

# MÁQUINA DE INDUÇÃO SEM MANCAIS: MODELO E ACIONAMENTO

Jossana M. S. Ferreira, Andrés Ortiz Salazar

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Computação e Automação

CEP 59000-000, Natal – RN Brasil

e-mail: jossanaferreira@yahoo.com.br, andres@dca.ufrn.br

**Resumo** - Este trabalho apresenta uma proposta de modelo para a máquina de indução trifásica sem mancais com bobinado dividido bem como a estrutura montada para o seu acionamento. A máquina estudada é uma adaptação de uma máquina de indução convencional, o que foi possível dividindo-se os enrolamentos do estator e tornando acessíveis todos os seus terminais. Essa técnica dispensa o acréscimo de enrolamentos ao estator para a realização do controle de posição radial, o que resulta em uma máquina sem mancais mais compacta. Resultados experimentais são realizados para validar esta modelagem.

**Palavras-Chave** – Máquina sem mancais, Mancais Magnéticos, Máquinas Elétricas, Modelagem de Máquinas.

## BEARINGLESS THREE PHASE INDUCTION MACHINE: MODELLING AND DRIVING

**Abstract** – This work shows a model of three phase bearingless induction machine with divided winding and the driving structure. The studied machine is adapted from the conventional induction machine, the stator windings were divided and all terminals had been available. This method does not need an auxiliary stator winding for the radial position control which results in a more compact bearingless machine. Experimental results are accomplished to validate this modeling.

**Keywords** – Bearingless machine, Magnetic Bearings, Electric Machines, Machine Modeling.

### NOMENCLATURA

$i_{qi}$	Corrente da bobina 'i' da fase 'q' do estator.
$i_{Rq}$	Corrente da fase 'q' do rotor.
$i_{mR}$	Corrente de magnetização que representa o fluxo do rotor.
$\underline{I}_S$	Vetor corrente do estator.
$\underline{I}_R$	Vetor corrente do Rotor.
$\underline{I}_{S1}$	Vetor corrente do grupo 1 de bobinas do estator.
$\underline{I}_{S2}$	Vetor corrente do grupo 2 de bobinas do estator.
$\tilde{\underline{I}}$	Vetor corrente modulado pela função enrolamento.

$\Psi$	Fluxo concatenado.
$[L]$	Matriz indutância.
$[L_{SiR}]$	Matriz indutância mútua entre o conjunto i de bobinas do estator e o rotor.
$[L_{RSi}]$	Matriz indutância mútua entre o rotor e o conjunto i de bobinas do estator.
$[L]$	Matriz indutância.
mM	Torque.
r	Raio externo do rotor.
l	Comprimento do pacote de lâminas da máquina.
B	Densidade de fluxo magnético.
$\delta$	Função normalizada do deslocamento do rotor.
$\alpha$	Coordenada angular em relação ao estator.
$\beta$	Coordenada angular em relação ao rotor.
$\varepsilon$	Posição angular do rotor.
$\mu_0$	Permeabilidade do ar.
P	Função inverso do entreferro.
Nz	Função enrolamento da bobina z.
t	Tempo.
$g_0$	Entreferro para o rotor centralizado.
J	Momento de inércia.
$\underline{I}^*$	Conjugado do vetor I.
$\Im m[\underline{I}]$	Parte imaginária do vetor I.

## I. INTRODUÇÃO

Devido aos problemas gerados pelo desgaste excessivo dos mancais mecânicos houve a idéia de substituí-los por mancais magnéticos [1][2][3][4], o que favorecia a manutenção. O mancal magnético resolvia o problema do desgaste dos mancais mecânicos, porém aumentava o tamanho da máquina, foi então que surgiu a máquina sem mancais [5]. Bosch propôs um motor tipo disco, cuja força de regeneração axial é ajustada a partir da corrente de excitação do motor. A máquina sem mancais apresenta um consumo de 10% da energia consumida pela máquina para realização do controle de posicionamento.

A máquina aqui apresentada é uma máquina trifásica, horizontal, que apresenta dois conjuntos motor+mancal ligados ao mesmo eixo axial. A configuração utilizada baseia-se em um trabalho desenvolvido anteriormente para uma máquina bifásica [6][7][8]. O trabalho apresentava uma das fases dividida em quatro bobinas para a geração de forças radiais, onde cada uma das quatro partes era alimentada independentemente a fim de serem geradas forças ortogonais necessárias ao reposicionamento radial do rotor.

