

MODELAGEM DE TRANSDUTORES INDUTIVOS PARA SENSORES LVDT E RVDT

Bruno Damasceno Reis^{*1}, Giordanni da Silva Troncha¹, Lucas Gonçalves e Silva¹, Miguel Ravagnani de Carvalho¹ e Vinícius Freitas Rodrigues¹

¹FEELT - Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - O objetivo deste trabalho é apresentar, de forma analítica e simulada, a parametrização/modelagem dos sensores LVDT e RVDT. Foi utilizada a simulação com elementos finitos, e os parâmetros e materiais que compõem os transdutores foram determinados a partir da bibliografia analisada. Os resultados obtidos por meio do método de elementos finitos foram posteriormente utilizados para encontrar a leitura do transdutor e delinear seu comportamento com o auxílio do software MATLAB®. Constata-se que tais sensores, idealizados a partir da Lei de Faraday, descrevem uma aplicação acessível e direta da indução eletromagnética.

Palavras-Chave - Automação, LVDT, Modelagem, RVDT, Sensor, Transdutor.

INDUCTIVE TRANSDUCERS MODELING FOR LVDT AND RVDT SENSORS

Abstract - The objective of this research is to present, in an analytical and simulated ways, the parameterization/modeling of the LVDT and RVDT sensors. Finite element simulation was used, also the parameters and the materials that make up the transducers were determined from the analyzed bibliography. The results obtained with finite element methods were later used to read the transducer values and outline its behavior with the help of MATLAB®. It turns out that such sensors, idealized by Faraday's Law, describe an accessible and straightforward application of the electromagnetic induction.

Keywords - Automation, LVDT, Modeling, RVDT, Sensor, Transducer.

NOMENCLATURA

LVDT Transformador Diferencial Variável Linear.

RVDT Transformador Diferencial Variável Rotativo.

v_{in} Sinal de tensão de entrada no transdutor.

v_{out} Sinal de tensão de saída no transdutor.

\angle Fase da tensão de saída.

^{*}brunodreis@ufu.br

L_p Indutância do enrolamento primário do transdutor.

L_{s1} Indutância da 1ª bobina do secundário do transdutor.

L_{s2} Indutância da 2ª bobina do secundário do transdutor.

l_c Comprimento do núcleo do transdutor.

R_c Raio do núcleo do transdutor.

l_p Comprimento da bobina primária do transdutor.

$R_{p,i}$ Raio interno da bobina primária do transdutor.

$R_{p,e}$ Raio externo da bobina primária do transdutor.

l_s Comprimento da bobina secundária do transdutor.

$R_{s,i}$ Raio interno da bobina secundária do transdutor.

$R_{s,e}$ Raio externo da bobina secundária do transdutor.

$R_{s,s}$ Separação entre as bobinas secundárias do transdutor.

ΔD Deslocamento vertical do núcleo.

D_e Diâmetro externo do RVDT.

D_i Diâmetro interno do RVDT.

d_{er} Diâmetro do eixo de rotação.

ger gap/lacuna de ar entre eixo de rotação e núcleo.

G Fator de sensibilidade.

E_{s1} Tensão na bobina 1 do secundário do RVDT.

E_{s2} Tensão na bobina 2 do secundário do RVDT.

θ Ângulo de abertura.

$\Delta\theta$ Variação angular do núcleo.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a automação das máquinas e da manufatura possui métodos e técnicas que crescem cada vez mais, estando em constante desenvolvimento e aprimoramento. Tal evolução busca a aplicação de mecanismos mais precisos, robustos e eficientes.

A partir disso, há a necessidade de se utilizar equipamentos que agregarão benefícios significativos à processos variados.

Isso, por meio de princípios aplicados de forma condizente ao nível tecnológico da indústria atual. Um dos princípios físicos pertinentes a serem estudados é o da indução eletromagnética, que permite a elaboração de vários sensores.

O sensor LVDT (da sigla, em inglês, *Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Linear) é um tipo de transdutor eletromecânico fundamentado na transformação do deslocamento retilíneo de um núcleo magnético em um sinal de corrente elétrica correspondente [3].

