

**V SEMINÁRIO NACIONAL DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO**
INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

Promoção:



Desenvolvimento de máquinas elétricas de relutância variável para automação industrial

Danilo Nobre Oliveira*, Tobias Rafael Fernandes Neto*, Vanessa Siqueira de Castro Teixeira*, Henrique Antunes Cunha Jr.*, Ricardo Silva Thé Pontes*

* Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Elétrica

GRUPO: ☐ A ☒ B ☐ C ☐ D ☐ E

TEMA: Controle e Automação de Processos

PALAVRAS CHAVE: máquina de relutância chaveada, parâmetros de projeto, acionamento, corrente de fase, indutância de fase, conjugado mecânico.

RESUMO – Neste artigo é analisada a influência dos parâmetros de projeto do Motor Rotativo de Relutância Chaveada (MRRC) nas suas características de operação (corrente de fase e conjugado mecânico) em regime permanente. Esta análise é realizada por meio de simulação computacional, tendo como base as características construtivas de um MRRC projetado pelos autores.

ABSTRACT – The paper analyses the influence of the rotating switched reluctance machine (RSRM) design parameters on its steady-state operation characteristics (phase current and mechanical torque). The present analysis is carried out using computational simulation, based on the constructive parameters of a RSRM designed by the authors.

1. INTRODUÇÃO

Os motores de relutância chaveada têm se tornado atrativos no ambiente industrial devido às suas características de baixo custo de manutenção e elevada potência específica.

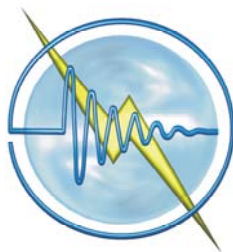
Apesar dessas características favoráveis, principalmente em relação ao conjugado específico (alta relação conjugado/volume), uma das desvantagens no acionamento do motor de relutância chaveado (MRC) refere-se ao comportamento não-linear do seu conjugado. Apesar de algumas aplicações não requerem alta eficiência em relação às oscilações no conjugado como, por exemplo, sistemas de ventilação, bombeamento e compressão, outras, no entanto, necessitam de baixa oscilação de conjugado e

um alto desempenho no controle do conjugado instantâneo como, por exemplo, servomotores e máquinas de posicionamento [1].

O desempenho do sistema de comando e controle em máquinas elétricas está vinculado a sua adequação ao sistema motriz empregado. A estratégia de controle capaz de minimizar oscilações no conjugado para o MRC depende intimamente do conhecimento do perfil de indutância da máquina [2]. Assim, o conhecimento do comportamento da indutância permite, desde o início do projeto, focalizar os requisitos de desempenho do sistema de controle de velocidade e de posição.

O objetivo principal desse trabalho é enfocar como os parâmetros de projeto das máquinas elétricas de relutância podem minimizar os custos com o acionamento, bem como simplificar o circuito e diminuir o esforço de controle. Os procedimentos de projeto para a máquina de relutância e para a obtenção da sua curva de indutância são apresentados de forma resumida, embasando adequadamente a análise do acionamento do MRC.

Na seção 2 são apresentados brevemente alguns aspectos do projeto do MRC, com ênfase nos parâmetros de maior influência no perfil de acionamento da máquina. Na seção 3 é apresentada a metodologia de análise e simulação do acionamento do MRC, juntamente com um exemplo de aplicação desta metodologia de análise e simulação do acionamento a um MRC de baixa potência fracionária, na seção 4.



V SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

2. PROJETO DO MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL E INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS

Em geral, o projeto do MRC utiliza as equações de saída como base de cálculo para os parâmetros. Essa técnica se assemelha aos procedimentos utilizados para o projeto convencional em outras máquinas rotativas.

Segundo [3], no MRC, a escolha do número de fases e do número de pólos do estator e do rotor não é fixa. Assim como também não é fixa a escolha das dimensões dos arcos de pólos. No entanto, há uma faixa de valores na qual é obtido o melhor desempenho. Os parâmetros de projeto influenciam na frequência de chaveamento, variação da distribuição do fluxo dentro do circuito magnético, na simplicidade da construção e controle dos circuitos auxiliares (circuitos de acionamento e controle) e até mesmo as perdas no núcleo. A seguir, são discutidas brevemente as relações de alguns parâmetros de projeto do MRC com seu acionamento.

