

# UM SISTEMA DE MOTOR ELÉTRICO SEM MANCAL MECÂNICO

A.Ortiz Salazar

Depto. Eng. Elétrica  
Campus Universitário  
UFRN - Natal  
59072-970 - RN  
Brasil

R.M.Stephan

Depto. Eng. Elétrica  
COPPE/EE/UFRJ  
Caixa Postal 68504  
21945-970 -RJ  
Brasil

W.Dunford

Dept. of Elect. Engineering  
23565 Main Mall  
University of British Columbia  
Vancouver, B.C.  
Canada V6T 1W5

**RESUMO** - São apresentados fundamentos teóricos e resultados experimentais de uma proposta inovadora de máquina elétrica sem mancais mecânicos. Dois tipos de máquinas foram testadas: indução e relutância. O estator do motor é alimentado de modo a produzir os efeitos de rotação e posicionamento do rotor através da superposição de correntes convenientemente geradas em cinco inversores eletrônicos. Sensores de efeito Hall informam o afastamento do eixo do motor da sua posição central para processamento e atuação do sistema de controle. A proposta apresenta as mesmas características dos mancais magnéticos convencionais com a vantagem adicional de menor espaço ocupado.

**ABSTRACT** - This paper presents a theoretical analysis and experimental results of a new proposal for bearingless electrical machines. Two types of machines are tested: induction and reluctance. The main contribution of this work lies in the use of the same electromagnetic system to obtain forces for rotation and positioning through the superposition of currents generated by five electronic inverters that feed the stator windings. The rotor displacement is given by Hall effect sensors. This proposal has the same advantages of commercially available magnetic bearings and additionally calls for less space.

## 1. INTRODUÇÃO

Os mancais magnéticos, devido às suas características de atrito mecânico nulo, ausência de lubrificação e sustentação em alta velocidade de rotação, encontram aplicação nas indústrias leve e pesada sempre que o emprego de mancais mecânicos convencionais torne-se inaceitável. A utilização desta tecnologia vem sendo pesquisada há mais de 50 anos por diferentes grupos de pesquisadores (Haberman, 1979).

Os sistemas convencionais que usam mancais magnéticos em máquinas rotativas constituem-se basicamente por quatro partes, tal como é mostrado na figura 1 (Société de Mecanique Magnétique, 1988). Comparativamente a estes mancais magnéticos, a novidade do projeto aqui proposto está na utilização dos próprios enrolamentos do estator do motor para produzir forças de posicionamento sobre o rotor (Salazar *et alii*, 1990, 1991), eliminando assim a necessidade de enrolamentos adicionais para mancal magnético, como é usual neste tipo de solução (Studer, 1987; Isely, 1986; Chiba *et alii*, 1990).

Desta forma, o sistema da figura 1 resulta como mostra a figura 2, reduzindo-se com isso o tamanho do sistema, devido à diminuição do número de acoplamentos e partes constituintes. Além disso, o sistema proposto apresenta as mesmas vantagens dos mancais magnéticos convencionais.

O primeiro problema que surge ao sobrepor os efeitos de rotação e levitação é o aparecimento de efeito de frenagem oriundo das correntes necessárias para o posicionamento (Salazar *et alii*, 1990). Uma forma de minimizar este efeito consiste em trabalhar com o eixo do motor verticalmente, atenuando com isto o problema do peso, que é a maior força externa fixa. Não obstante, o sistema pode trabalhar em forma horizontal usando ímãs permanentes para compensar o peso, ver figura 3.

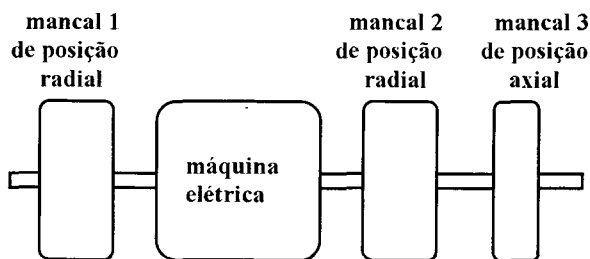


Figura-1 Sistema convencional que usa mancais magnéticos.

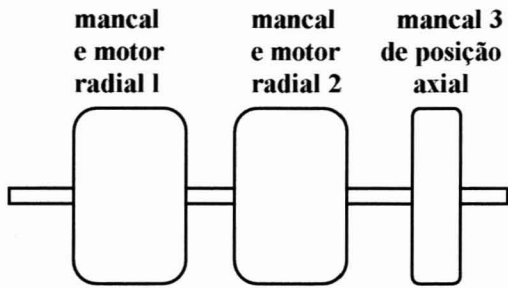


Figura-2 Sistema proposto com mancais magnéticos com a função de levitação e rotação.

