J. Guerreiro Gonçalves
Escola Superior de Tecnologia
Universidade do Algarve

### C. Pereira Cabrita

Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Portalegre

# Análise da Densidade de Fluxo Magnético em Actuadores Lineares de Indução Tubulares

## Summary

The tubular linerar induction motor (TLIM) is a very special type of LIM that find application as an actuator at very low speed and standstill mechanical handling. The understanding of the magnetic field allows to optimise the design and, consequently, the performances of this actuator. The paper presents a method, supposed to be original, to evaluate the magnetic flux distribution in such LIM, as a result of the authors research activities in the field of linear electric drives, carried out in the Electromechanical Engineering Department of the University of Beira Interior.

### Resumo

O motor linear de indução tubular (MLIT) é um motor eléctrico linear de indução (MLI) bastante especial, vocacionado para aplicações mecânicas em regime estático e a muito baixas velocidades. O conhecimento da distribuição do campo de indução magnética permite optimizar o seu dimensionamento e, consequentemente, as suas características de funcionamento. Este artigo apresenta um método, suposto original, de estudo da evolução da densidade de fluxo magnético neste tipo de actuador, como resultado dos trabalhos de investigação que têm vindo a ser desenvolvidos neste campo pelos autores, no Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior.

# 1. Introdução

Como é sabido [1], os actuadores lineares de indução são máquinas eléctricas não convencionais destinadas a ser aplicadas em accionamentos de movimento linear para distâncias até 2 m a 3 m, operando a velocidades não superiores a 2 m/s. Estes actuadores são caracterizados pela força de tracção desenvolvida para um determinado ciclo de trabalho, bem como pela força de tracção máxima em regime estático, isto é, no arranque. A geometria tubular é favorável para accionamentos inferiores a 0,5 m, sendo a força e a velocidade controladas por variação simultânea de tensão e de frequência, recorrendo-se a onduladores de tensão, ou apenas por variação de tensão, através de contactores estáticos.

A analise teórica proposta neste trabalho envolve os seguintes pressupostos [2, 3]:

• O actuador linear de indução tubular modelado na Figura 1 é formado pelos seguintes componentes: o primário (estator), o tubo condutor secundário (rotor) e o entreferro.

- A excitação do actuador é representada por uma lâmina de corrente de espessura infinitesimal.
- O movimento do secundário faz-se apenas na direcção do eixo y.
- As constantes físicas dos três meios são homogéneas, isotrópicas e lineares.
- O ferro do primário é linear, isto é, não satura.
- Considera-se apenas a situação em vazio, ou seja, não existe corrente no secundário.

### 2. Primeiro método de análise

Relativamente à Figura 2, seja i o valor instantâneo da intensidade de corrente numa simples espira de raio  $a = (D_{eb} + D_{ib})$  / 4 onde  $D_{eb}$  e  $D_{ib}$  representam, respectivamente, o diâmetro exterior e o diâmetro interior das bobinas primárias de um actuador linear de indução tubular. Essa corrente, num elemento infinitesimal ds, induz um campo magnético no ponto P situado no plano de referência y0z. Recorrendo-se à lei de Biot-Savart, a intensidade do campo magnético diferencial naquele ponto P será dada por [2]