2.1. NÚMERO DE PÓLOS

Segundo [3], um maior número de pólos no rotor implica no aumento da frequência provocando simplicidade de implementação do filtro de saída.

No entanto, a escolha do número de pólos também influencia os custos de montagem da máquina. Os custos com o conversor para o acionamento também crescem, devido ao maior número de chaves e componentes eletrônicos empregados, bem como o maior esforço de controle necessário para um funcionamento adequado da máquina.

2.2. COMPRIMENTO DOS ARCOS POLARES

Segundo [3], o comprimento do arco polar, além de aumentar a influência da posição do rotor na partida da máquina, também auxilia na eliminação do conjugado negativo sem que haja necessidade do circuito de controle desligar a chave antes e assim perder conjugado.

O intervalo no qual ocorre à máxima indutância, conhecido como “zona morta”, Fig. 3, torna-se mais largo a medida que o módulo da diferença entre a largura do pólo do estator e do rotor aumenta. Esta zona não contribui na geração de conjugado.

Desconsiderando o efeito transitório da corrente, verifica-se que quanto maior a zona morta, menor é a capacidade de geração de conjugado. Havendo corrente, enquanto a indutância estiver decrescendo, será gerado conjugado negativo

(sentido contrário). Desta forma, na prática, a presença da “zona morta” pode evitar que seja gerado conjugado negativo, pois a corrente não se extingue instantaneamente.

Estratégias adequadas de controle podem, igualmente, evitar a geração do conjugado negativo como, por exemplo, desligar a chave antes da zona máxima de indutância. No entanto, tal estratégia acarreta uma diminuição no conjugado gerado.

2.3. NÚMERO DE FASES

O número de fases influencia significativamente no conjugado de partida e conseqüentemente nos valores da variação da curva de indutância. Segundo [4], para que haja a produção de um conjugado contínuo e unidirecional, com uma capacidade de partida do rotor em qualquer posição, é necessário que o número de fases seja superior a dois. Motores com apenas uma ou duas fases possuem altas oscilações no conjugado. Além disso, máquinas com fase única não conseguem fornecer toda a potência nominal requerida.

2.4. CÁLCULO DA INDUTÂNCIA

O perfil de indutância pode ser obtido através do método analítico, descrito em [5] e [6], fornecendo uma aproximação razoável dos valores de indutância - mínima (L_{min}) e máxima (L_{max}). Este método baseia-se nos parâmetros construtivos de projeto do próprio MRC.

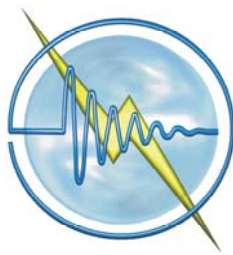
2.5. PROTÓTIPO DO MRC

Seguindo a metodologia utilizada por [5], juntamente com as considerações feitas anteriormente, foi desenvolvido o projeto de um MRC 6/4 (seis pólos no estator e quatro pólos no rotor). Essa configuração é uma das mais encontradas em sistemas industriais [5].

Os parâmetros da máquina projetada são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de projeto do MRC

Parâmetro	Valor
Potência total (P_{total})	736 W
Velocidade nominal (ω_{nom})	2.000 rpm
Tipo de condutor dos enrolamentos de fase	18 AWG
Número de espiras por fase (N_{esp})	110
Tensão nominal (V_{nom})	75 V



V SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

Parâmetro	Valor
Corrente nominal (i_{nom})	10 A
Número de fases (q)	3
Número de fases em condução simultânea	1
Número de pólos do estator (P_s)	6
Número de pólos do rotor (P_r)	4
Largura do pólo do estator (β_s)	30°
Largura do pólo do rotor (β_r)	34°
Comprimento da culatra do estator (b_{sy})	9,3 mm
Comprimento da culatra do rotor (b_{ry})	9,3 mm
Altura do pólo do estator (h_s)	20,7 mm
Altura do pólo do rotor (h_r)	6,2 mm
Altura do entreferro (g)	0,25 mm
Diâmetro do eixo do rotor (D_{eixo})	2,85 mm
Comprimento do material magnético do motor (L_w)	45,0 mm
Diâmetro interno (D_{int})	60 mm
Diâmetro externo (D_{ext})	120 mm
Densidade magnética do material (B)	1,5 T
Aço utilizado	M-19