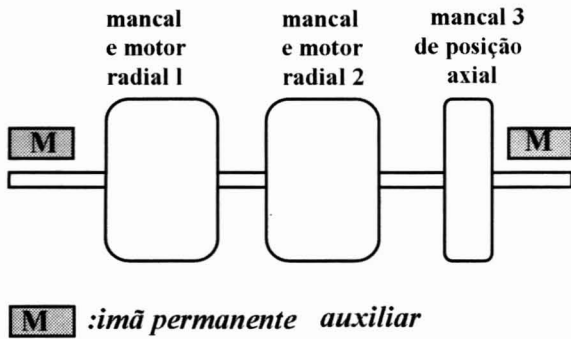


Figura-3 Sistema com ímãs permanentes para compensar forças externas fixas.

Neste trabalho, será usado um protótipo experimental de eixo vertical, onde se utiliza um motor de indução ou de relutância como mancal magnético, com as características mencionadas

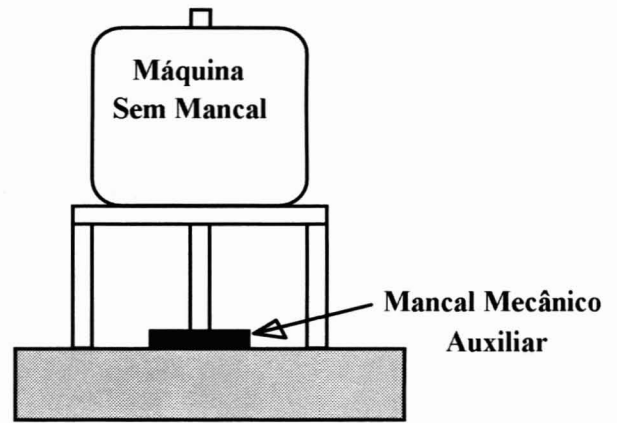


Figura-4 Sistema em estudo.

anteriormente, e o outro mecânico, conforme sugerido na figura 4. Este mancal mecânico na parte inferior do eixo, conhecido como "mancal de escora", permite 3 graus de liberdade, só impossibilitando o movimento nas direções x, y, z. Desta forma fica representado o mancal radial da posição inferior e o mancal axial. Assim é possível analisar experimentalmente os principais aspectos da proposta de posicionamento e giro simultâneo de uma forma simplificada no extremo superior do eixo.

A estrutura do estator, tanto para o motor de indução como para o motor de relutância, é mostrada na figura 5. O rotor para o motor de indução é cilíndrico, tipo gaiola de esquilo, e para o motor de relutância a estrutura é de polo saliente como mostra a figura 6. Alguns resultados obtidos com o motor de indução já foram apresentados em outros artigos técnicos dos autores (Salazar e Stephan, 1993; Salazar, Stephan e Dunford, 1993). Uma vantagem do motor de relutância sobre o motor de

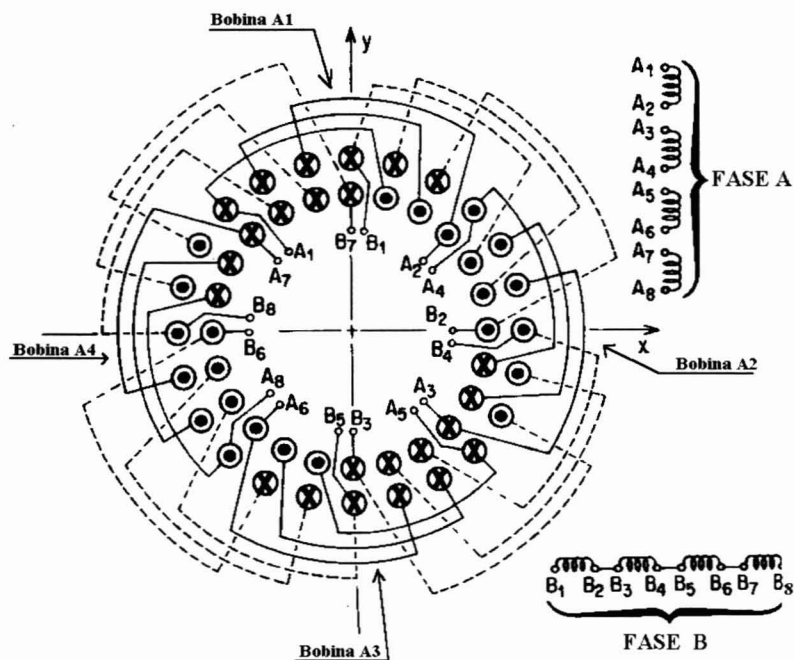


Figura-5 Estrutura do estator.

*obs: Para não sobrecarregar a figura, o retorno das bobinas não está indicado. Este retorno ocorre sempre na ranhura adjacente à ranhura onde inicia a bobina..*

indução, para esta aplicação, encontra-se no fato de praticamente não existir força de frenagem oriunda de correntes induzidas no rotor.