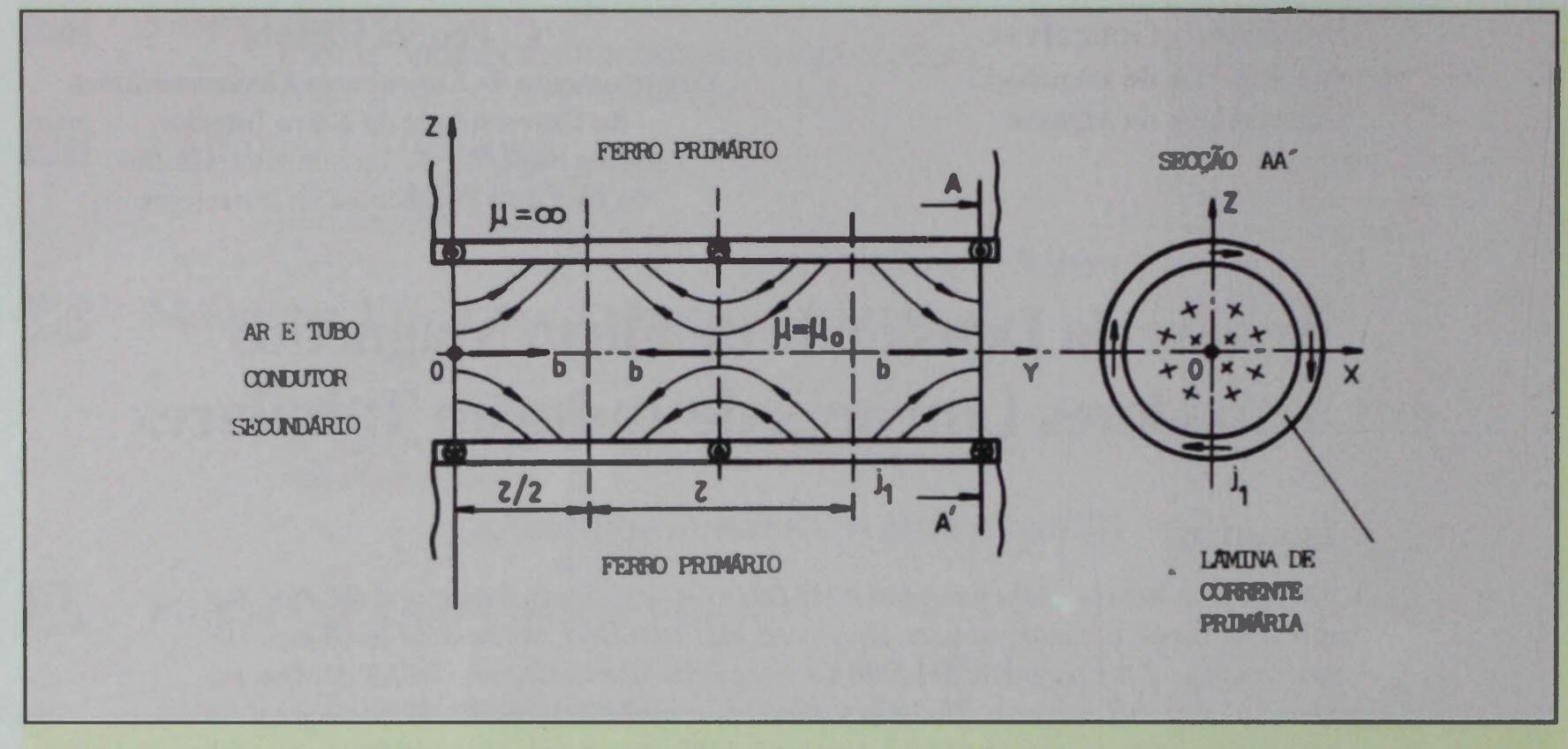


Figura 1 - Modelo de um motor linear de indução tubular trifásico (MLIT) com dois pólos.

$$d\vec{h} = \frac{i}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}$$
 (1)  $b_{y1} = \frac{\mu_0 \, a \, N_b \, i}{4 \, \pi} \int_0^{2\pi} \frac{(a - z_1 \sin \alpha) \, d\alpha}{(a^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2az_1 \sin \alpha)^{3/2}}$  (3)

$$r = \sqrt{a^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2zz_1}$$

$$(2) \quad b_{z1} = \frac{\mu_0 \, a \, N_b \, i}{4 \, \pi} \int_0^{2 \, \pi} \frac{y_1 \, \sin \alpha \, dx}{(a^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2az_1 \, \sin \alpha)^{3/2}}$$

a distância entre os pontos P e Q. Tendo em atenção que  $b = \mu_0 h$ , sendo b a densidade de fluxo magnético e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vazio, após uma manipulação matemática relativamente complexa, as componentes de b, induzidas por uma bobina com um número de espiras igual a  $N_b$ , segundo os eixos coordenados y e z serão dadas pelas seguintes expressões [2, 3]