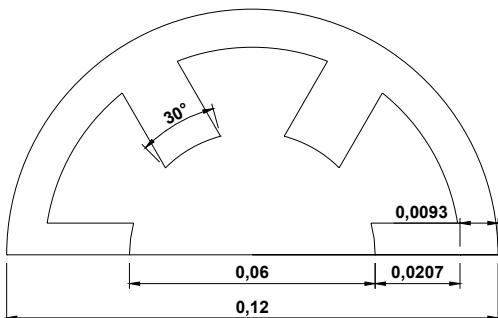


Fig. 1. Dimensões físicas do estator do MRC projetado.

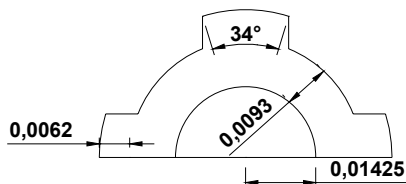


Fig. 2. Dimensões físicas do rotor do MRC projetado.

3. RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO NO ACIONAMENTO DO MRC

Segundo [3] e [5], um modelo aproximado da corrente para um MRC, com um par de pólos de

rotor e estator por fase, é ilustrado através da Fig. 3.

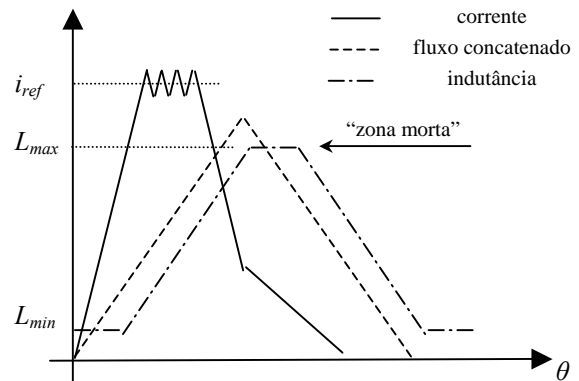


Fig. 3. Comportamento típico da corrente, indutância e do fluxo concatenado em uma fase do MRC.

Da Fig. 3, verifica-se que, ao energizar um enrolamento de fase, a corrente cresce que até atingir um valor de referência (i_{ref}) que é igual a i_{nom} caso a máquina opere em condições nominais. As oscilações de corrente ocorrem devido ao chaveamento do controlador para manter seu valor de corrente o mais próximo possível do nível de referência. No momento da desenergização da fase, a corrente cai bruscamente, até o fluxo concatenado inverter o sentido até se anular, repetindo-se este mesmo ciclo para as demais fases do MRC.

Os intervalos de crescimento, condução em regime e extinção da corrente de fase, a serem analisados, estão indicados na Fig. 4.

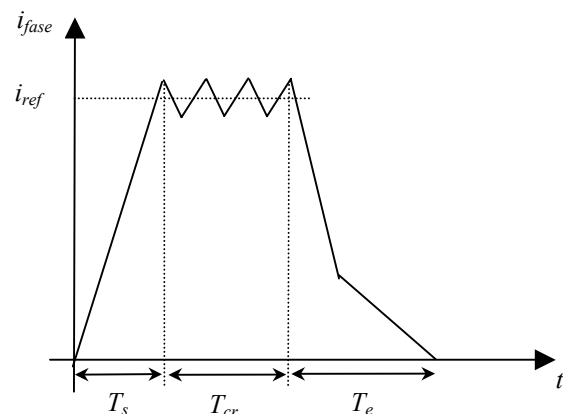
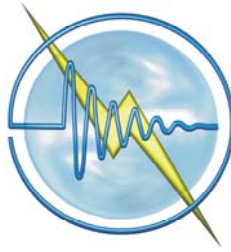


Fig. 4. Intervalos de tempo no acionamento do MRC.

3.1. INTERVALO DE CRESCIMENTO DA CORRENTE

Segundo [5], o tempo de subida da corrente de fase, pode ser calculado de maneira aproximada através de (1).



V SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

$$T_s = \tau_d \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{R_s \cdot i_{ref}}{V_{fase}}} \right) \quad (1)$$

onde τ_d , dado por (2), representa a constante de tempo da corrente para o valor mínimo da indutância de fase (posição de desalinhamento entre os pólos de rotor e estator da fase acionada).

$$\tau_d = \frac{L_{min}}{R_s} \quad (2)$$

Através de (1), verifica-se que quanto menor for a indutância mínima (L_{min}), mais rapidamente a corrente de fase entrará em regime, e maior poderá ser o conjugado gerado pelo MRC.

A distância angular necessária para que a corrente atinja o valor i_{ref} é dado por (3).

$$\Delta\theta_s = \omega_m \cdot T_s \quad (3)$$

Note-se que, para se utilizar (1), deve-se sempre obedecer à condição $V_{fase} > R_s \cdot i_{ref}$.

3.2. INTERVALO DE CONDUÇÃO EM REGIME

Segundo [5], O tempo de condução em regime da corrente de fase é dada com base no intervalo angular em que ocorre esta condução em regime (θ_{cr}), dado por (4), considerando-se que somente uma fase conduz simultaneamente.

$$\Delta\theta_{cr} = \frac{1}{3} \cdot \frac{2\pi}{\left(\frac{P_s \cdot P_r}{2} \right)} \quad (4)$$

Com base em (4), o tempo de condução em regime da corrente de fase é dada por (5).

$$T_{cr} = \frac{\Delta\theta_{cr}}{\omega_m} = \frac{1}{3} \cdot \frac{4\pi}{P_s \cdot P_r \cdot \omega_m} \quad (5)$$

onde ω_m representa a velocidade instantânea de rotação da máquina.

Através de (5), fica evidente que quanto menor for a quantidade de pólos de rotor e de estator, maior será o tempo de condução em regime da corrente de fase.

3.3. INTERVALO DE EXTINÇÃO DA CORRENTE

Segundo [5], o tempo de extinção da corrente de fase, pode ser calculado de maneira aproximada através de (6).

$$T_e = \tau_a \cdot \ln \left(1 + \frac{R_s \cdot i_{ref}}{V_{fase}} \right) \quad (7)$$

onde τ_a , dado por (8), representa a constante de tempo da corrente para o valor máximo da indutância de fase (posição de alinhamento entre os pólos de rotor e estator da fase acionada).

$$\tau_a = \frac{L_{max}}{R_s} \quad (8)$$

Através de (7), verifica-se que quanto menor for a indutância máxima, mais rapidamente a corrente de fase será extinta. Contudo, um valor de projeto muito pequeno para L_{max} poderá acarretar uma redução no conjugado do MRC.

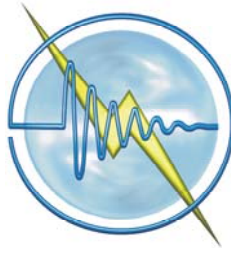
A distância angular necessária para que a corrente se anule é dado por (9).

$$\Delta\theta_e = \omega_m \cdot T_e \quad (9)$$

3.4. CONJUGADO MECÂNICO

O conjugado mecânico pode ser obtido através de (10), considerando-se a corrente de fase constante e a variação apenas da posição angular do rotor [5] e [6].

$$C_m = \frac{1}{2} \cdot i_{ref}^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (10)$$



V SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

Neste caso, a derivada da indutância é aproximada como uma função linear, definida por (11).

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\min(\beta_s, \beta_r)} \quad (11)$$

Em (9) e (10), fica evidente que o conjugado mecânico é diretamente influenciado por alterações nos valores dos parâmetros de projeto da máquina.

4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Para simulação do comportamento da corrente de fase e do conjugado mecânico, através da metodologia apresentada nos itens anteriores, são utilizados os dados da Tabela 1 (referentes ao MRC projetado).

Com base nas características do condutor escolhido (18 AWG) para os enrolamentos de fase do MRC, os valores comerciais de a_c e ρ são facilmente obtidos como sendo $0,82 \text{ mm}^2$ e $17 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{mm}$, respectivamente.

