interior do encapsulamento (1). No momento em que o núcleo ferromagnético é deslocado até o final da escala a tensão é máxima em um dos enrolamentos secundários e mínima no outro e quando estiver no meio a tensão é igual nos dois (Athayde, 2015). A tensão medida na saída do sensor é a diferença entre as tensões nas bobinas secundárias (Misra et al., 2014). Sendo assim, a variação da tensão de saída é utilizada para prever a posição do núcleo (Raj et al., 2014).

Figura 1. (a) Visão geral de um LVDT. (b) Distinção das partes de um LVDT.



Fonte: Adaptado de Wu (2015).

O LVDT além de ter boa precisão possui sensibilidade, resolução infinita, linearidade, assim como operação sem atrito e robustez (Kester, 1999). Além disso, possui alta repetibilidade, isolamento elétrico total, ampla resposta dinâmica e sensibilidade direcional (Tian et al., 1997).

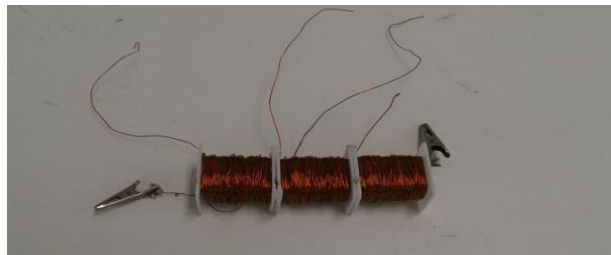
Por estes motivos o LVDT é amplamente utilizado nas indústrias e é grande o número de pesquisas voltadas para este transdutor.

A modelagem matemática do LVDT possibilita simular seu comportamento, o que é essencial para verificar se suas características atendem os requisitos necessários para o projeto. Este artigo mostra os resultados de simulação obtidos aplicando a modelagem proposta por Dias (2015) e compara com os resultados experimentais obtidos em bancada, com o objetivo de contribuir para o estudo da modelagem das características elétricas do LVDT, pouco difundida no meio acadêmico.

MATERIAIS E MÉTODOS

O LVDT estudado possui 72 mm de comprimento, para confecção de suas bobinas utilizou-se fio de cobre esmaltado de 26 AWG, com 800 voltas em cada bobina secundária e 400 voltas na bobina primária. O sensor é mostrado na Figura 2.

Figura 2. Protótipo de LVDT.

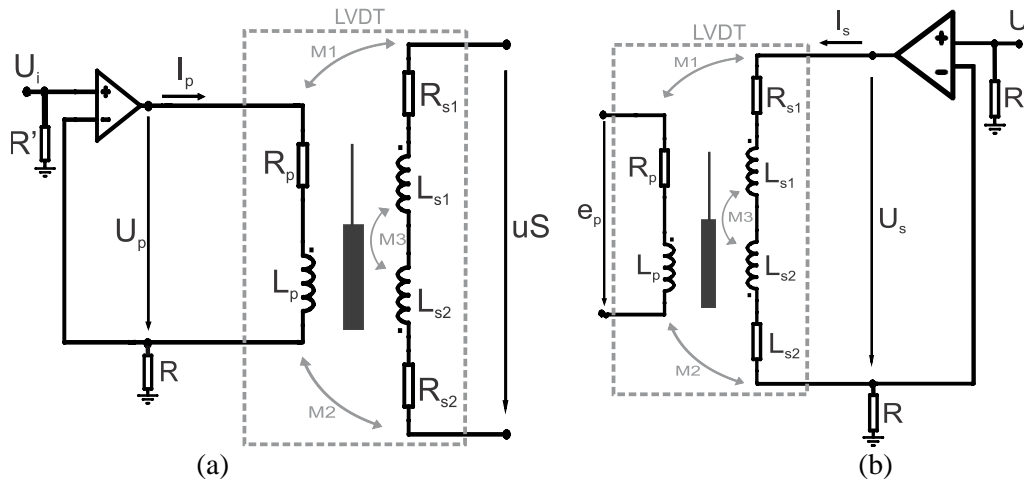


O núcleo do sensor é composto de ferro, com 48 mm de comprimento, de forma a cobrir uma das bobinas secundárias e a bobina primária, quando colocado na posição inicial. Dessa forma, o deslocamento total é limitado ao tamanho de uma das bobinas secundárias (24 mm). As medições foram feitas a cada 1 mm, deslocando-se o núcleo no interior do sensor, durante todo o percurso. Para cada posição do núcleo foram medidas as tensões e correntes no sensor, utilizando-se para isso um osciloscópio.

Para obter as características elétricas do LVDT foi necessário obter experimentalmente as tensões e correntes no sensor. Para isso foram realizados 3 ensaios, os dois primeiros são mostrados na Figura 3. Através do primeiro ensaio obteve-se as tensões U_p , U_R , u_S , U ($U_p + U_R$) e a corrente I_p .