A máquina sem mancais pode ser obtida de duas formas, dividindo o enrolamento do estator, que é o caso analisado,

Artigo submetido em 1 março de 2007. Primeira revisão em 19 de abril de 2007. Segunda revisão em 23 de junho de 2007. Aceito por recomendação do Editor Richard M. Stephan

ou então adicionando um enrolamento adicional ao estator da máquina para realização do controle [9][10][11].

Um passo importante no estudo da máquina sem mancais é a determinação do modelo matemático, para que se tenha uma maneira mais simples de tratar o sistema como também de conhecê-lo melhor. O fato de a máquina estudada ser uma adaptação de uma máquina de indução convencional ajuda na obtenção do modelo, porém a inserção de correntes geradas pelo controle e a influência do desbalanceamento tornam o modelo bem mais complexo que o de uma máquina de indução convencional.

Com o deslocamento radial do rotor, o entreferro passa a não mais poder ser considerado constante ao longo de todo o estator, sendo necessária a determinação de uma nova matriz de indutâncias dependentes da posição radial do rotor. Porém, as indutâncias não são os únicos parâmetros modificados com a variação do entreferro, as correntes também são modificadas pelo controle a fim de reposicionar o rotor corretamente, porém sempre respeitando a soma das correntes nas bobinas de uma mesma fase.

Um módulo de acionamento foi construído para comportar os inversores, os dispositivos de interface, o controlador, as fontes, enfim, todo o aparato necessário para o seu acionamento.

## II. DESCRIÇÃO DA MÁQUINA

O protótipo horizontal é uma máquina de indução trifásica, com potência de 1,5 kW, quatro pólos e possui mancais mecânicos somente para a proteção, para que o rotor não toque o estator nem na partida, nem no caso de perda do controle. O protótipo conta com dois conjuntos motor+mancal onde apresentam eixo comum [13]

A máquina sem mancais estudada teve seu bobinado modificado para que fosse possível a realização do controle de posição radial, tanto o rotor quanto o estator apresentam alterações em sua estrutura, as quais são mostradas em seguida, sendo que essas modificações não descaracterizam a máquina de indução.

### A. Estator

A máquina sem mancais analisada apresenta o bobinado do estator dividido em dois, cada fase passa a ter duas bobinas, o que viabiliza o controle de posicionamento radial. As correntes que circulam nessas bobinas são controladas independentemente onde cada uma é alimentada por um inversor. Essa configuração permite o controle da posição do rotor sem que haja a necessidade de ser adicionado ao estator um outro enrolamento para o controle de posição. Portanto, o mesmo enrolamento que é responsável pelo acionamento da máquina passa a ser responsável também pelo controle de posição radial do rotor, apenas manipulando-se os campos nas bobinas divididas [12] e [13].

O fluxo da máquina de quatro pólos sem mancais apresenta as mesmas características da máquina convencional, quando seu rotor encontra-se centralizado, entretanto, quando isso não ocorre há uma concentração maior de linhas de fluxo na região que exige maior força. A Figura 1 mostra a disposição das bobinas no estator, a qual disponibiliza todos os terminais para as devidas ligações. Essa configuração faz com que o controle de posição atue

adequadamente sem que haja interferência significativa na geração do torque, propiciando o funcionamento normal da máquina, uma vez que a corrente total por fase permanece inalterada.

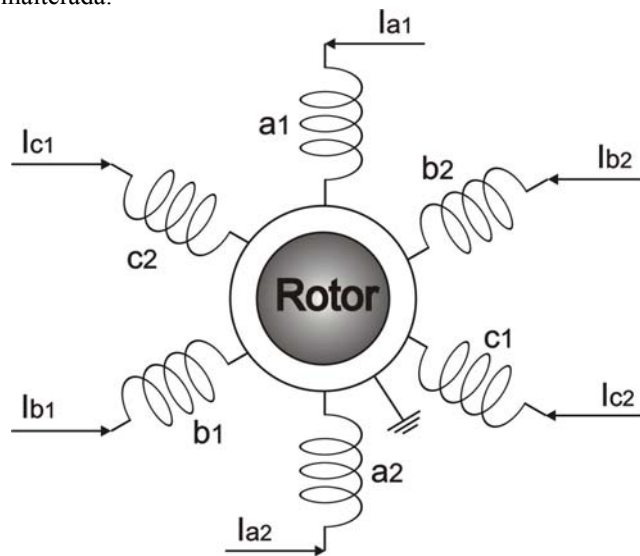


Fig. 1. Arranjo de bobinas do estator da máquina sem mancais.