## 2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA COM MÁQUINA DE RELUTÂNCIA

A máquina utilizada tem duas fases e quatro pólos. As fases "A" e "B" são alimentadas tal como numa máquina de relutância bifásica de quatro pólos convencional, i.e. com sinais senoidais defasados de  $90^\circ$  de uma fase para outra. Da energia entregue ao sistema, parte será utilizada para girar o rotor, como acontece nas máquinas convencionais. Uma outra parte será utilizada para manter o eixo do rotor centrado.

A fase "A", composta por quatro bobinas independentes conforme indicado na figura 5, será utilizada para o controle do posicionamento radial do rotor. A amplitude da corrente de cada bobina desta fase será modulada em amplitude, sendo o sinal modulador a posição relativa do eixo do rotor em relação ao estator. As quatro bobinas da fase "B" estão em série e esta fase contribui apenas para a geração do torque de rotação juntamente com as correntes da fase "A".

De acordo com o comportamento sincronizado da máquina de relutância, pode-se afirmar e comprovar experimentalmente que a variação do entreferro, do campo magnético e da indutância de uma bobina A1 (figura 7(a)) são representadas pela figura 8. Como se observa nesta figura, a saliência do rotor passa pela bobina A1 quando a densidade de campo tem sua máxima amplitude, assim o mesmo acontece com as outras saliências do rotor. Modulando-se a amplitude deste campo através da injeção de maior ou menor corrente nas bobinas da fase A, neste instante, pode-se gerar forças que atraiam mais

ou menos o rotor. Colocando-se um par de bobinas diametralmente opostas, será possível controlar a posição do rotor, ao longo de um eixo.

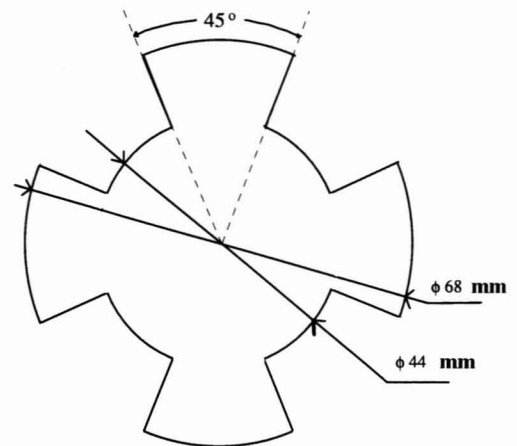


Figura-6 Estrutura do rotor do motor de relutância

A máquina de relutância apresenta a desvantagem que a superfície do rotor não é uniforme por causa das saliências. Por outro lado, na ausência de torque de carga, os pólos do campo magnético no entreferro estão sincronizados com estas saliências. Isto pode ser representado pela figura 7 onde o motor é mostrado em forma estendida. A figura 7(a) mostra os enrolamentos da fase "A", a figura 7(b) a posição das saliências do rotor no entreferro. A figura 7(c) mostra a densidade de campo para um determinado instante de tempo. Quando os picos da densidade de campo magnético iniciam o deslocamento pelo entreferro, devido aos sinais alternados de corrente, as saliências do rotor tendem a acompanhá-los.