Por outro lado, o RVDT (da sigla, em inglês, *Rotary Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Rotativo) é um transdutor que opera com intuito de transformar o deslocamento angular de um núcleo magnético em sinal de corrente elétrica correspondente [4].

Em uma breve síntese, tais sensores conseguiriam converter o deslocamento de um pistão ou a abertura de um braço robótico em um sinal elétrico específico [5]. A partir da leitura desses sinais seria possível ativar um vasto número de atuadores, como motores, por exemplo. E ainda, tais dispositivos possuiriam os destacáveis aspectos de alta resolução e repetibilidade, resposta rápida e baixos índices de manutenção [2]. Dos laboratórios à indústria, atuação de sensores tais como os citados se torna viável e ansiável.

Este trabalho abordará os princípios de funcionamento dos LVDTs e RVDTs alinhados com simulação computacional, através dos *softwares* FEMM e MATLAB®.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Através de estudos teóricos sobre os conceitos de eletromagnetismo, foi possível elaborar um método de modelagem dos transformadores em questão. Uma vez que a análise de elementos finitos, realizada no software FEMM, apenas resulta no fluxo presente nas bobinas secundárias, a Lei de Faraday teve de ser utilizada para cálculo da força eletromotriz presente nos enrolamentos.

A. Lei de Faraday-Lenz

A Lei de Faraday (Lei da Indução Eletromagnética) aborda a interação de um circuito elétrico com o campo magnético, produzindo uma força eletromotriz. Ela afirma que a variação no fluxo de campo magnético através de materiais condutores induz o surgimento de uma corrente elétrica [7].

A equação que descreve o comportamento da força eletromotriz ε induzida em um circuito em relação à variação de fluxo $\Delta\Phi$ que passa por ele, em um intervalo de tempo Δt , é representada por:

$$\varepsilon = - \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t} \quad (1)$$

B. Análise pelo Método de Elementos Finitos

Um vez que a modelagem analítica clássica de um transdutor indutivo com núcleo móvel pode apresentar imprecisões

em decorrência de simplificações algébricas, uma análise através do método de elementos finitos mostrou-se uma alternativa mais atrativa [1].

Tal método consiste na resolução de um problema proposto de equações diferenciais parciais, de maneira computacional, para determinadas condições de contorno, permitindo uma representação precisa dos resultados para uma geometria complexa. A análise de elementos finitos magnéticos realiza este cálculo para problemas de engenharia formulados a partir das equações de Maxwell [8].

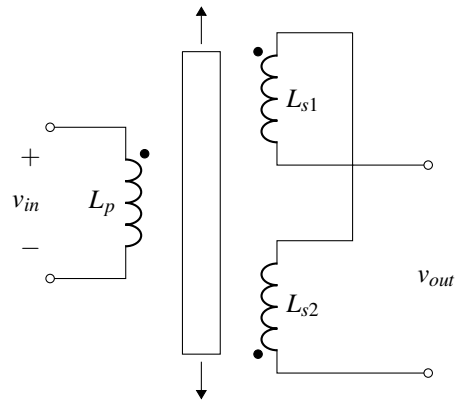
O software FEMM oferece uma alternativa às ferramentas pagas de análise de elementos finitos sem que a acuidade da modelagem seja prejudicada.

C. LVDT e RVDT

Quando dois indutores são posicionados próximos, a corrente elétrica que circula em um deles induzirá uma força eletromotriz no outro, como observado na Lei de Faraday-Lenz. A partir disso, cria-se uma indutância mútua definida como a propriedade de uma bobina se opor à corrente devido a mudança de corrente na outra.