Essas tensões foram utilizadas para obter através de simulações no matlab a resistência (R_p) e a indutância (L_p) no primário, além da diferença entre as indutâncias mútuas M_1 e M_2 ($M_1 - M_2$). No segundo ensaio foram medidas as tensões e_p , U_s , U_R , U ($U_s + U_R$) e a corrente I_s , sendo possível obter, através de simulação a resistência no secundário (R_s) e a diferença entre a indutância equivalente do enrolamento secundário e a indutância mútua entre os enrolamentos primário e secundário ($L_s - 2M_3$).

Figura 3. (a) Ensaio 1 para determinação dos parâmetros R_p , L_p e ($M_1 - M_2$). (b) Ensaio 2 para determinação dos parâmetros R_s e ($L_s - 2M_3$).



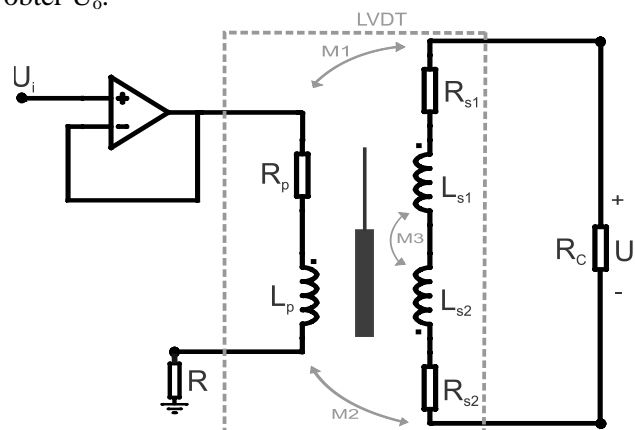
Fonte: Adaptado de Dias (2015).

Com os dados obtidos nos dois primeiros ensaios e com as primeiras simulações foi possível determinar a partir de uma nova simulação a tensão U_0 (tensão nos terminais das bobinas secundárias do LVDT quando uma determinada carga for ligada aos seus terminais).

O terceiro ensaio foi realizado para determinar o valor experimental de U_0 para uma carga (R_c) de 1 k Ω , os valores foram comparados com os obtidos na simulação. A montagem do circuito é vista na Figura 4.

A resistência (R) utilizada foi de 38 Ω .

Figura 4. Ensaio 3 para obter U_0 .



Nos 3 ensaios utilizou-se uma fonte de tensão simétrica para alimentar o amplificador com +12 V e -12 V. Um gerador de função foi ligado ao circuito, fornecendo uma tensão $U_i = 750 \text{ mV}_{\text{Rms}}$ e frequência de 1 kHz.

A função de transferência do sistema é dada por (Dias, 2015):

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{s2a xR_c}{As^2 + Bs + C} \quad (1)$$

Em que x é a posição normalizada do núcleo e:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{M_1 - M_2}{x} \\
 (M_1 - M_2) &= R \frac{e_{s1} - e_{s2}}{2\pi f U_R} \\
 A &= L_p (L_s - 2M_3) \\
 L_s - 2M_3 &= \frac{1}{\omega} R \frac{U_s}{U_R} \text{sen}\theta \\
 B &= R_p (L_s - 2M_3) + (R_s + R_c) L_p \\
 C &= R_p (R_s + R_c) \\
 R_s &= R_{s1} + R_{s2} \\
 L_s &= L_{s1} + L_{s2}
 \end{aligned} \tag{2}$$

A Equação 3 possibilitou calcular o valor de U_0 .

$$|U_o(\omega)| = 2aR_c U_i \frac{\omega}{\sqrt{(C - A\omega^2)^2 + (\omega B)^2}} |x| \tag{3}$$

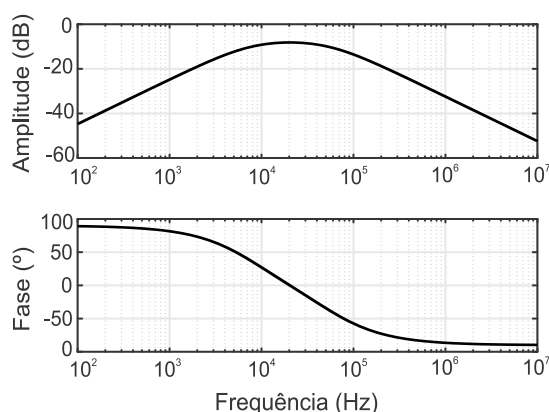
Sabendo que ω é a frequência angular.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando-se a metodologia proposta foi possível obter, através do matlab, as características do sistema, para todas as posições do núcleo.

