

VERIFICAÇÃO TERMOGRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA NO LINOR DE UM MOTOR LINEAR

T. B. C. Alves, G. H. Alves, H. B. Ribeiro L. Martins Neto
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Núcleo de Máquinas e Aterramentos Elétricos, Uberlândia – MG

thiagocanuto.feelt@gmail.com, guilherme.henrique.alves@outlook.com, hemersonbrito@yahoo.com.br, lmn@ufu.br

Resumo - O objetivo deste trabalho é avaliar a distribuição de corrente na estrutura móvel de um Motor Linear. O procedimento conta com a utilização de um aparelho termovisor para aquisição de imagens térmicas, estabelecendo então regiões com maior fluxo de Corrente Elétrica, regiões essas identificadas pela dissipação de energia pelo efeito Joule.

Palavras-Chave – Motor Linear, Termovisor, Efeito Joule, Distribuição de Corrente Elétrica.

DISTRIBUTION THERMOGRAPHIC CHECK OF ELECTRICAL CURRENT IN A LINEAR ENGINE LINOR

Abstract – The purpose of this project is to evaluate the current distribution in the movable structure of a Linear Engine. The procedure counts with the usage of a thermal imager device to the acquisition of thermic images, establishing so regions with higher flux of Electrical Current, those regions identified by electricity dissipation by Joule effect.

Key words – Linear Engine, Thermal imager, Joule Effect, Electrical Current Distribution

NOMENCLATURA

i	Corrente Elétrica.
t	Tempo.
MIL	Motor de Indução Linear
P	Potência Elétrica.
Q	Energia em Joules.
$[V(t)]$	Matriz de tensões do estator e linor.
$[I(t)]$	Matriz de correntes do estator e linor.
$[R]$	Matriz de resistências da máquina.
$[L]$	Matriz de indutâncias da máquina.
W_h	Watt-hora.

I. INTRODUÇÃO

As máquinas lineares podem ser traduzidas em sistemas capazes de transformar energia elétrica em movimento translacional. Apesar de ser descoberto pouco tempo após a formulação da Lei de Faraday, o motor linear de fato foi empregado no ano de 1950 pelo físico e professor E. R. Laithwaite [1].

Existe uma grande variedade de aparatos mecânicos capazes de transformar o movimento rotacional provido dos motores convencionais em movimento translacional, porém, o feito é realizado com o auxílio de molas, sistemas pneumáticos, eixos excêntricos e outros equipamentos mecânicos considerados de alto custo e com grande índice de manutenção. Sendo a principal vantagem de um motor de indução linear, a obtenção do deslocamento translacional direto, isso é, sem auxílio de atuadores mecânicos complexos, de elevado custo e desgaste.

Com características bastante semelhantes aos motores rotacionais, a máquina Linear possui uma parte fixa também chamada de estator e uma parte móvel onde foi atribuído no ano de 1957 o nome linor [2].

Embora muito semelhantes aos motores rotacionais, às máquinas lineares não apresentam um circuito magnético fechado para a circulação do campo, tão pouco o espalhamento uniforme das bobinas do estator ao redor do linor. Tal característica origina os efeitos de borda bem como o desbalanceamento das correntes de fase e a não uniformização da corrente circulante no linor, isto é, a corrente induzida no linor não circula todo o seu material.

Como foco, será constatado neste artigo a não uniformização da corrente existente no linor. Para tanto, recorreu-se a técnica de termográfica, avaliando então a dissipação de potência por efeito Joule em cada trecho do linor, possibilitando a identificação de pontos com maior densidade de corrente elétrica.

II. EFEITO JOULE

Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica qualquer, ocorrerá a transformação da energia elétrica em energia térmica elevando a temperatura do condutor. Tal fenômeno é conhecido como Efeito Joule, em homenagem ao físico britânico James Prescott Joule (1818-1889).

A equação (1) é utilizada para obtenção da potência dissipada por efeito Joule em um condutor qualquer percorrido por uma corrente constante elétrica.

$$P = R \cdot i^2 \quad (1)$$



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

Já a energia dissipada em W_h , pode ser obtida multiplicando a potência pelo tempo em que o condutor é percorrido pela corrente elétrica, tornando então a equação (2).

$$E = i^2 \cdot R \cdot t \quad (2)$$

No caso do motor linear, sendo a corrente variável em função do tempo, será utilizada a fórmula a seguir, para o cálculo da energia dissipada no condutor.

$$E = R \cdot \int_{t_1}^{t_2} i^2(t) dt \quad (3)$$

III. CÁLCULO DA CORRENTE NO LINOR

O equacionamento das máquinas lineares é bastante semelhante ao das máquinas rotativas [3], diferindo apenas pelos efeitos de extremidade presentes nas máquinas lineares, que não estão em foco neste artigo, onde será recorrido ao equacionamento da máquina rotativa como forma de estimativa das correntes de linor.