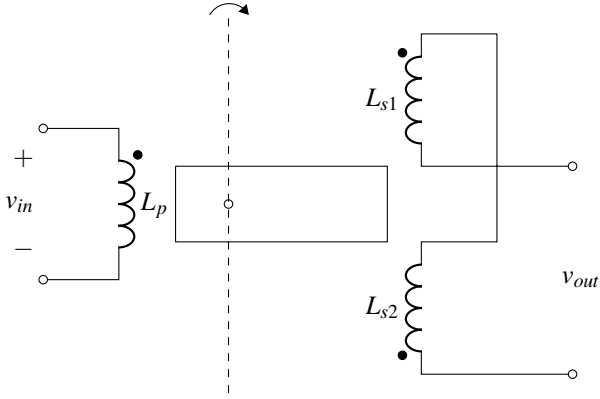
O LVDT é um sensor magnético embasado na alteração da indutância mútua entre as bobinas secundárias, proporcionalmente ao deslocamento do núcleo móvel [9]. No estado inicial, o núcleo é disposto de modo simétrico, de forma que a indutância mútua nas bobinas seja nula, e consequentemente, a tensão diferencial obtida na saída.

Figura 1: Circuito Equivalente de um LVDT



O RVDT opera de forma similar ao LVDT, substituindo o deslocamento linear do núcleo por um angular do mesmo elemento. Um núcleo com mobilidade rotacional é posicionado entre a bobina do primário e as bobinas do secundário de maneira simétrica. Ao movimentar-se o núcleo se aproxima de uma das bobinas do secundário, de forma que as indutâncias secundárias assumam valores distintos e uma tensão diferencial na saída apareça.

Figura 2: Circuito Equivalente de um RVDT



Diferente da fundamentação teórica do LVDT, no RVDT a topologia característica em que o componente foi modelado é decisivo para sua descrição analítica.

Usualmente, adota-se uma estratégia para se representar o RVDT à partir das tensões de saída e um fator G de sensibilidade.

$$\theta = G \cdot \left(\frac{E_{s1} - E_{s2}}{E_{s1} + E_{s2}} \right) \quad (2)$$

Tal fator G pode não ser constante, o que significa que o sistema analisado seria não-linear [10].

A tensão diferencial também pode ser dada como função do ângulo e da sensibilidade do sensor:

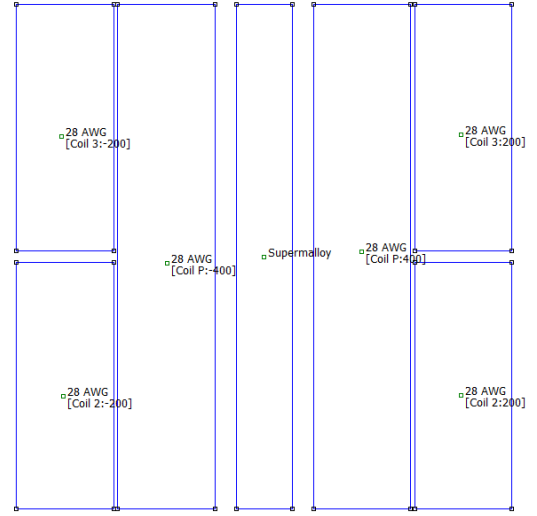
$$\Delta v_{out} = 2 \cdot G \cdot \Delta \theta \quad (3)$$

III. MODELAGEM

A. LVDT

O transdutor indutivo LVDT é uma escolha recomendada para inúmeras aplicações em que alta precisão é requerida na aferição por diversas razões, e sua flexibilidade topológica é uma delas. Uma das maneiras de construção de um LVDT mais comuns consiste em duas bobinas, referidas como o enrolamento secundário, conectadas em série envolvendo o núcleo transladável. O enrolamento primário, então, é projetado de maneira que envolva o enrolamento secundário, assim como o núcleo. Assim, a simetria da densidade de fluxo presente nas bobinas do secundários é garantida quando o núcleo encontra-se na posição de deslocamento zero. A topologia descrita foi aplicada da modelagem do LVDT no software FEMM.

Figura 3: Modelo do LVDT realizado através do FEMM



O material do o núcleo deve atender às necessidades magnéticas de um transformador ultrasensível, uma vez que deve apresentar um comportamento de alta eficácia quando submetido à um fluxo variante de alta frequência (a corrente de excitação de um LVDT pode variar de 1 à 10 kHz). Então, o material determinado foi o Supermalloy: uma liga magnética macia de níquel (75%), ferro (20%), e molibdênio (5%) [5].