O diagrama de bode do sistema é mostrado na Figura 5. Os parâmetros simulados, para plotagem do diagrama de bode, foram obtidos com o núcleo na posição inicial, em que: $x = +1$, $f = 1$ kHz, $a = 0,828$ mH, $R_p = 27,05 \Omega$, $L_p = 3,5$ mH, $R_s = 59,2 \Omega$, $(L_s - 2M_3) = 19,8$ mH, $R_c = 1$ k Ω , e $U_i = 0,750$ mV_{RMS}.

Figura 5. Diagrama de bode



As resistências e indutâncias do primário foram determinadas e podem ser vistas na Figura 6.

A tensão de saída, para uma carga de 1 k Ω conectada aos terminais do secundário, foi obtida através de simulação e também experimentalmente. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 7.

Verifica-se que as duas curvas de tensão, simulada e experimental, tem um comportamento muito próximo, mostrando que a modelagem consegue descrever fielmente a resposta do sistema.

Figura 6. (a) Indutâncias do circuito. (b) Resistências do circuito.

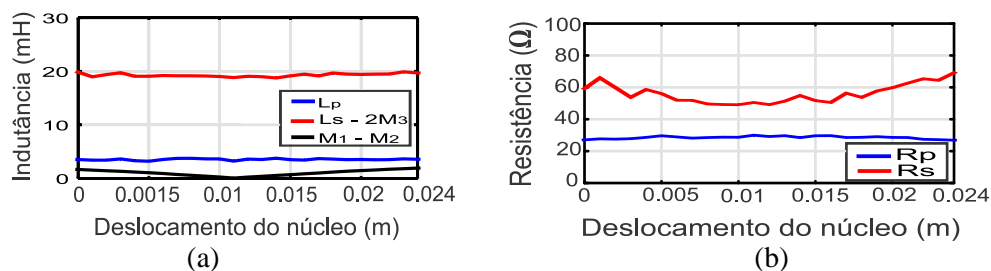
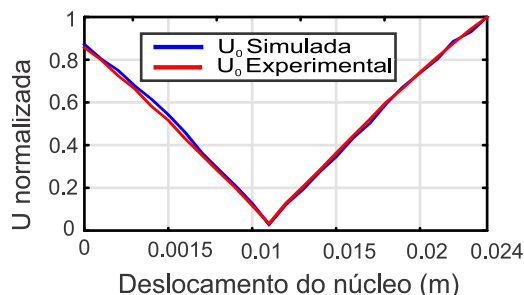


Figura 7. Tensão simulada e tensão medida.



CONCLUSÃO

Ao termino deste trabalho verifica-se que as características elétricas do LVDT foram determinadas e que o método proposto funcionou de forma eficiente.

Com o deslocamento do núcleo notou-se pequena variação nos valores das indutâncias L_p e ($L_s - 2M_3$), além da resistência R_p . Apenas a resistência da bobina secundária (R_s) e a diferença entre as indutâncias mutuas ($M_1 - M_2$) teve uma variação mais significativa.

Constatou-se que, tanto para o valor simulado quanto para o valor medido, a tensão de saída no ponto zero do sensor não é nula, existe um pequeno resíduo, característico desse tipo de sensor e mostrado em vários trabalhos da literatura.

Foi possível perceber ainda que a resposta do sensor LVDT foi linear em quase todo o percurso. Considerando suas características físicas, existe a possibilidade de sua utilização em aplicações diversas, para medir deslocamentos com alta precisão e que essa modelagem pode ser empregada para estudo das características do sensor.

AGRADECIMENTOS

A FINEP, CAPES, SETI, CNPq e Fundação Araucária pela bolsa de estudos e financiamento.

REFERÊNCIAS

- Athayde, J. N. Dispositivo oscilatório para avaliação tribológica em biomateriais, utilizando tribômetro linear. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.
- Kester, W. Practical design techniques for sensor signal conditioning. Analog Devices inc.
- Misra, P.; Mohini, S. K.; Mishra, S. K. The Design and Implementation of an ANN-based Non-linearity Compensator of LVDT Sensor. arXiv preprint arXiv:1407.0506, 2014.
- Raj, M. A.; Meera, V.; Janani, P. Comparative study and transient analysis of winding shapes in linear variable differential transformer, Electrical Energy Systems (ICEES). 2014 IEEE 2nd International Conference on, Chennai, pp. 132-134, 2014.
- Tian, G. Y.; Zhao, Z. X.; Baines, R. W.; Zhang, N. Computational algorithms for linear variable differential transformers (LVDTs). IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, Vol. 144, no. 4, pp. 189-192, 1997.
- Wu, S; M, S; Wu, B. An LVDT-based self-actuating displacement transducer, Sensors and actuators A: Physical, v.141, p.558-564, 2007.