### B. Rotor

Apesar do rotor em gaiola de esquilo ser o tipo de rotor mais utilizado em máquinas de indução, o mesmo não foi adotado. Essa rejeição se deve ao fato desse tipo de rotor não apresentar resposta satisfatória ao controle de posicionamento radial [9] [10].

Para solucionar esse problema foi adotada uma outra configuração, um rotor bobinado sem terminais acessíveis. Uma configuração de quatro pólos foi escolhida por apresentar melhores resultados com as máquinas sem mancais [11]. A configuração para o rotor adotada pode ser vista na Figura 2.

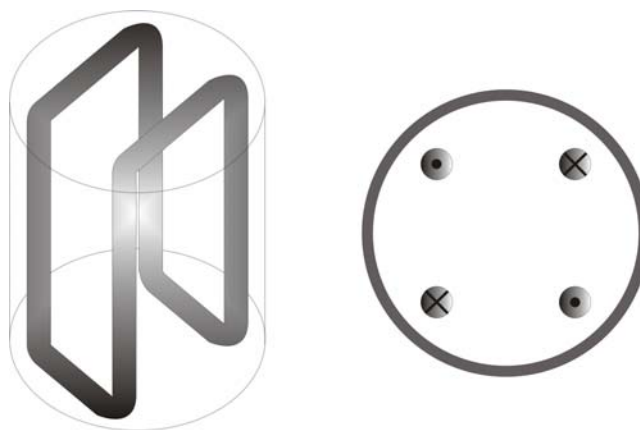


Fig. 2. Configuração do Rotor.

A Figura 2 mostra somente um circuito do rotor, embora existam quatro circuitos dessa natureza, igualmente espaçados. O modelo de rotor escolhido garante que somente serão gerados campos de quatro pólos referentes à frequência de alimentação da máquina. Isso é conveniente uma vez que

circulam nas bobinas sinais modulados, o que injeta no sistema frequências superiores à frequência de alimentação, o que facilmente causaria interferência.

Um rotor em gaiola de esquilo funciona como um “espelho”, ou seja, se o estator gera correntes de dois pólos, então no rotor também circulam correntes de dois pólos. Esse reflexo do estator no rotor é indesejado no caso da máquina sem mancais para algumas correntes. No estator circulam não apenas as correntes de acionamento da máquina, que são de quatro pólos, mas também correntes com outras configurações, referentes ao controle de posicionamento.

### III. MODELO

Para a obtenção do modelo da máquina sem mancais, deve-se observar uma característica importante a qual refere-se a variação da matriz de indutâncias em função do deslocamento radial do rotor [13]. A variação do entreferro produz variações no fluxo e conseqüentemente nos valores de indutâncias tanto próprias quanto mútuas.

Com o deslocamento radial do rotor, o entreferro passa a não mais poder ser considerado constante ao longo de todo o estator, sendo necessária a determinação de uma nova matriz de indutâncias dependentes da posição radial do rotor. Os vetores correntes [14] do estator e do rotor são definidos como

$$\begin{aligned} \underline{I}_{S1}(t) &= i_{a1}(t) + i_{b1}(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_{c1}(t)e^{j\frac{4\pi}{3}} \\ \underline{I}_{S2}(t) &= i_{a2}(t)e^{j\pi} + i_{b2}(t)e^{-j\frac{\pi}{3}} + i_{c2}(t)e^{j\frac{\pi}{3}} \\ \underline{I}_R(t) &= i_{Ra}(t) + i_{Rb}(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_{Rc}(t)e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{aligned} \quad (1)$$

Para o rotor, existe no estator apenas um conjunto de bobinas trifásicas, como no caso da máquina convencional. Considerando as correntes do rotor um reflexo das correntes das bobinas do estator,  $I_{s1}$  é produzido pelo primeiro conjunto do estator e  $I_{s2}$  pelo segundo conjunto ambos projetados para gerar conjugados que se sumam não entanto estar desequilibrados. Conseqüência deste desequilíbrio é que aparecem forças radiais de posicionamento.