A equação matricial (4) é bastante utilizada para o cálculo da corrente induzida no rotor (no caso da máquina rotativa) ou no linor (no caso da máquina Linear).

$$[V(t)] = [R] \cdot [I(t)] + [L] \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} \quad (4)$$

As matrizes (5) e (6) representam os elementos de tensão e corrente utilizados na equação (1), sendo as matrizes [R] e [L] não apresentadas, porém facilmente obtidas com o ensaio da máquina a ser avaliada.

$$[V(t)] = \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Na matriz $[V(t)]$ é possível observar que as componentes de tensão do linor ($v_A(t)$, $v_B(t)$, $v_C(t)$) são igualadas a zero pelo fato de estarem inseridas em uma única placa com resistência muito baixa, sendo considerado um curto-circuito.

$$[I(t)] = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

De posse da equação fornecida, é possível o cálculo da matriz $[I(t)]$ definindo então além das correntes inseridas no estator, as correntes induzidas no linor, uma vez conhecidos os parâmetros da máquina e a tensão aplicada.

Vale lembrar, que embora possa ser estimada pela equação, não terá um alto grau de precisão, uma vez que não

estão sendo avaliados os efeitos de borda existentes nas máquinas de indução linear.

Apesar de levantados os parâmetros para o cálculo das correntes elétricas na lâmina linorica, este expressa apenas à amplitude de cada componente, não trazendo informação alguma referente à densidade da corrente elétrica existente no linor.

IV. CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES UTILIZADOS

Para a realização do estudo almejado, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Motor de indução linear;
- Varivolt de 15 KVA;
- Multímetro AC;
- Termovisor;

Sendo o varivolt e o multímetro, equipamentos convencionais não necessitando de melhor detalhamento.

A. Motor de indução linear

Foi utilizada uma máquina de indução linear com estator de dupla face e linor em alumínio polido, com 3 mm de espessura e comprimento consideravelmente maior se comparado ao estator. A máquina foi projetada com estrutura em chapa de aço carbono, sendo o estator fabricado com núcleo de silício. O motor estudado é apresentado na figura 1.

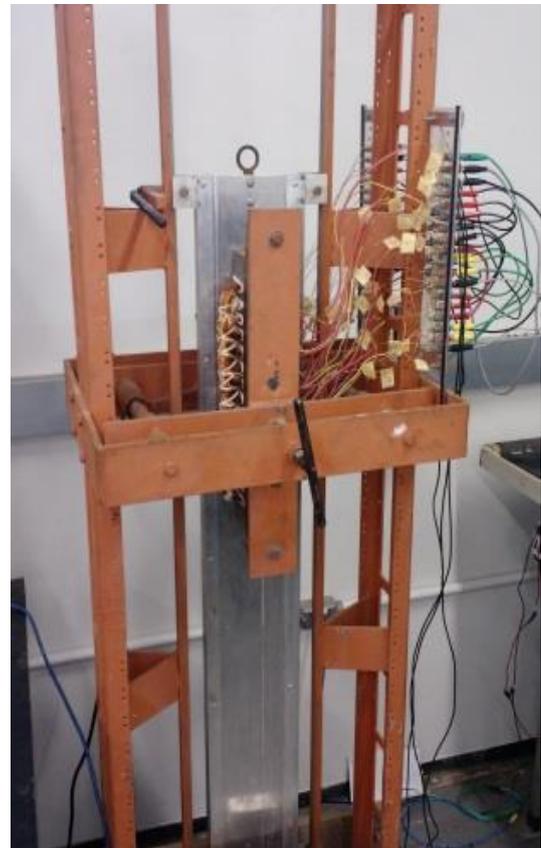


Fig. 1. Motor de indução Linear

A figura 2 ilustra a vista superior, exibindo a montagem das duas faces do estator, bem como o linor (chapa de alumínio, inserida entre os núcleos do estator).



Fig. 2. Vista superior do Motor de Indução Linear

Como recurso para interpretação do sistema, a figura abaixo ilustra didaticamente o arranjo formado pelo estator e linor.

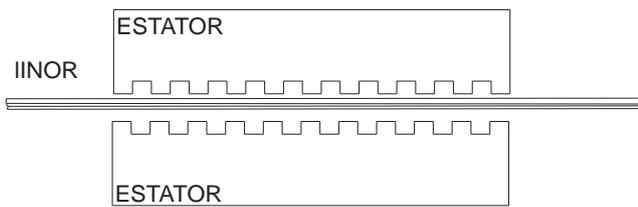


Fig. 3. Desenho didático do Motor de Indução Linear

Sabendo que se trata de um motor de 4 polos, com as duas faces do estator conectadas em estrela com neutro comum, porém flutuante, tensão nominal de 220 V, frequência de 60 Hz e demais parâmetros obtidos por intermédios de ensaios e apresentados na tabela da numero 1.