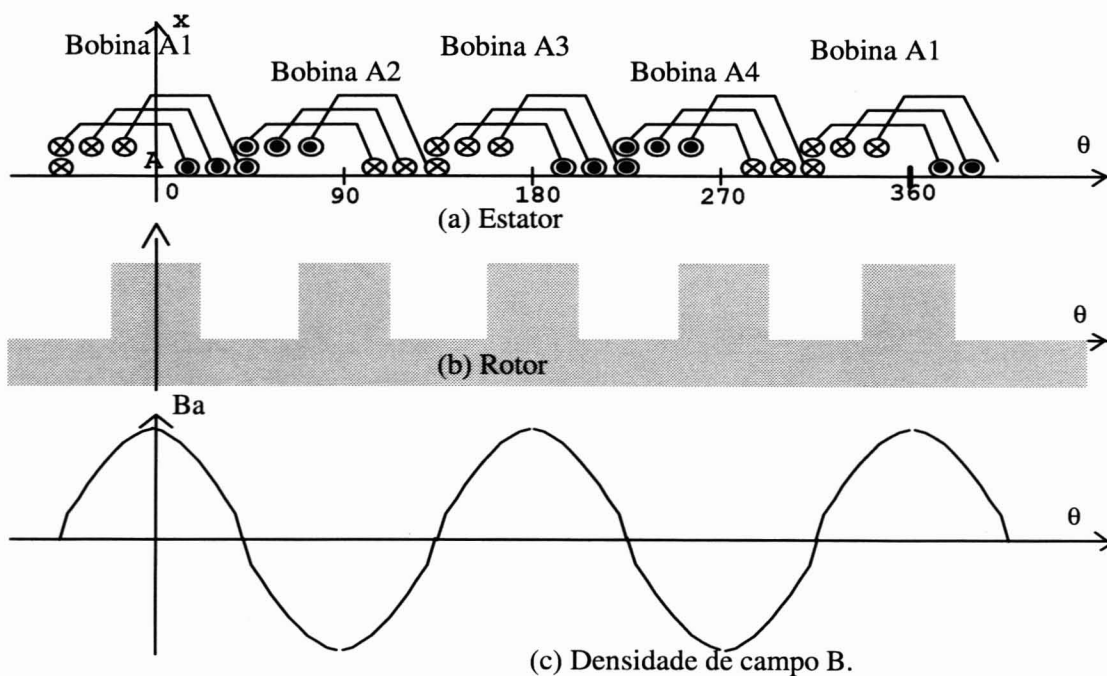


Figura-7 Variação do entreferro e densidade de campo magnético ao longo do entreferro do rotor

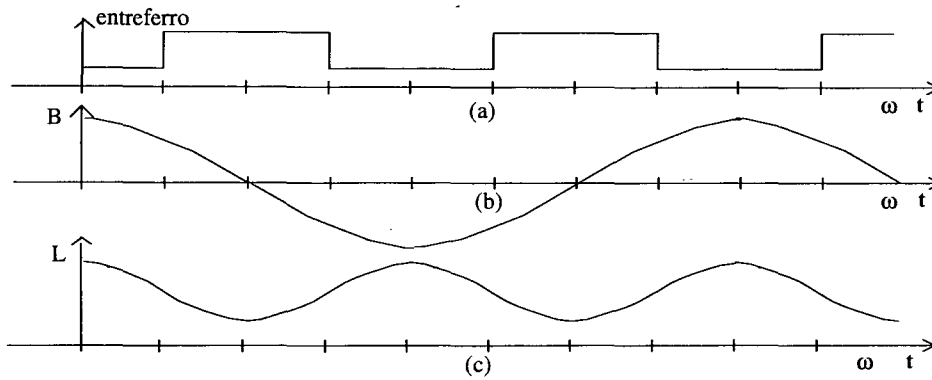


Figura-8 Variações para a situação sem carga:  
 (a) entreferro,  
 (b) densidade de campo,  
 (c) indutância da bobina A1.

### 3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA COM MÁQUINA DE INDUÇÃO

O estator do motor de indução é idêntico ao do motor de relutância. De modo semelhante ao caso anterior, para se atingir o controle de posicionamento e rotação no motor de indução, as amplitudes dos sinais senoidais de corrente das quatro bobinas da fase “A” são moduladas em função da posição do rotor em relação ao estator. As bobinas da fase “B” são alimentadas por uma mesma corrente cossenoidal de amplitude constante.

As correntes injetadas produzem um campo girante à velocidade síncrona com amplitude variável, que depende da presença de forças que desloquem o rotor do centro. A figura 9 ilustra as quatro bobinas que formam a fase “A” na situação em que existe uma força externa sobre o rotor na direção y. Para compensar esta força, são moduladas as amplitudes das correntes que alimentam as bobinas associadas ao eixo y (“A1” e “A3”). A amplitude da corrente da bobina “A1” é aumentada e a amplitude da corrente da bobina oposta “A3” é igualmente diminuída.

Caso similar pode ser feito se for necessário gerar uma força na direção do eixo x.

A fase “B” não produz força sobre o rotor tendo em vista que a corrente que circula por este enrolamento tem amplitude constante e o deslocamento do rotor em relação ao centro é desprezível.

Com a máquina de indução não é necessário o sincronismo da sinal do inversor com a posição do rotor, uma vez que este apresenta uniformidade em relação à posição angular. Neste aspecto reside a principal diferença no sistema de controle para os dois tipos de máquina.

### 4. FORÇAS PRODUZIDAS SOBRE O ROTOR

Para a determinação da expressão das forças radiais, as seguintes hipóteses são inicialmente consideradas:

- O material ferromagnético não trabalha na região de saturação.
- O rotor tem pequenos desvios em relação ao centro do estator (10% de 1mm).
- A máquina não está carregada (i.e. as correntes do rotor são aproximadamente zero).
- Os eixos das bobinas estão defasados de 90° elétricos, com isto, as equações em cada um deles serão independentes, porém similares.

As forças radiais  $F_x$  e  $F_y$  que atuam sobre o rotor nas direções x- and y-, respectivamente, podem ser determinadas considerando a energia magnética armazenada no sistema, equação (1):

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial W_m / \partial x \\ \partial W_m / \partial y \end{bmatrix} \quad (1)$$