As expressões para o fluxo são dadas por

$$\begin{aligned} \underline{\Psi}_{S1}(t) &= [L_{S1}]I_{S1} + [L_{S1S2}]I_{S2} + [L_{S1R}]I_R e^{j\epsilon} \\ \underline{\Psi}_{S2}(t) &= [L_{S2}]I_{S2} + [L_{S2S1}]I_{S1} + [L_{S2R}]I_R e^{j\epsilon} \\ \underline{\Psi}_R(t) &= [L_R]I_R + [L_{RS1}]I_{S1} e^{-j\epsilon} + [L_{RS2}]I_{S2} e^{-j\epsilon} \end{aligned} \quad (2)$$

A equação que define o torque é expressa por

$$mM(t) = -r^2 l \int_0^{2\pi} B_{\text{entreferro}}(\beta, \epsilon, t) a_R(\beta, t) d\beta \quad (3)$$

onde

$$B_{\text{entreferro}}(\alpha) = \mu_0 P(\alpha) \sum N_Z(\alpha) i_Z \quad (4)$$

e

$$\begin{aligned} df &= -B_{\text{entreferro}}(\beta, \epsilon, t) a_r(\beta, t) l r d\beta \\ a_R(\beta, t) &= \frac{1}{2r} \frac{\partial (N_R(\beta, t) \underline{i}_R(t))}{\partial(\beta)} \end{aligned} \quad (5)$$

Portanto tem-se

$$mM(t) = \frac{2 r l \mu_0 k l \pi}{g_0} \Im m \left[ \underline{\tilde{i}}_S(t) (\underline{\tilde{i}}_R(t) e^{j\epsilon})^* \right] \quad (6)$$

Onde:

$$k l = \frac{1}{\sqrt{1 - \delta^2}} \quad (7)$$

Eliminando a expressão da corrente do rotor

$$\begin{aligned} mM1(t) &= \frac{2 r l \mu_0 k l \pi}{g_0} \Im m \left[ \underline{\tilde{i}}_{S1}(t) \left( \begin{bmatrix} [L_R]^{-1} [L_{S1R}] (i_{mR1}(t) - \underline{\tilde{i}}_{S1}(t)) + \\ + [L_R]^{-1} [L_{S2R}] (i_{mR2}(t) - \underline{\tilde{i}}_{S2}(t)) \end{bmatrix} \right)^* \right] \\ mM2(t) &= \frac{2 r l \mu_0 k l \pi}{g_0} \Im m \left[ \underline{\tilde{i}}_{S2}(t) \left( \begin{bmatrix} [L_R]^{-1} [L_{S1R}] (i_{mR1}(t) - \underline{\tilde{i}}_{S1}(t)) + \\ + [L_R]^{-1} [L_{S2R}] (i_{mR2}(t) - \underline{\tilde{i}}_{S2}(t)) \end{bmatrix} \right)^* \right] \end{aligned} \quad (8)$$

onde  $i_{mR1}$  e  $i_{mR2}$  são definidas em

$$\underline{\Psi}_R(t) e^{j\epsilon} = [L_{RS1}] i_{mR1}(t) + [L_{RS2}] i_{mR2}(t) \quad (9)$$

As matrizes das indutâncias são determinadas baseadas em [15]. O diagrama de blocos que representa o modelo da máquina sem mancais com bobinado dividido é mostrado na Figura 3.

### IV. ACIONAMENTO

Para o funcionamento correto da máquina sem mancais foi necessária a construção de um módulo que suporta todos os circuitos relacionados ao seu funcionamento. A Figura 4 mostra esquematicamente o controle e acionamento da máquina sem mancais.

A técnica adotada para a realização do controle de posicionamento radial do rotor requer que cada bobina seja acionada independentemente, sendo necessário, portanto, seis sinais de controle, referentes às seis bobinas, as quais resultam da divisão das três fases.

A geração dos sinais PWM, que coordenam o funcionamento dos inversores, são providos por um DSP o qual acumula os controles de posição radial, de corrente e de velocidade.