Tabela 1 - Parâmetros do Motor de Indução Linear

Parâmetros do Motor de Indução Linear		
Parâmetro	Descrição	Valor
Resistências do Estator	R_a	3,8958 Ω
	R_b	4,2171 Ω
	R_c	4,2231 Ω
Resistências do Linor	R_A	7,3021 Ω
	R_B	7,3000 Ω
	R_C	8,2140 Ω
Reatância de Dispersão	X_{da}	13,9686 Ω
	X_{db}	14,1650 Ω
	X_{dc}	14,0563 Ω
	X_{dA}	1,5630 Ω
	X_{dB}	0,0240 Ω
	X_{dC}	1,8010 Ω
Reatância Própria	X_{aa}	9,5552 Ω
	X_{bb}	9,1173 Ω
	X_{cc}	9,7362 Ω
	X_{AA}	9,5552 Ω
	X_{BB}	9,1173 Ω
	X_{CC}	9,7362 Ω
Reatância Mútua	$X_{ab} = X_{bc} = X_{ca}$	9,1014 Ω

B. Termovisor

O termovisor é um dispositivo capaz de ler o calor emitido pelo corpo através da energia infravermelha. O sinal é processado eletronicamente e apresentado em seu display.

Foi utilizado o termovisor da marca Fluke, devidamente calibrado, modelo VT02, como apresentado na figura quatro.



Fig. 4. Termovisor utilizado no estudo

V. ENSAIO

Visando obter uma elevação de temperatura no linor da máquina, esta teve a parte móvel bloqueada e o estator alimentado pelo conjunto de tensões variantes no tempo, compreendidas pelas funções apresentadas nas equações (7), (8) e (9).

$$V_a = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (7)$$

$$V_b = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen}(\omega t + 120) \quad (8)$$

$$V_c = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen}(\omega t - 120) \quad (9)$$

A energização foi mantida por aproximadamente 10 minutos, até que constatada a elevação de temperatura do linor, momento em que foram adquiridas as imagens térmicas utilizando o aparelho termovisor.

Embora a amplitude da corrente elétrica inserida ao linor não tenha grande importância no estudo, esta foi estimada a título de curiosidade por intermédio de simulações computacionais no ambiente Simulink do Matlab. A figura abaixo exibe as correntes elétricas existentes no linor, provida pela energização da máquina conforme descrito:



Fig. 5. Corrente elétricas no linor do MIL

A figura 5 exibe a corrente elétricas inseridas as fases A, B e C do linor. É possível observar dois fatores, sendo estes: A amplitude da corrente elétrica que assume um valor máximo de aproximadamente 15 A em uma das fases e, como segunda avaliação, o desbalanceamento das correntes inseridas ao linor, o que é decorrente das características de desequilíbrio da máquina em avaliação.

A. Aquisição e tratamento das imagens

Após a aquisição das imagens térmicas, se faz necessário à configuração da emissividade da estrutura a ser estudada, bem como do plano de fundo que no momento do ensaio se encontrava em temperatura ambiente de 26 °C.

Para a configuração da emissividade, o fabricante dispõe de uma tabela com valores referentes a cada tipo de material. Como o linor é fabricado em alumínio, as possibilidades ofertadas pelo fabricante são informadas na tabela a seguir.

Tabela 2 - Valores fornecidos pelo fabricante referente à emissividade do alumínio

Material	Temperatura (°C)	Emissividade
Alumínio, polido	0	0,05
Alumínio, superfície áspera	0	0,07
Alumínio intensamente oxidado	0	0,25

De acordo com a tabela 2, a emissividade atribuída foi de 0,05, por estar mais próximo às características do linor a ser investigado.

B. Resultados

Com o aquecimento da máquina, foram obtidas as figuras inseridas abaixo, como forma de constatar a variação da densidade de corrente ao longo do linor.