Para o comprimento máximo determinado das bobinas de cada enrolamento, e para a composição por fios de cobre 38 AWG (escala *American Wire Gauge*), foi determinado que o enrolamento primário tivesse 400 voltas, e o cada bobina do secundário, 200 voltas.

Tabela 1: Parâmetros físicos do LVDT

l_c (mm)	R_c (mm)	l_p (mm)	$R_{p,i}$ (mm)	$R_{p,e}$ (mm)
14	130	12,7	37,7	130

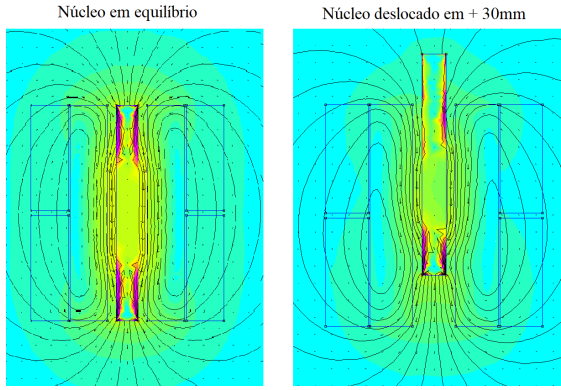
Tabela 2: Parâmetros físicos do LVDT

l_s (mm)	$R_{s,i}$ (mm)	$R_{s,e}$ (mm)	$R_{s,s}$ (mm)
130	39,7	63,7	3

As análises foram realizadas com uma corrente de excitação do enrolamento primário de 50 mA de pico, a uma frequência de 5 kHz. Após determinar que o meio que envolve o fluxo gerado pelo enrolamento primário é ar, a malha foi gerada e a simulação foi realizada para uma situação em que o núcleo não estava deslocado, ou seja, estava na posição de equilíbrio, verificável pela simetria da densidade de fluxo entre as bobinas do enrolamento secundário. Então, mais uma simulação de teste foi realizada, a fim de identificar o comportamento assimétrico da densidade no fluxo nas bobinas do enrolamento secundário quando o núcleo havia sido deslocado.

A ferramenta de análise de resultados do FEMM permitiu determinar que o comportamento descrito ocorreu como esperado.

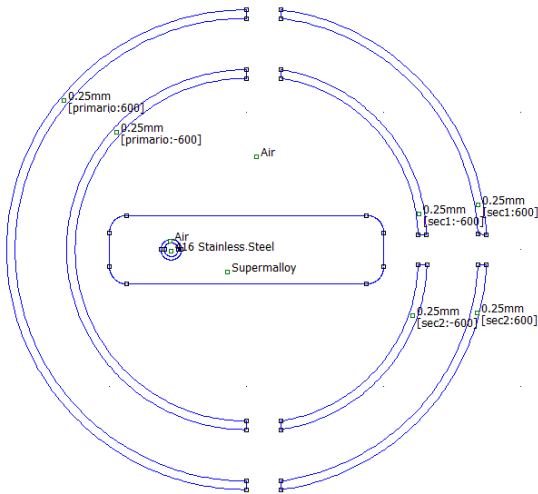
Figura 4: Densidade de fluxo no LVDT.



B. RVDT

Assim como no sensor LVDT, existe grande ajustabilidade para se projetar a topologia do sensor. Nesse caso, a decisão tomada no *design* afetará mais significativamente a linearidade e a sensibilidade do dispositivo. Para efeito de demonstrar o princípio físico acerca do RVDT, adotou-se uma geometria que torna possível a visualização do modelo de elementos finitos de forma planar.

Figura 5: Modelo planar do RVDT realizado através do FEMM.



O sensor é formado por um núcleo de *Permalloy* em paralelepípedo de $0.5 \times 2,0$ cm no plano superior, e 4 cm de altura. As bobinas são dispostas em um toróide circunscrevendo o monolito ferromagnético. O enrolamento primário descreve um arco de 180° , e do lado oposto são posicionadas os enrolamentos secundários em dois arcos de aproximadamente 90° em série.