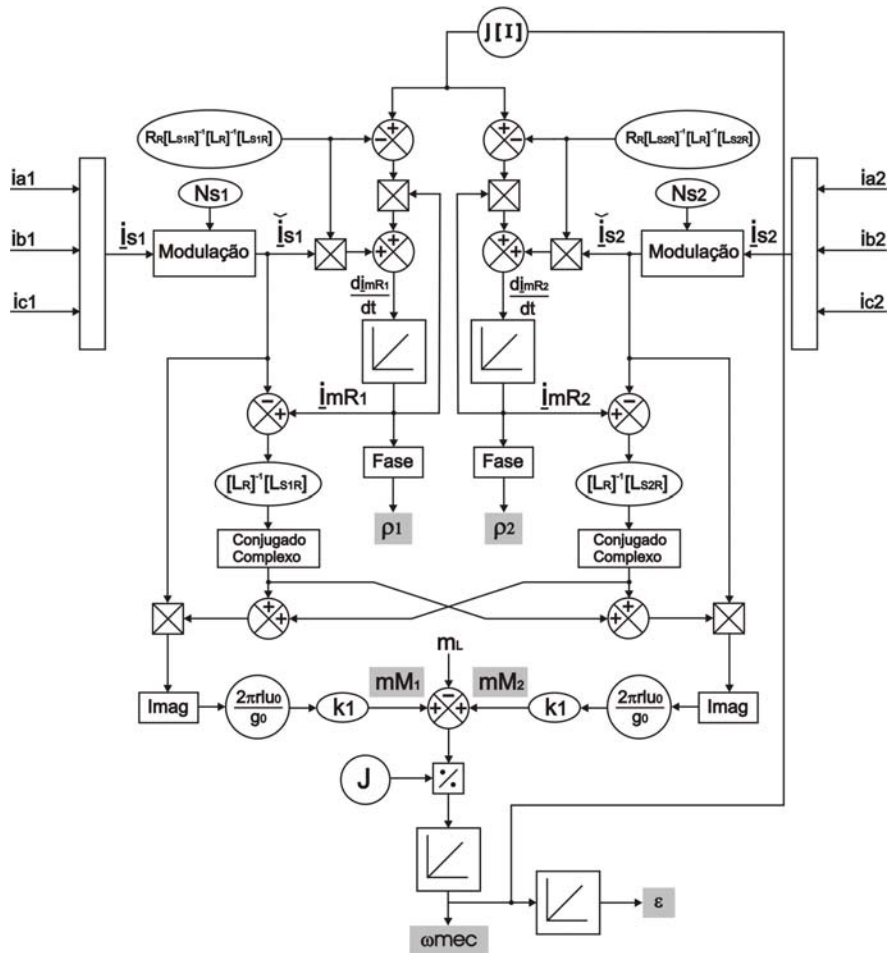


Figura 3: Diagrama de blocos da máquina sem mancais.

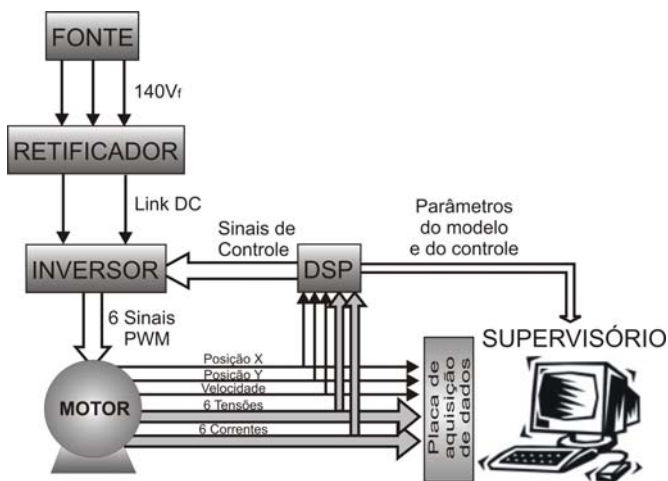


Fig. 4. Diagrama geral do sistema.

Sensores de posição radial do rotor, de velocidade mecânica, de tensões e de correntes são utilizados como referência para os controladores. Os circuitos necessários de interface dos sensores com o DSP também foram desenvolvidos e são acomodados no módulo de acionamento.