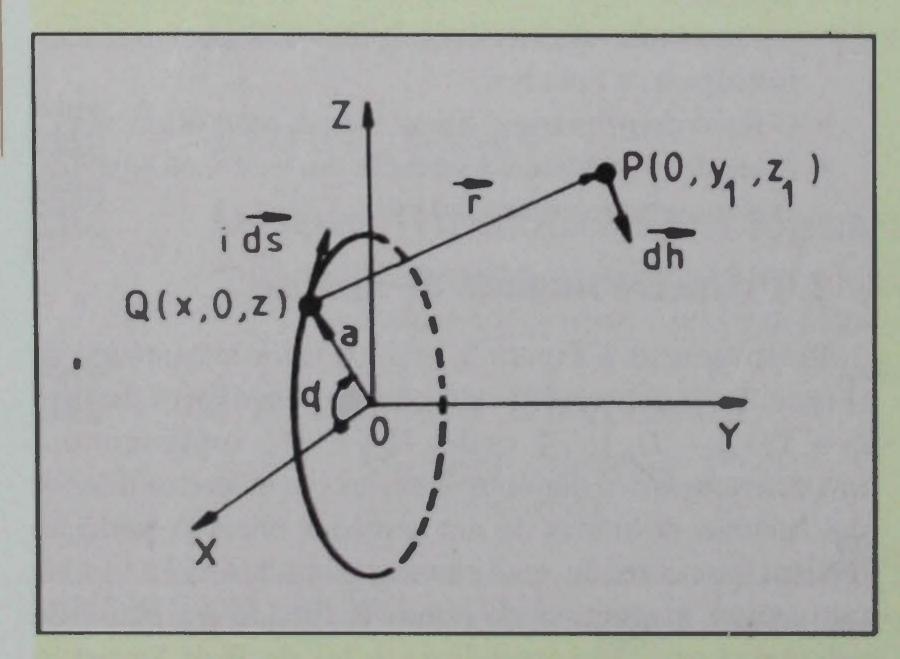


Figura 2 - Intensidade do campo magnético produzido num ponto P por uma espira circular de raio a, e excitada por uma intensidade de corrente i.

Pela sobreposição dos efeitos de todas as bobinas primárias do actuador linear de indução tubular, obtêm-se as componentes totais  $b_y$  e  $b_y$  da densidade de fluxo [2, 3]. Na figura 3 mostram-se as distribuições das componentes  $b_y e b_z$  para  $\omega t = 0$ , relativas a um actuador com 4 pólos (Figura 4) com os seguintes parâmetros construtivos [2, 3]: τ(passo polar) = 0,045 m,  $D_{cb}$  = 0,060 m,  $D_{cb}$  = 0,028 m,  $N_b$  = 400 espiras e I (valor eficaz da corrente por fase do primário) = 1 A. Ambas as componentes  $b_y e b_y$  foram obtidas por integração numérica das Eqs. (3) e (4). Como se pode observar na Figura 3, a componente longitudinal b, é pouco sensível à coordenada  $z_1$ , enquanto  $b_1$  aumenta desde o eixo y até ao diâmetro interior das bobinas primárias, isto é, até  $z_1 = a$ =0,014 m. Como seria de esperar, a componente b, ao longo do eixo y é nula na medida em que esse eixo representa a linha neutra magnética longitudinal.

# 3. Segundo método de análise

Outro método possível para se analisar a distribuição da densidade de fluxo magnético nos actuadores lineares de indução tubulares consiste em considerar-se um solenóide equivalente com um comprimento  $L=2p\tau$  igual ao comprimento total do actuador, sendo p o número de pares de pólos. Por conseguinte, as bobinas primárias do actuador

211

# by 0 (mT) 0 0.05 0.1 0.15 0.2 (mT) 0.05 0.1 0.15 0.2 (mT) 0.05 0.1 0.15 0.2 (mT) 0.05 0.1 0.15 0.2

Figura 3 - Distribuição da densidade de fluxo magnético segundo os eixos y e z, a partir das equações (3) e (4):

a) z1 = 0, b)  $z_1 = 0.007$  m, c)  $z_1 = 0.014$  m.

# MÁQUINAS ELÉCTRICAS

são substituídas pelas espiras do solenóide, de raio a. Cada bobina diferencial é responsável por uma lâmina de corrente  $j_1$  como se mostra na Figura 5, sendo a sua espessura  $d_y$  muito pequena quando comparada com o raio a [2, 3]. Por conseguinte, utilizando um novo conceito de densidade linear de corrente, proposto em [4], ou seja,

$$i = j_1 \tau = 3\sqrt{2} q N_b k_w I \sin(\omega t - \beta y + \frac{\pi}{6})$$
 (5)

e assumindo que a coordenada  $y_1$  é transformada na coordenada  $(y_1 - y)$ , resultarão, para as componentes da densidade de fluxo magnético no entreferro do actuador tubular de indução, as seguintes expressões [2, 3]:

$$b_{y} = \frac{3 \sqrt{2} \mu_{0} a q k_{w} N_{b}I}{4\pi}.$$

$$\int_{0}^{2 p \tau} \int_{0}^{2\pi} \frac{\sin(\omega t - \beta y + \frac{\pi}{6}) (a - z_{1} \sin \alpha) d\alpha dy}{[a^{2} + (y_{1} - y)^{2} + \hat{z}_{1} - 2az_{1} \sin \alpha]^{3/2}}$$
(6)

$$b_z = \frac{3\sqrt{2}\,\mu_0 a\,q\,k_w\,N_b I}{4\pi}.$$

$$\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \frac{\sin(\omega t - \beta y + \frac{\pi}{6})(y_{1} - y)\sin\alpha \,d\alpha \,dy}{[a^{2} + (y_{1} - y)^{2} + z_{1}^{2} - 2az_{1}\sin\alpha]^{3/2}}$$
(7)

Nestas expressões,  $k_w$  representa o factor de distribuição do enrolamento primário (devido à simetria cilíndrica, obviamente que o factor de encurtamento do passo é igual à unidade), q é o número de bobinas por pólo e por fase,

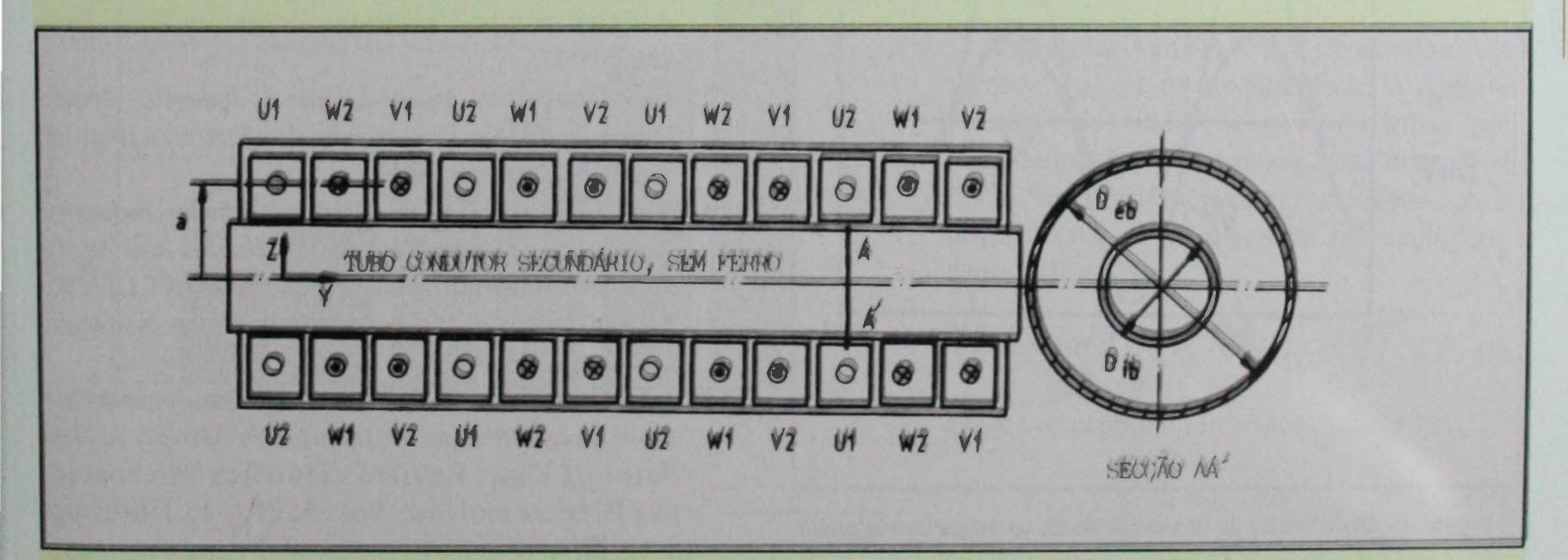


Figura 4 - Motor linear de indução tubular trifásico (MLIT) com uma estrutura de 4 pólos.