O eixo de rotação foi posicionado de forma não centralizada no núcleo. Isso a fim de aumentar a assimetria do campo magnético em razão do giro da peça, e consequentemente a diferença de tensão nas bobinas. No entanto, tal decisão de projeto limita o intervalo angular para aberturas de -42° à 42° .

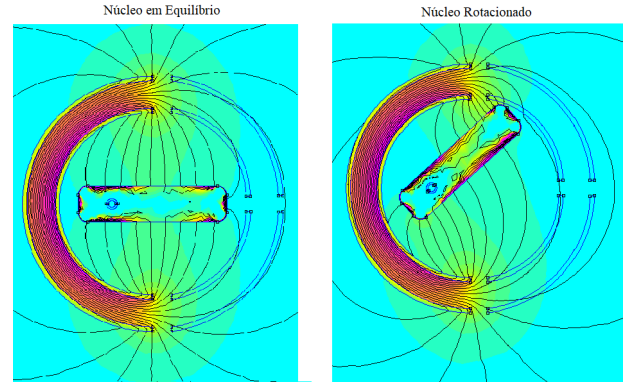
Demais especificações físicas do RVDT são cedidos na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros físicos do RVDT

D_e (mm)	D_i (mm)	R_b (mm)	d_{er} (mm)	g_p (mm)
25	35	5	1	0,1

Para completar a parametrização, foram usados fios de cobre de 0,3 mm formando 600 espiras na bobina do primário e 300 em cada bobina do secundário, o eixo de rotação foi definido como feito de aço inoxidável 416 e o meio foi preenchido com ar.

Figura 6: Densidade de fluxo no RVDT.



IV. ENSAIOS SIMULADOS

A. LVDT

Como determina a fundamentação teórica do LVDT, este transdutor indica movimento linear do núcleo através da diferença de potencial encontrada entre as bobinas do secundário. Portanto, a modelagem desse sensor deve contemplar ensaios preditivos sobre seu funcionamento teórico. Para conformar este requisito de projeto, foram realizadas simulações de ensaios para a coleta de dados de saída e aferição da sensibilidade.

A modelagem realizada do sensor permite apenas o deslocamento vertical em uma direção do núcleo e translada, portanto, nos sentidos a favor e contrário à direção determinada. O comprimento do núcleo modelado é de 130 mm, então um deslocamento máximo de 100 mm foi selecionado. Entre a posição de simetria e o deslocamento máximo, foram realizadas dez simulações. FEMM pode fornecer o valor de queda de desidade de fluxo, o fluxo mútuo entre as bobinas, a corrente e impedância de cada bobina, assim como a tensão induzida. Através desta última, foi possível calcular a diferença de tensão induzida entre a bobina inferior e superior do enrolamento secundário.

Tabela 4: Tensão diferencial obtida na simulação de ensaio

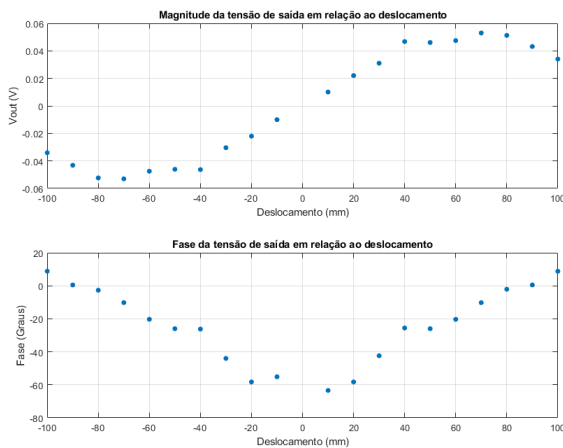
ΔD (mm)	v_{out} (mV)	\angle (Graus)
100	-34,076	8,456
90	-43,177	0,500
80	-52,373	-2,697
70	-52,997	-10,181
60	-47,486	-20,296
50	-46,094	-25,988
40	-46,295	-26,208
30	-30,378	-43,996
20	-22,030	-58,255
10	-10,021	-52,512
-10	10,076	-63,401
-20	22,055	-58,244
-30	31,046	-42,366
-40	46,773	-25,584
-50	46,095	-25,972
-60	47,449	-20,329
-70	53,015	-10,224
-80	51,237	-2,090
-90	43,182	0,516
-100	34,045	8,821