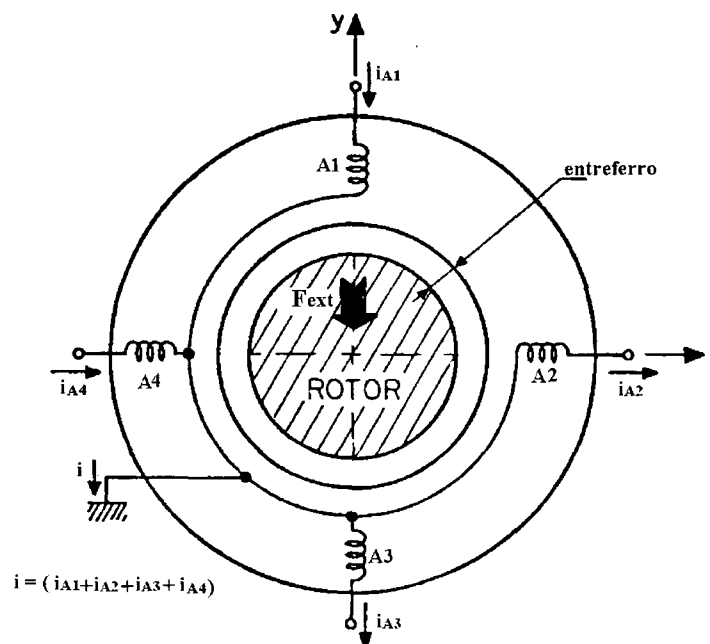


Figura-9 Representação das bobinas da fase “A” no plano x-y, na presença de uma força externa.

Se a máquina não está saturada, a expressão da energia é dada por:

$$W_m = \frac{1}{2} [i]^T [L] [i]. \quad (2)$$

O vetor corrente  $\bar{i}$  inclui tanto as correntes de fase "A" quanto as da fase "B". A matriz de indutâncias  $\bar{L}$  só considera os termos da diagonal principal, dado que os outros termos da matriz ou não dependem da posição radial ou sua dependência é secundária quando se tem o rotor centrado ou com pouco deslocamento.

Desta forma, a expressão da força de uma bobina da fase A, que está sobre o eixo  $x$ , será função do quadrado da corrente que passa por ela e da derivada da indutância com relação à posição:

$$F_x = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx}. \quad (3)$$

Tabela 1. Indutância própria de cada bobina de posicionamento.

TIPO DE MÁQUINA	INDUCTÂNCIA(L)
Indução	$L_0 + L_1/(g+x)$
Relutância	$L_0 + [L_1/(g+x)]\cos\theta$

A indutância própria de uma bobina de posicionamento vai depender do tipo de máquina como mostra a tabela 1; onde  $L_0$  e  $L_1$  são constantes,  $g$  é o entreferro quando o rotor está centrado e  $x$  é o deslocamento do rotor com relação à origem de coordenadas. Na máquina de relutância,  $\theta$  é a posição angular do polo do rotor. A velocidade do rotor ( $\omega$ ) é igual a derivada da posição angular do rotor  $d\theta/dt$ .

Substituindo a indutância própria da tabela 1 na expressão da equação(3) e assumindo correntes senoidais  $[i(t) = I_{max} \cos \omega t]$ , obtém-se a expressão da força de posicionamento gerada por uma bobina e para cada tipo de máquina, como mostra a tabela 2, onde pode-se apreciar que as forças tem um valor médio diferente de zero. Esta força média é usada para produzir forças de posicionamento. O segundo harmônico é gerado pela característica alternada da corrente e o quarto harmônico (para o motor de relutância) é gerado pelas saliências do rotor. Estes harmônicos não produzem forças médias de posicionamento e são absorvidos pela massa do motor. Assim, o pico da força de posicionamento radial pode ser determinado pela expressão:

$$\hat{F}(x) = k \cdot I_{max}^2 \left[ \frac{L_1}{(g-x)^2} \right], \quad (4)$$

onde  $k$  é uma constante determinada pelo tipo de máquina.

Tabela 2. Forças Radiais

MÁQUINA	FORÇA DE CADA BOBINA(F)
Indução	$\frac{1}{4} I_{max}^2 (1 - 2 \cos 2\omega t) \left[ \frac{L_1}{(g-x)^2} \right]$
Relutância	$\frac{1}{8} I_{max}^2 (1 - 2 \cos 2\omega t - \cos 4\omega t) \left[ \frac{L_1}{(g-x)^2} \right]$

A equação(4) representa a força sobre o rotor devido a uma bobina do estator. O sistema proposto tem quatro bobinas que controlam a posição do rotor. Duas sobre o eixo- $x$  e outras duas sobre o eixo- $y$ . As variações das forças sobre os dois eixos são independentes porém similares. Considerando  $F_1$  e  $F_3$  como as forças das duas bobinas sobre eixo- $x$ :

$$\hat{F}_1(x) = k \cdot I_{max1}^2 \cdot \left[ \frac{L_1}{(g-x)^2} \right], \quad (5)$$

$$\hat{F}_3(x) = k \cdot I_{max3}^2 \cdot \left[ \frac{L_1}{(g-x)^2} \right], \quad (6)$$

onde  $I_{max1}$  e  $I_{max3}$  são dados por:

$$I_{max1} = I_{max0} - \Delta I_x \quad (7)$$

$$I_{max3} = I_{max0} + \Delta I_x. \quad (8)$$

$I_{max0}$  é a amplitude de corrente quando o rotor está centrado e não existem forças que perturbem sua estabilidade.  $\Delta I_x$  é a variação de corrente que gera forças que compensam forças externas presentes sobre o eixo- $x$ .