O valor de l_m pode ser calculado durante o procedimento de projeto do MRC [5] ou obtido diretamente de maneira aproximada, através de (11).

$$l_m = 2 \cdot \left[L_w + D_{\text{int}} \cdot \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) + \bar{\omega}_c \right] \quad (11)$$

onde $\bar{\omega}_c$ é o comprimento médio de um enrolamento de fase, sendo dado por (12).

$$\bar{\omega}_c = \frac{D_{\text{int}}}{2} \left(\frac{\pi}{P_s} - \frac{\beta_s}{2} \right) \quad (12)$$

Conhecendo-se os valores de l_m , a_c e ρ , e considerando que N_{esp} é um parâmetro de projeto previamente definido, pode-se obter a resistência dos enrolamentos, conforme (13).

$$R_s = \rho \cdot \frac{l_m \cdot N_{\text{esp}}}{a_c} \quad (13)$$

Os valores de V_{fase} , i_{ref} e ω_m são considerados como sendo os valores nominais do MRC projetado, conforme a Tabela 1, ou seja, 75V, 10A e 2.000 rpm, respectivamente.

Os valores de L_{\min} e L_{\max} são obtidos utilizando-se a metodologia mencionada no subitem 2.4.

Para ilustrar o comportamento do acionamento do MRC, foram efetuadas simulações com variações no comprimento angular do pólo do rotor (β_r), tendo como base os valores da Tabela 1. Os resultados são apresentados nas Fig. 5 a 8 e nas Tabelas 2 a 5.

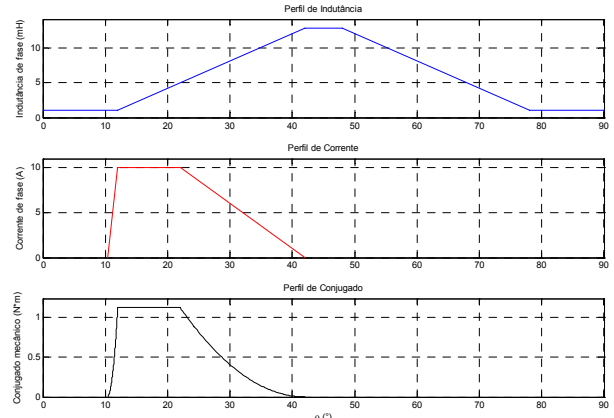


Fig. 5. Comportamento da indutância, da corrente e do conjugado para $\beta_r = 36^\circ$.

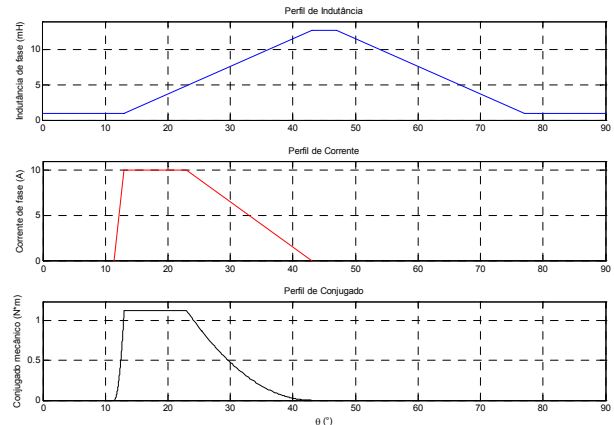
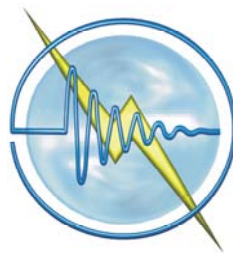


Fig. 6. Comportamento da indutância, da corrente e do conjugado para $\beta_r = 34^\circ$.



V SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

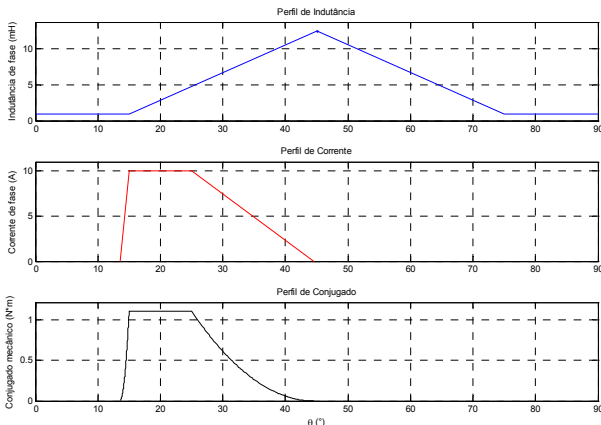
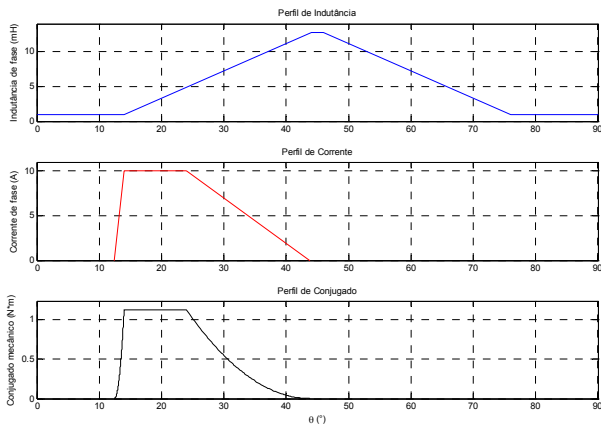


Tabela 2. Acionamento do MRC ($\beta_r = 36^\circ$)

Intervalo de acionamento	$\Delta\theta$ (°)	T (ms)
Crescimento da corrente	1,68	0,14
Corrente de condução em regime	10	0,833
Extinção da corrente	20,08	1,7

Tabela 3. Acionamento do MRC ($\beta_r = 34^\circ$)

Intervalo de acionamento	$\Delta\theta$ (°)	T (ms)
Crescimento da corrente	1,61	0,134
Corrente de condução em regime	10	0,833
Extinção da corrente	19,99	1,7

Tabela 4. Acionamento do MRC ($\beta_r = 32^\circ$)

Intervalo de acionamento	$\Delta\theta$ (°)	T (ms)
Crescimento da corrente	1,55	0,129

Intervalo de acionamento	$\Delta\theta$ (°)	T (ms)
Corrente de condução em regime	10	0,833
Extinção da corrente	19,86	1,7

Tabela 5. Acionamento do MRC ($\beta_r = 30^\circ$)

Intervalo de acionamento	$\Delta\theta$ (°)	T (ms)
Crescimento da corrente	1,5	0,125
Corrente de condução em regime	10	0,833
Extinção da corrente	19,59	1,6

CONCLUSÃO

Através das simulações realizadas, verificou-se a influência do comprimento angular do rotor no acionamento do MRC. O maior aproveitamento de conjugado é obtido com o aumento do comprimento angular do pólo do rotor,

$$\text{considerando } \frac{2\pi}{P_r} \cdot \left(1 - \frac{1}{q}\right) > \beta_r > \beta_s.$$

Como trabalho futuro, serão incluídas as análises do conjugado médio e das perdas no material magnético e nos enrolamentos, considerando todas as fases da máquina.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio e suporte financeiro para a elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] L. O. A. P. Henrique, (1999) Compensação das Oscilações de Torque de um acionamento de relutância chaveado utilizando técnicas de controle *neuro-fuzzy*. *Tese de Mestrado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil.
- [2] A. C. Oliveira, (2003) Acionamento de Máquina de Relutância Variável. *Tese de Doutorado*, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.
- [3] P.J. Lawrenson, et al, (1980) Variable-speed Switched Reluctance Motors, *IEE proc.*, part. B, vol. 127, no. 4, pp. 253-265.
- [4] J. L. Domingos, (2003). Projeto, construção e proposta de acionamento de um motor linear a relutância chaveado, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
- [5] R. Krishnan, (2001) Switched Reluctance Motor Drives – Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. New York, CRC Press.
- [6] D. N. Oliveira, et al, (2006) Método iterativo para cálculo da variação da indutância do motor rotativo de relutância chaveada. *Anais do IX Encontro de Modelagem Computacional*, Cefet-MG, Brasil.