B. RVDT

V. RESULTADOS

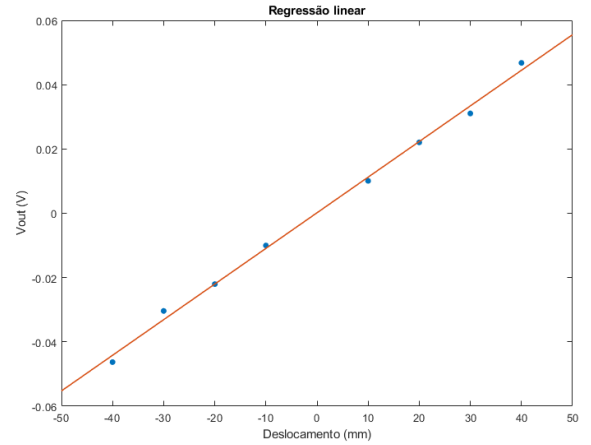
Uma representação gráfica da dispersão dos dados obtidos permite uma visão analítica sobre a característica de transferência do LVDT. É possível observar que o transdutor apresenta um comportamento razoavelmente linear em um limite de deslocamento total de 80 mm (de -40 mm à 40 mm), e perde a linearidade a partir deste ponto.

Figura 7: Comportamento de transferência do transdutor linear



Portanto, foi definida uma região limite de medição, que está contida entre os valores de deslocamento de -40 mm à 40 mm. Logo, torna-se possível a estimativa condicional da regressão linear da dispersão dos valores de tensão diferencial referente ao deslocamento.

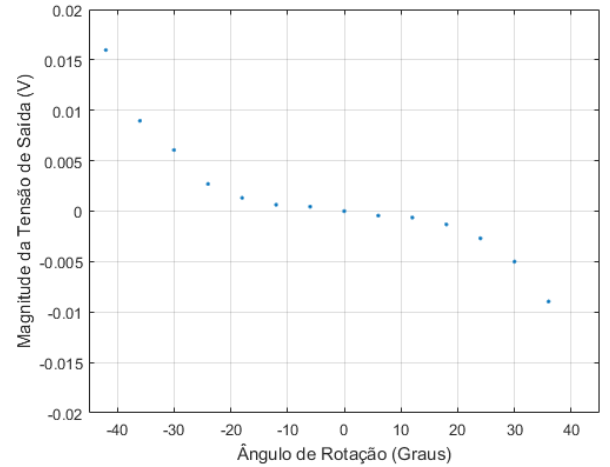
Figura 8: Comportamento de transferência do transdutor linear



$$v_{out} = 0,0011 \cdot \Delta D + 0.00015$$

A representação gráfica da dispersão dos dados para o RVDT demonstra a dificuldade de se modelar analiticamente tal sensor. Para a o modelo selecionado, e devido à sua geometria específica, a forma como as linhas de campo atravessam as bobinas resultou em um comportamento não desejável. Conforme o núcleo se aproxima de uma das bobinas, as linhas de campo se curvam de maneira a permear a bobina oposta com mais intensidade. Tal comportamento da geometria planar selecionada frustra o proposto para um RVDT típico.

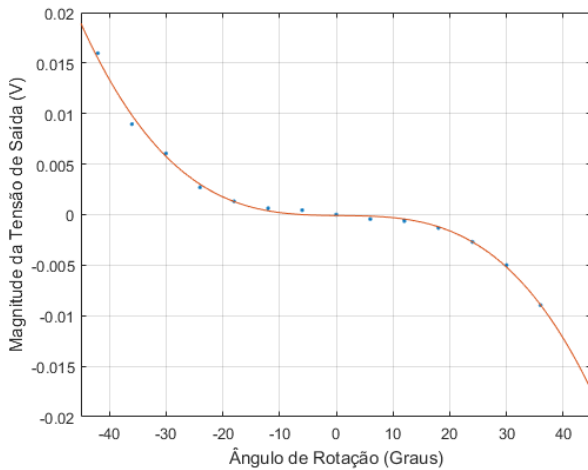
Figura 9: Ensaio simulado no RVDT.