Um conjunto idêntico de equações é válido para o eixo- $y$  quando as correntes das bobinas 2 e 4 são consideradas.

A equação que descreve o comportamento dinâmico do sistema é:

$$\hat{F}_1(x) - \hat{F}_3(x) = m \frac{d^2x}{dt^2} + F_{ext}, \quad (9)$$

onde  $m$  é a massa do rotor e  $F_{ext}$  é uma força de perturbação externa ao sistema. Linearizando em torno do ponto de equilíbrio e aplicando a transformada de Laplace, obtém-se a função de transferência da planta:

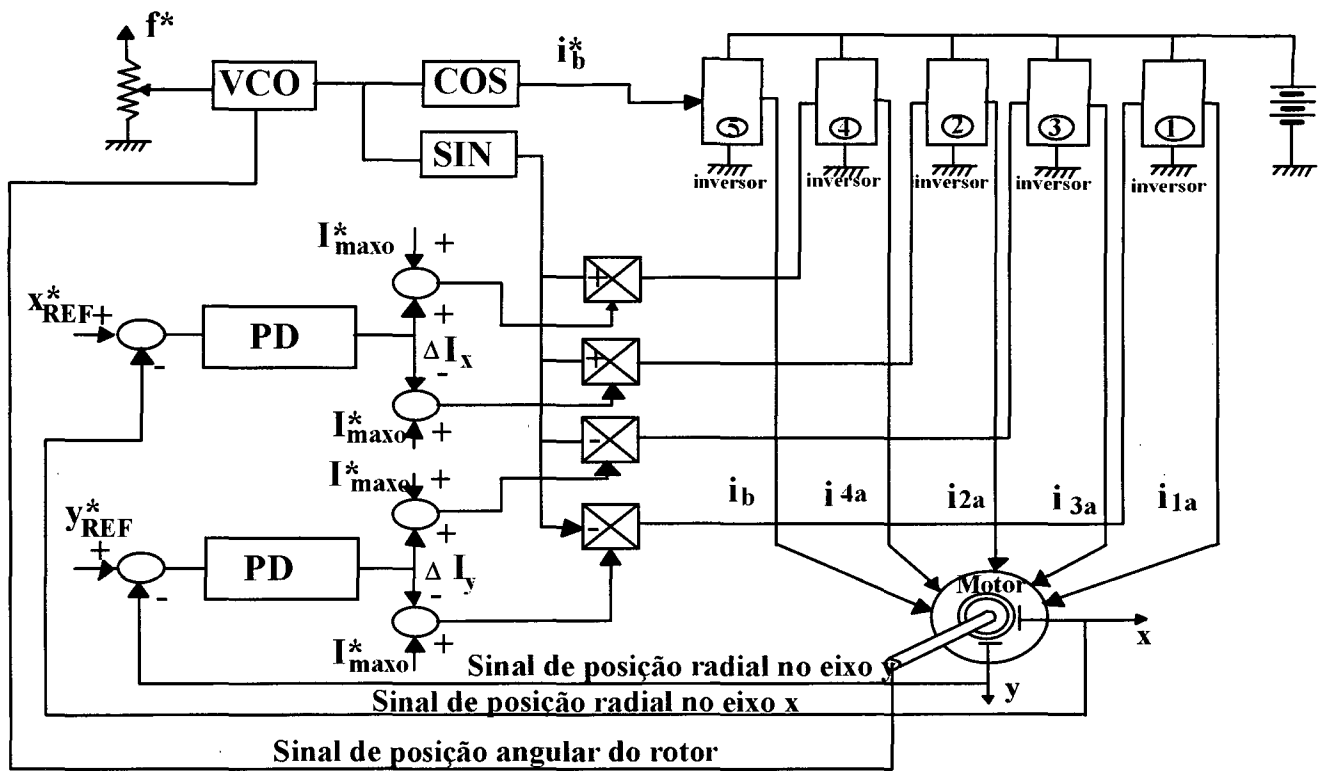


Figura-10 Diagrama de blocos do sistema.

$$\frac{X(s)}{\Delta \hat{I}_x(s)} = \frac{K_i}{s^2 - K_x / m}, \quad (10)$$

onde  $K_i$  e  $K_x$  são constantes que dependem dos parâmetros e do ponto de operação do sistema, influenciando diretamente a amplitude da corrente e a posição em que se encontra o rotor.