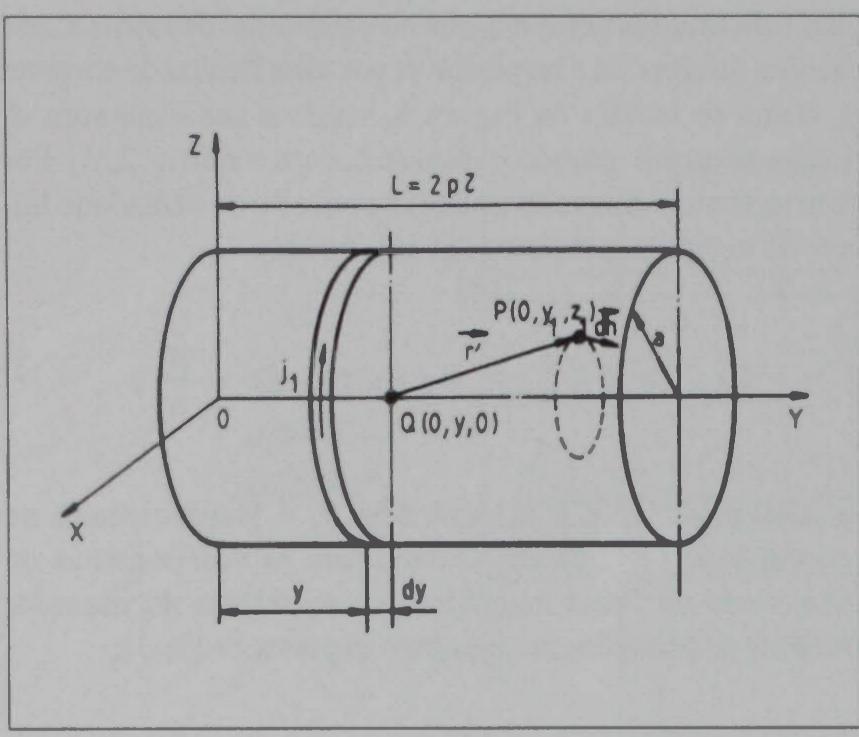


Figura 5 - Intensidade do campo magnético produzido num ponto P por uma única bobina de um motor linear de indução tubular (MLIT).