Além disso o sensor manifesta seu caráter não-linear. Apesar desse efeito também não ser desejado, ele é comum e portanto previsto para RVDTs. Como discutido anteriormente, o fator de sensibilidade G , que caracteriza a função de transferência do sensor, pode ser não-linear.

Visto a dificuldade de se decompor o RVDT analiticamente e também da sua falta de linearidade, foi conveniente aproximar o comportamento do dispositivo por uma regressão polinomial. Para o aspecto da dispersão dos dados, foi oportuno representar a curva como um polinômio de terceira ordem.

Figura 10: Regressão cúbica para o comportamento de v_{out} no RVDT



O seguinte polinômio cúbico aproxima o comportamento do RVDT, como uma função de θ e com v_{out} em mV:

$$v_{out} = -0.0002\Delta\theta^3 + 0.00041\Delta\theta^2 - 0.00549\Delta\theta - 0.08743$$

VI. CONCLUSÕES

Concluído o trabalho, foi possível observar a atuação da indução eletromagnética no ramo de interesse do controle e automação com auxílio dos softwares citados anteriormente.

Este trabalho foi fundamental para o entendimento detalhado sobre a importância desses sensores e seus funcionamentos, por meio do estudo de seus comportamentos e a partir das simulações por elementos finitos.

Urge avaliar e catalogar as múltiplas topologias possíveis para LVDTs e RVDTs. Somente de tal forma será possível convergir em uma operação otimizada e descomplicada matematicamente.

REFERÊNCIAS

- [1] L. A. Sharif, M. Kilani, S. Taifour, A. J. Issa, E. A. Qaisi, F. A. Eleiwi, O. N. Kamal "Linear Variable Differential Transformer Design and Verification Using MATLAB and Finite Element Analysis", *MATLAB for Engineers - Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics*, Karel Perutka, IntechOpen, Ed. 1, Chapter-4, pp. 75-94, October 2011.
- [2] D. Thomazini, P. U. B. de Albuquerque, *Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações*, Editora Érica, Ed. 4, São Paulo, Chapter-3, pp. 49, 2011.
- [3] TE Connectivity (2020). *Basics of the Linear Variable Differential Transformer*. Acedido em 3 de Dezembro de 2020, em: <https://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/lvdt-tutorial.html>.
- [4] Moog Inc. (2019). *Rotary Variable Differential Transformer RVDT Technical Data Sheet*. Acedido em Outubro de 2019, em: <https://www.moog.com/literature/MCG/RVDTDtS.pdf>.
- [5] R. Y. Valdez, R. A. Gallegos, A. C. Ruiz, L. R. Huerta, "Selection of Soft Magnetic Core materials Used on an LVDT Prototype", *Journal of Applied Research and Technology*, 10(2). Acedido em Abril de 2012, em: <https://doi.org/10.22201/icat.16656423.2012.10.2.409>.
- [6] L. J. Petrosky, I. J. Oppenheim, "Application of Model Based Control to Robotic Manipulators", *2nd Annual Workshop on Space Operations Automation and Robotics (SOAR 1988)*, NASA, 1 de Novembro de 1988.
- [7] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, "Fundamentos de Física", Vol. 3, 9a ed., Chapter 30, pp 248-284, Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [8] M. Kuczmanski, A. Iványi, "The Finite Element Method", *The Finite Element Method in Magnetics, Akadémiai Kiadó*, Ed. 1, Chapter-4, pp. 125-146, January 2008.
- [9] W. Y. Du, "Sensing Principles of LVDTs, Fluxgate Sensors, RVDTs, Synchros, and Resolvers", *Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies*, CRC Press, Nova York, Chapter-4, pp. 196-197, 2015.
- [10] WatElectronics (2020). *Difference between LVDT and RVDT and Its Advantages*. Acedido em 27 de Março de 2020, em: <https://www.watelectronics.com/difference-between-lvdt-and-rvdt-and-its-advantages/>.