## 5. DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA

O diagrama de blocos do sistema com a máquina sem mancais é mostrado na figura 10. Ele se aplica tanto para a máquina de indução como para a máquina de relutância, com a adição de uma malha que realimenta a posição angular do rotor no último caso. Esta malha tem a finalidade de assegurar o sincronismo da posição do rotor com o campo girante do entreferro. As quatro bobinas das fase "A" são alimentadas por quatro inversores de corrente e um quinto inversor alimenta as bobinas da fase "B". Estes inversores de corrente são comandados por sinais senoidais: os da fase "A" são modulados pelos sinais fornecidos pelo laço de controle de posição, enquanto que o amplificador da fase "B" é comandado por um sinal cossenoidal sem nenhum tipo de controle.

## 6. CONTROLADOR

A dinâmica natural do sistema é instável, como visto na equação(10), devido à presença de um polo no semi-plano

direito de Laplace. Isto é comum para sistemas de posicionamento magnético. Considera-se um controlador Proporcional Derivativo (PD) para a estabilização do sistema, com uma função de transferência dada por:

$$G_c = K_p + K_d s, \quad (11)$$

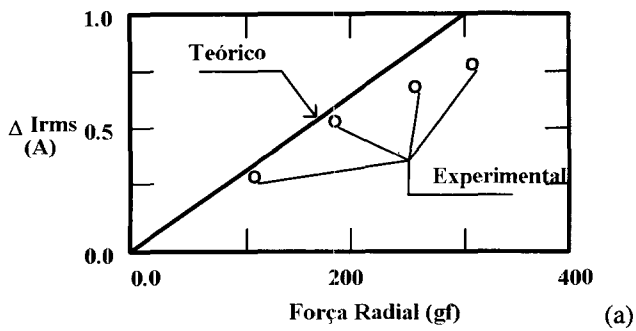
onde  $K_p$  é o ganho do elemento proporcional e  $K_d$  da parte derivativa.

## 7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

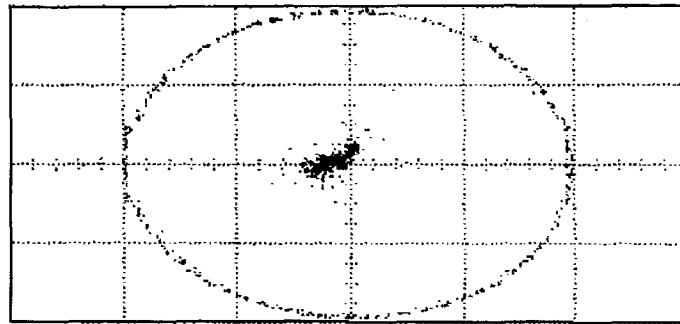
Os parâmetros do sistema experimental são apresentados na tabela 3.

A figura 11 mostra a força radial teórica e experimental em função da variação de corrente ( $\Delta \hat{I}_x$ ) para posicionamento. É possível apreciar que o resultado teórico (equação(4)) e o experimental são aproximadamente os mesmos para baixos níveis de corrente, enquanto a saturação é desprezível.

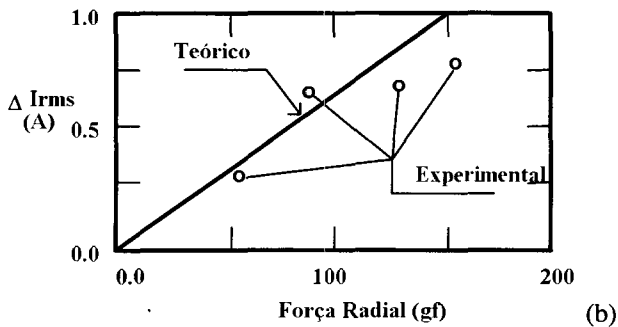
A figura 12 compara a resposta orbital com e sem controle de posição. O sistema mostra um pequeno erro quando funcionando a malha fechada (<10 %). A trajetória circular externa representa a máxima trajetória que o eixo do motor descreve quando o rotor encosta ligeiramente no estator.



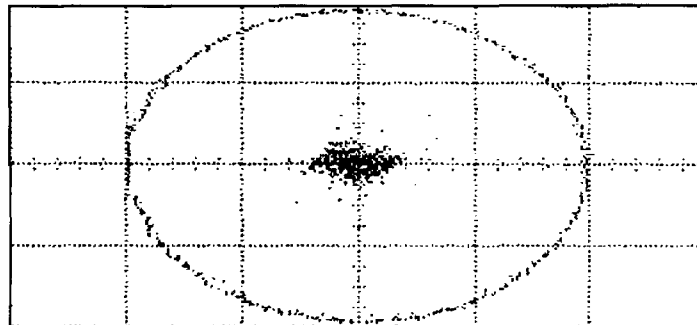
Máquina de Indução.



(a) Máquina de Indução.



Máquina de Relutância.



(b) Máquina de Relutância.

Figura-11 Corrente de posicionamento ( $\Delta I_x$ ) em função da força radial.