O comando elétrico da máquina é locado no módulo e propicia a conexão da fonte de alimentação trifásica externa com o barramento de tensão interno uma chave liga-desliga, um botão de emergência e duas botoeiras que ativa e desativa o módulo utilizando também um sinal luminoso como indicação. A proteção conta com três fusíveis e um disjuntor.

O primeiro estágio no processamento do sinal de alimentação é a conversão CA-CC que corresponde a um retificador trifásico de onda completa e é mostrado na Figura 5. Ele transforma o sinal de entrada variável, de 0 a 220Vac, na tensão de saída nos níveis desejados.

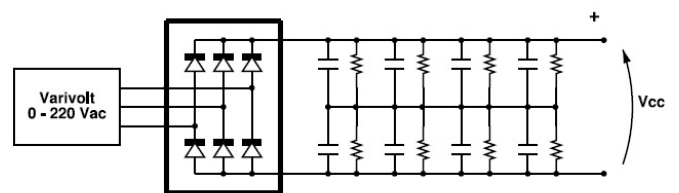


Figura 5: Configuração do conversor CA-CC.

A saída do conversor CA-CC é a entrada para os seis inversores que alimentam as seis bobinas. Para a configuração adotada, mostrada na Figura 6, são necessárias 12 chaves, sendo os sinais PWM de alimentação dos inversores complementares dois a dois, exigindo, portanto, um tempo morto de chaveamento dos IGBT's em cada braço.

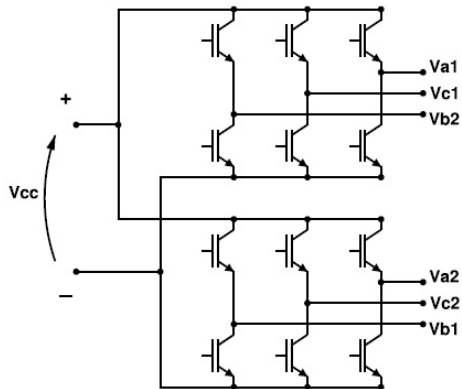


Figura 6: Configuração do inversor.

O correto funcionamento do acionamento conta ainda com diversos circuitos como interfaces de sensores, que se referem aos filtros e mudanças para os níveis de tensão adequados; interface de atuação, que além de isolar o DSP do IGBT eleva os níveis dos pulsos; interface de comando, onde há a orientação ao DSP na geração do PWM; e retificadores de baixa tensão, que destinam-se à alimentação dos circuitos auxiliares.

## V. RESULTADOS

Os resultados apresentados tratam de ensaios com a máquina inicialmente em vazio.

A Figura 7 mostra as correntes e tensões da máquina sem mancais trabalhando como uma máquina convencional em um determinado instante de tempo.

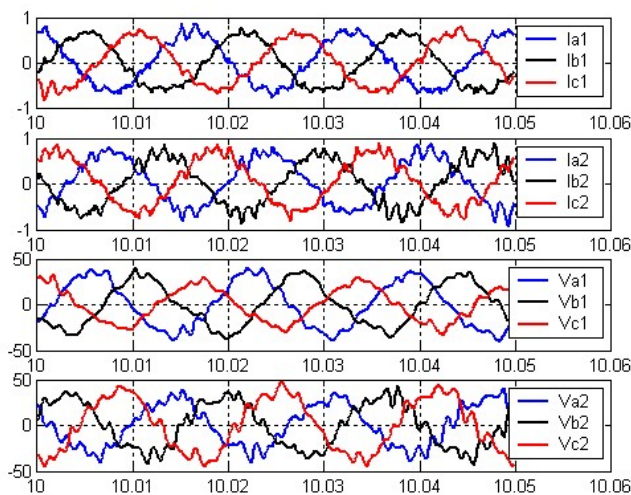


Fig. 7. Correntes e tensões da máquina funcionando como máquina convencional em um determinado instante de tempo (A e V x segundo).

A máquina sem mancais foi ligada e desligada após alguns instantes e o comportamento da velocidade, torque, potências e posição X e Y do rotor nessa situação são mostrados na Figura 8, onde seus deslocamentos máximos são de 0,5mm. No gráfico são destacados os instantes onde a máquina é ligada, partindo do repouso, no instante 7,59s. Há a acomodação do sistema e é então desligada, nos instantes 14,0s e 32,66s respectivamente.