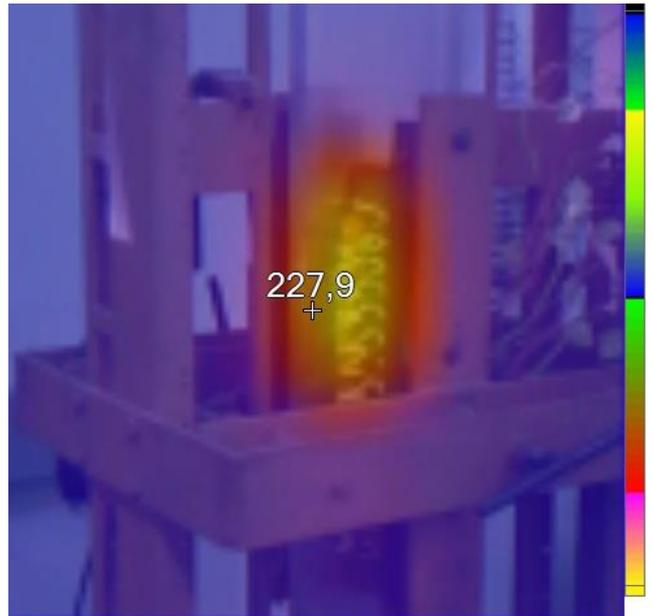


Fig. 6. Imagem térmica do MIL montado

A figura 6 exibe o motor linear ainda montado, estando o ponto central com temperatura de 227,9 °C. Embora seja identificada a elevação de temperatura, não se pode concluir o fato esperado, uma vez que o estator (também aquecido) interfere consideravelmente na imagem. Como forma de sanar o problema descrito, a máquina foi desmontada e o linor retirado, possibilitando então a investigação apenas da estrutura desejada, como é mostrado na figura 6.

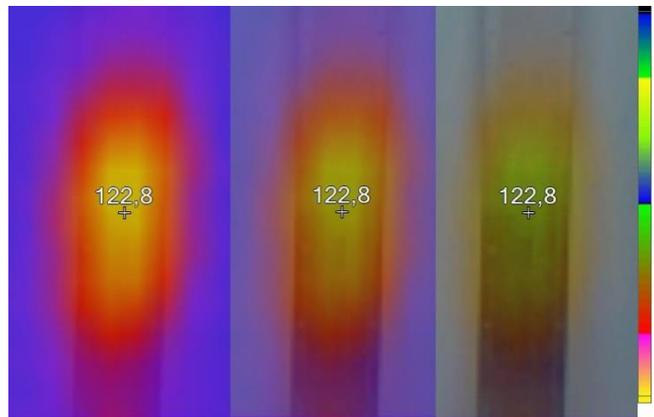


Fig. 7. Imagem térmica do linor retirado no MIL com diferentes mesclas de infravermelho

Na figura 7, a imagem foi tratada tendo como resultado 3 imagens da mesma chapa linorica, porém com diferentes mesclas de infravermelho para facilitar a observação de seu contorno.

Como apresentado na figura, pode-se observar que o trecho mais aquecido (centro da estrutura) atinge uma temperatura de 122,8°C, enquanto as regiões extremas são sinalizadas com a mesma coloração do plano de fundo, isto é, encontra-se com temperatura próxima a temperatura oi igual a temperatura ambiente de 26°C.

VI. CONCLUSÃO

O estudo realizado pode comprovar a concentração da corrente elétrica em determinados setores do linor. Como mencionado, esse fato era previsto devido às características do motor linear, ocasionando então a variação na densidade de corrente ao longo da chapa linorica.

Durante o ensaio, a máquina foi bloqueada para melhor visualização do efeito. Em situações convencionais de utilização, isto é, com a máquina em movimento, outros setores do linor sofrerão aquecimento, porém a variação da densidade de corrente ao longo da chapa manterá o mesmo perfil.

Para motores que apresentam um reduzido deslocamento, as condições são assemelhadas a situação de linor bloqueado. Neste caso, o projetista deverá atentar aos efeitos provocados pela dilatação do metal, característica que pode levar a deformação do mesmo.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] JULIANI, Aline Durrer Patelli. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR ELÉTRICO LINEAR APLICADO À BIOENGENHARIA**. 2011. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.
- [2] LAITHWAITE, E. R. **LINEAR INDUCTION MOTORS** – Proceedings IEE, paper n° 2433, p.462-470, dezembro, 1957.
- [3] A.E.FITZGERALD et al. **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência**. 6. ed. Nova York: Bookman, 2006. 648 p.
- [4] SOARES, Matheus Garcia. **MOTOR DE INDUÇÃO LINEAR BLOQUEADO - OBTENÇÃO DE CONJUGADO DESEJADO ATRAVÉS DE ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL**. 2013. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- [5] SIMONE, Gílio Aluisio. **CONVERSORES ASSÍNCRONOS LINEARES DE DUPLA FACE – TEORIA E PROJETO** -. 1992. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.
- [6] REPPE, Renato Crivellari. **UMA CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DE MÁQUINAS DE INDUÇÃO LINEARES**. 1997. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 1997