A figura-13 apresenta a Transformada Rápida de Fourier (FFT) da posição ( $x$ ) para operação na máxima velocidade atingida (6000 RPM) no motor de relutância. O espectro mostra a presença de duas harmônicas. A primeira devido a características pulsante da força de posicionamento, está em sincronismo com a frequência de alimentação do motor. A segunda se deve à presença das irregularidades na superfície do rotor. Estes resultados estão de acordo com o que sugere a tabela 2.

## 8. CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisou-se um novo sistema de máquina elétrica sem mancais mecânicos. O método proposto emprega a modulação das correntes de estator e dispensa enrolamentos especiais para o posicionamento do rotor separados dos

Figura-12 Variação da posição no plano  $x$ - $y$ . Escala vertical e horizontal: 0.5 mm/div

enrolamentos para produção de torque de rotação. Pretende-se com isto otimizar espaço e energia. O método foi testado para motores de relutância e indução com um protótipo de laboratório até velocidades de 6000 RPM. Atualmente, o sistema está sendo aperfeiçoado para atender requisitos de aplicação industrial.

## AGRADECIMENTO

Ao CNPq e à GTZ pelo apoio financeiro. Os autores desejam agradecer aos Drs. A. Falcone e I. Shabu da EQUACIONAL S.A. pela ajuda no projeto e construção das máquinas e ao Prof. E. Watanabe pelas sugestões apresentadas. As contribuições dadas pelo M.Sc. J.A. Santisteban foram também de grande valia.

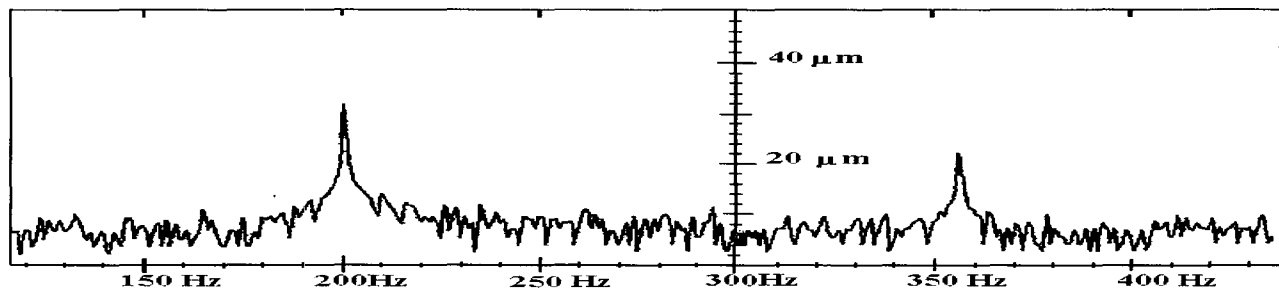


Figura-13 FFT da posição ( $x$ ).

## REFERÊNCIAS

- Chiba, A., K. Chida e T. Fucao (1990). Principles and characteristics of a reluctance motor with winding of magnetic bearing. *Inter. Power Electronics Conference*, Tokyo, Japan, Vol.2, pp.919-926.
- Haberman, W. e L. L. Guy (1979). Practical magnetic bearing. *IEEE Spectrum*, sep., pp.26-30.
- Isely, W. (1986). *Magnetically supported and torque momentum reaction sphere*. United States Patent, No 4, 611, 863.
- Kaplan, B.Z (1976). An estimation of mechanical transient in tuned-circuit levitator by employing steady-state impedance. *Journal of Applied Physics*, vol. 47, No.1, pp 78-84.
- Salazar, A. O., W. Dunford, R. Stephan e E. H. Watanabe (1990). A magnetic bearing system using capacitive sensors for position measurement. *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.26, N5, pp. 2541-2543.
- Salazar, A.O., R.M. Stephan, E.H. Watanabe e W. Dunford (1991). *Mancal magnético para motores CA utilizando enrolamentos do estator*. Patente INPI No. 910367.
- Salazar, A.O. e R.M. Stephan (1993). A bearingless Method for Induction Machine. *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol.29, N.6, pp.2965-2967.
- Salazar, A. O. e R. M. Stephan, W.G. Dunford (1993). An efficient bearingless induction machine. *II Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, Uberlândia, Brazil, pp.419-423.
- Société de Mecanique Magnétique de France (1988). Application of the active magnetic bearing to turbomachinery. *Inter. Conf. on Electric Machines*, Pisa, Italy, Vol.1, pp 49-55.
- Studer, P. (1987). *Radial and torcionally controlled magnetic bearing*. United States Patent, No 4,634,191.

TABELA 3. PARÂMETROS DO SISTEMA

TIPO DE MÁQUINA	INDUÇÃO	RELUTÂNCIA
Massa do rotor(m)	3.8 kg	2.7kg
Potência	250W	250W
Faixa de velocidade	3000-6000 RPM	
$Kp/Kd$	40	30
$Kx$	134 N/m	210 N/m
$Ki$	53 N/A	67 N/A
$Lo$	8.7 mH	8.7 mH