Apesar do controle de posicionamento radial ser substancialmente um controlador PD, existe uma pequena parcela integrativa, a qual não chegou a agir para a posição no eixo X no intervalo que está sendo exposto pela Figura 8.

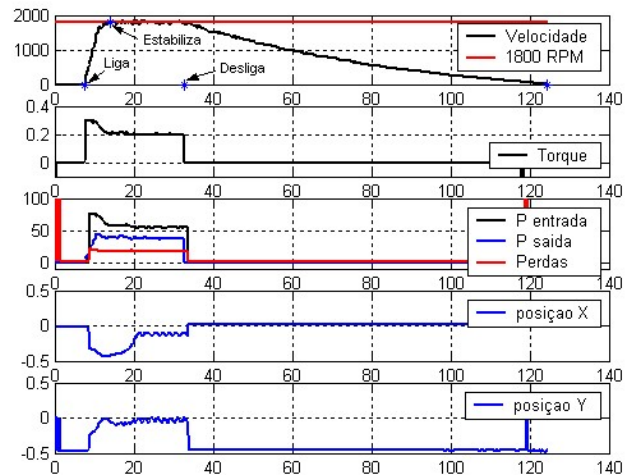


Fig. 8. Velocidade, torque, potências posição radial do rotor da máquina sem mancais por um período de ligamento e desligamento (RPM, Nm, W e mm x segundo).

Para analisar o funcionamento da máquina em condições de deslocamento do rotor, foi inserida uma perturbação no eixo X, primeiramente em seu sentido positivo e posteriormente no sentido negativo. A Figura 9 mostra as variáveis da máquina em decorrência desse deslocamento do rotor.

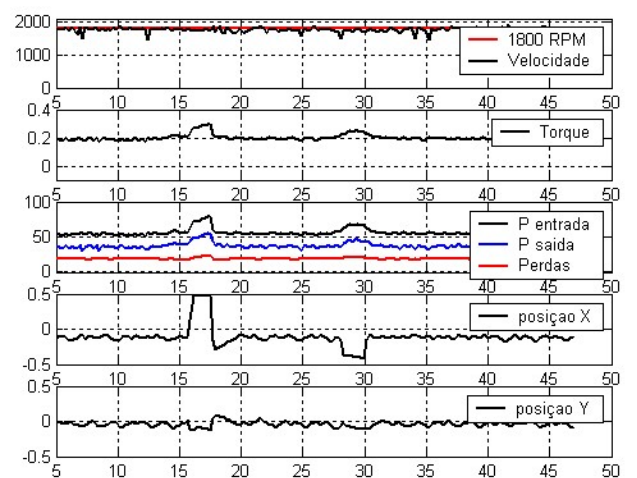


Fig. 9. Velocidade, torque, potências e posição radial do rotor da máquina sem mancais com uma perturbação no eixo X (RPM, Nm, W e mm x segundo).

Como a máquina encontra-se na posição horizontal, o próprio peso do rotor gera desbalanceamento das correntes do estator para mantê-lo posicionado no centro. Esta alteração nas correntes não provoca picos de torque e nem variações na velocidade, como é possível observar na Figura 10, onde, apenas ocorrem mudanças nas variáveis durante os instantes de deslocamento radial do rotor.

A Figura 10 mostra a simulação do torque e da velocidade para uma perturbação no eixo X, onde primeiro foi inserida uma força no sentido positivo de X e, logo em seguida, no sentido negativo. Nos instantes onde ocorrem os deslocamentos do rotor no eixo X, o torque apresenta uma perturbação.

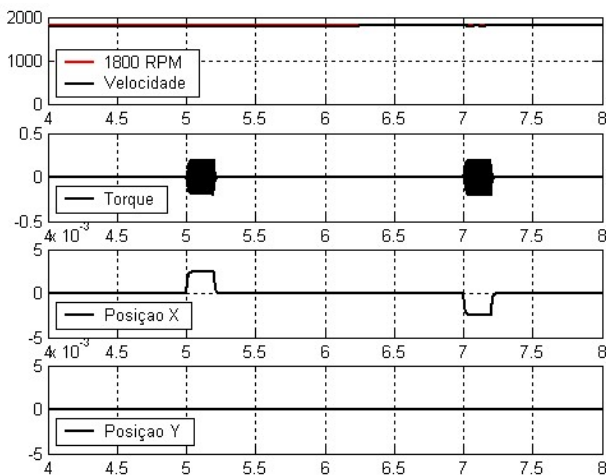


Fig. 10. Velocidade, torque e posição radial do rotor da máquina sem mancais com uma perturbação no eixo X (RPM, Nm e mm x segundo).