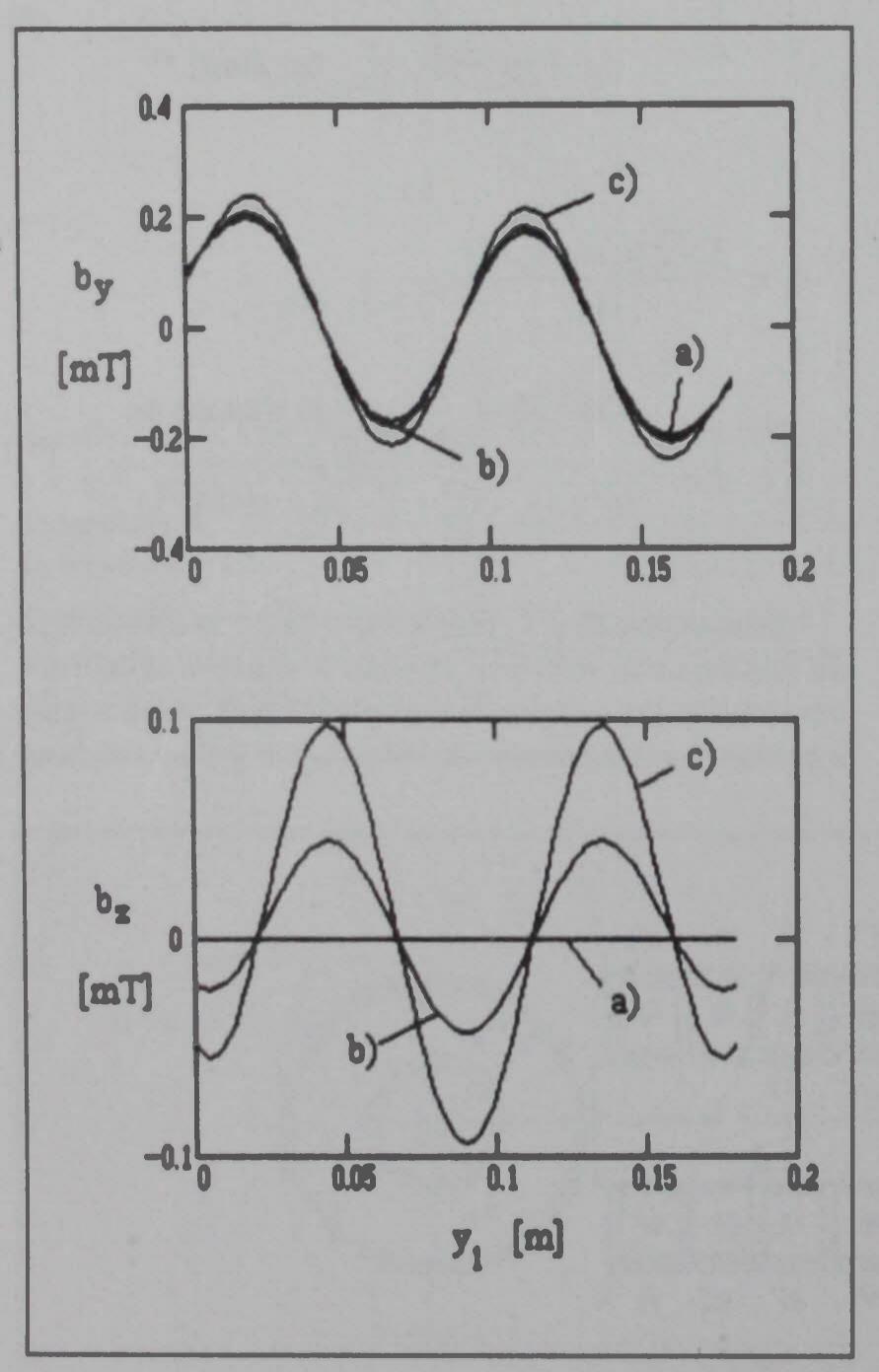


Figura 6 - Distribuição da densidade de fluxo magnético segundo os eixos y e z, a partir das equações (6) e (7): a)  $z_1 = 0$ , b)  $z_1 = 0.007$  m, c)  $z_1 = 0.014$  m.

 $\beta = \pi/\tau$ , e  $\omega$  é a frequência angular eléctrica da alimentação. Para o mesmo actuador tubular da secção anterior, a integração numérica das Eqs. (6) e (7) permite obter as distribuições expostas na Figura 6, para  $\sin(\omega t - \beta y + \pi/6)$  $= \sin \beta y$ .

Tendo em atenção a Eq. (6), o fluxo através da secção AA' (Figura 4) será obtido pela seguinte expressão [2, 3];

$$\phi = 2\pi \int_{0}^{D_{1b}/2} b_{y} \cdot z_{1} dz_{1} =$$

$$= \frac{3\mu_{0} a q k_{w} N_{b} I}{\sqrt{2}}$$
(8)

$$\int_{0}^{D_{1b}/2} \int_{0}^{2 p \tau} \int_{0}^{2\pi} \sin(\omega \tau - \beta y + \frac{\pi}{6}) (a - z_1 \sin \alpha) d\alpha dy z_1 dz_1$$

$$[a^2 + (y_1 - y)^2 + z_1^2 - 2az_1 \sin \alpha]^{3/2}$$

### 4. Conclusões

Com base nos traçados expostos nas Figuras 3 e 6, pode-se concluir da semelhança entre os resultados obtidos. Todavia, o primeiro método de análise é mais vantajoso e eficaz, devido ao tempo de computação necessário, isto é, cerca de cinco minutos contra seis horas para o segundo método, utilizando um computador pessoal 486 a 66 MHz [2, 3]. Este procedimento original, proposto pelos autores, pode ser aplicado com sucesso para se analisar a distribuição do campo magnético em vazio em actuadores tubulares de indução, como foi experimentalmente comprovado na Ref. [3].

# Referências Bibliográficas

- [1] I. Boldeia, S. A. Nasar, Linear Electric Actuators and Generators, Cambridge University Press, England, 1997.
- J. G. Gonçalves, Motor Linear de Indução Modelização e Ensaio, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 1994.
- J. G. Gonçalves, C. P. Cabrita, Tubular Induction Actuators - A New Method of Calculus and Analysis of the Magnetic Field, Proceedings of LDIA'95-Linear Drives for Industrial Applications, Nagasaki, 1995, pp. 357-359.
- [4] J. G. Gonçalves, C. P. Cabrita, The Equivalent Current Sheet in Linear Induction Motor, A New Point of View, Revista científica internacional Electromotion, Vol. 3, No. 1, 1996, pp. . 8-12.