## VI. CONCLUSÕES

O trabalho apresenta como principal conclusão o fato do torque não sofrer alterações dinâmicas significativas com o desequilíbrio das correntes do estator decorrente do controle de posicionamento radial, porém sofre alterações em função da descentralização do rotor. Isso significa que uma máquina sem mancais com um controle de posicionamento radial eficiente comporta-se como uma máquina convencional no que se refere aos picos de torque.

Os resultados obtidos com a máquina sem mancais com bobinado dividido têm se apresentado condizentes com as suas características. A máquina apresentou também simetria em suas respostas, ao ocorrer um desequilíbrio proporcional nas correntes de uma mesma fase.

O modelo da máquina sem mancais, obtido através trabalho permite um maior esclarecimento do seu comportamento, o que permitira desenvolver controladores mais eficientes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Herman, P.K., *A radial active magnetic bearing*, London Patent No.1 478 868, 20 Nov. 1973.
- [2] Hermann, P.K., *A radial active magnetic bearing having a rotating drive*, London Pat No. 1 500 809, 9 Feb. 1974.
- [3] Higuchi, T., *Magnetically floating actuator having angular positioning function*, United States Patent No 4 683 391, 12 March 1985.
- [4] Bosch, R., "Development of a bearingless electric motor", *ICEM*, pp 373-375, 1988.
- [5] Salazar, A . O., Stephan, R.M., Dunford, W., "An efficient bearingless induction machine", *COBEP*, pp.419 - 424, Brazil, 1993.
- [6] Salazar, A . O., Stephan, R. M., "A bearingless method for induction machine", *IEEE Trans. On Magn.*, Vol.29, No. 6, pp 2965-2967, Nov. 1993.
- [7] Santisteban, J., Salazar, A.O., Stephan, R.M., "A digital control for a bearingless induction motor that uses their own stator windings", *Cong. Lat. American. of Control Automatic*, pp.583-587, Argentina, 1996.
- [8] Chiba, A ., Fukao, T., "Optimal design of rotor circuits in induction type bearingless motors", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol.34, No.4, pp.2108-2110, Jul. 1998.
- [9] Chiba, A., T, Fukao., Ichikawa, O., Oshima, M., Tahemoto, M., Dorrell, D. G., *Magnetic bearings and bearingless drives*, Newnes, 2005.
- [10] Chiba, A., Miyatake, R., Hara, S., Fukao, T., "Transfer characteristics of radial force of induction-type bearingless motors with four-pole rotor circuits", *Int. Symp. Magnetic Bearing*, pp.175-181, 1996.
- [11] Ferreira, J. M. S., *Proposta de máquina de indução trifásica sem mancal com bobinado dividido*, Dis. de Mestrado, PPGEE-UFRN, Natal, Março 2002.
- [12] Ferreira, J. M. S., *Modelagem de máquina de indução trifásica sem mancal com bobinado dividido*, Tese de Doutorado, PPGEE-UFRN, Natal, Novembro 2006; <http://www.ppgee.ufrn.br/teses.php>.
- [13] Leonhard, W., *Control of electrical drives*, Springer, Berlin 1996.
- [14] Schmitz, N., Novotny, D. W., *Introductory electromechanics*, Ronald Press, New York, 1965.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Jossana M. S. Ferreira**, nascida em 08/03/1977 em Natal, Rio Grande do Norte, é engenheira eletricista (1999), mestre (2002) e doutora em Engenharia Elétrica (2006) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Suas áreas de interesse são eletrônicas de potência, acionamento e modelagem de máquinas elétricas, processamento de sinais biológicos e educação em engenharia.

**Andrés Ortiz Salazar**, nascido em 13/03/1956 em Lima, Peru, é engenheiro eletrônico (1980) pela Universidade Nacional de Ingenieria (Lima-Perú), mestre (1989) e doutor (1994) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente é professor do departamento de Engenharia de Computação e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Suas áreas de interesse são eletrônicas de potência, acionamento, instrumentação e automação. É membro da SOBRAEP desde 1995.