

ANÁLISE DA DINÂMICA DAS LINHAS DE FLUXO MAGNÉTICO, TORQUE E INDUTÂNCIA DE MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADO 6/4 UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

VITOR ANNECCHINI SCHIMID¹

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise dinâmica da variação das linhas de fluxo magnético de um Motor de Relutância Chaveado, bem como suas curvas características de torque e indutância, todas simuladas utilizando o método dos elementos finitos. A análise gráfica é posteriormente confrontada com os conceitos teóricos referentes a esta máquina para validação do método numérico.

Palavras-Chave - Motor de Relutância Chaveado, Método dos Elementos Finitos.

¹ Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo; Mestrando em Sistemas de Potência pela Universidade de São Paulo; E-mail: vitorannecchini@hotmail.com

**DYNAMICS ANALYSIS OF MAGNETIC FLOW LINES, TORQUE AND
INDUCTANCE OF 6/4 SWITCHED RELUCTANCE MOTOR USING THE FINITE
ELEMENTS METHOD**

ABSTRACT

This paper presents a dynamic analysis of the magnetic flux lines variation of a Switched Reluctance Motor, as well as its characteristic curves of torque and inductance, all simulated using the finite elements method. The graphical analysis is then confronted with the theoretical concepts related to this machine for the numerical method validation.

Keywords - Swithed Reluctance Motor, Finite Elements Method.

1 – INTRODUÇÃO

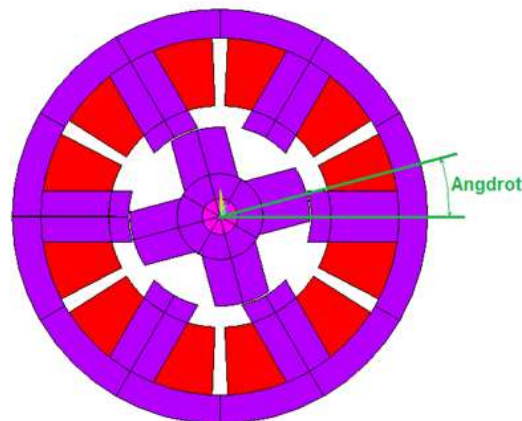
Os Motores de Relutância Chaveados são caracterizados por sua construção de baixo custo e alta solidez, montados a partir de um estator e um rotor compactos, com laminação de aço e enrolamentos localizados apenas nos polos do estator (DIAS, 2011).

A despeito de algumas limitações, esse tipo de motor possui muitas vantagens se comparado a outros tipos de máquinas, como bom rendimento e confiabilidade. Em alguns países, os Motores de Relutância Chaveados são fabricados em escala industrial, sendo utilizados em diversos setores como eletrodoméstico e automotivo (SIGNORELLI ET AL, 2005).

No que tange a projetos de motores, é de grande interesse dos desenvolvedores obter as características da máquina ainda em sua fase de concepção, de forma a possibilitar um estudo antecipado de predição de comportamento da máquina (NABETA ET AL, 1998). Uma das ferramentas utilizadas para este propósito é o Método dos Elementos finitos (MEF), que se trata de um algoritmo numérico amplamente utilizado nos dias atuais.

O objetivo deste trabalho é apresentar visualmente e analisar a variação do fluxo magnético e as curvas de torque e indutância de um Motor de Relutância Chaveado 6/4 polos (seis polos no estator e quatro polos no rotor), apresentado na Figura 1, bem como a associação teórica entre esses parâmetros e a corrente nas bobinas e o ângulo de deslocamento do rotor da referida máquina. Para este propósito, foi realizada uma simulação computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Figura 1 - Motor de Relutância Chaveado 6/4.



Fonte: O autor.

2 – O SOFTWARE UTILIZADO

Para a realização da simulação computacional, foi utilizado o software Ansys, que implementa o sistema CAD (Computer Aided Design), e possibilita a construção de geometrias muito próximas às originais, otimizando os resultados.

Uma característica importante deste software é a possibilidade de obtenção de resultados tanto quantitativos (valores numéricos dos parâmetros calculados) como qualitativos (desenho das linhas de fluxo magnético) através da análise eletromagnética do motor.

Há duas formas de realização de uma simulação eletromagnética pelo Ansys. Uma delas é a utilização da interface gráfica do software, a outra é através de linhas de comando no formato de arquivo ASCII (ZAMBRANO, 2003). No presente trabalho, optou-se pelo segundo método, já que este possibilita maior precisão na criação da malha de elementos finito.

A simulação proposta foi dividida em três etapas:

- 1 – Pré-processamento: o projetista faz o desenho do objeto a ser simulado, define os materiais relacionados, condições de contorno, geometria da malha, etc.
- 2 – Processamento: após a discretização, são resolvidas as equações para a determinação do potencial magnético de cada nó.

3 – Pós-Processamento: etapa de análise dos resultados, onde são obtidos valores de força, torque, fluxo magnético, etc.

3 – MODELAGEM DO MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

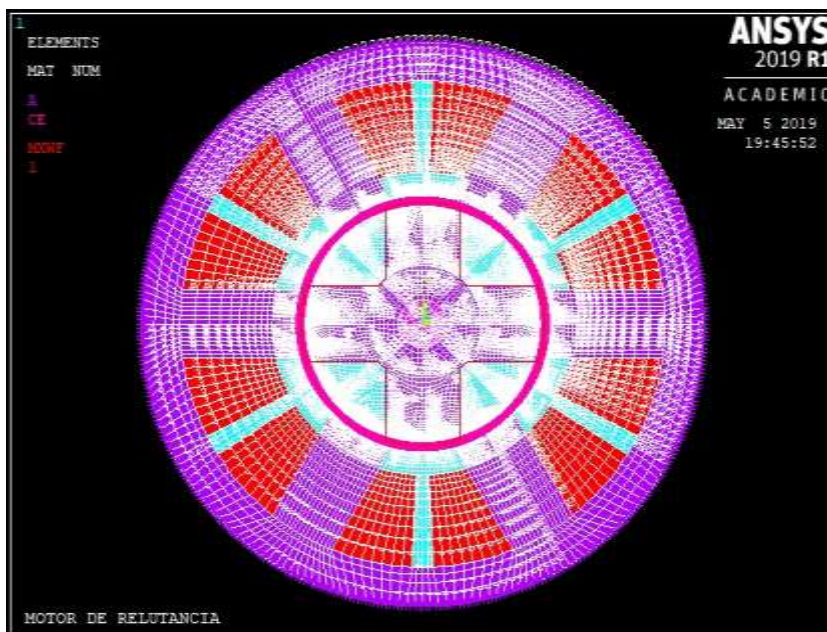
O Método dos Elementos Finitos consiste em reduzir um problema de poucas equações diferenciais de difícil resolução a um problema de muitas equações de resolução mais simples. Esta redução consiste na divisão da geometria em questão em pequenos elementos finitos, como por exemplo, triângulos ou quadrados.

Em uma simulação computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos, os dados devem ser limitados pelo espaço computacional. Ou seja, o domínio computacional deve ser suficientemente grande para conter a estrutura do motor. Para que isso seja possível, condições de contorno bem definidas precisam ser estabelecidas.

Para a modelagem da máquina, foram definidos os vértices de cada parte da geometria do motor. Posteriormente, esses vértices foram ligados formando as áreas da máquina.

Em seguida, foi feita a divisão de cada área em elementos finitos. A geometria quadrangular dos elementos foi escolhida por caracterizar-se por resultados mais precisos que a geometria triangular. A Figura 2 apresenta a malha desenvolvida.

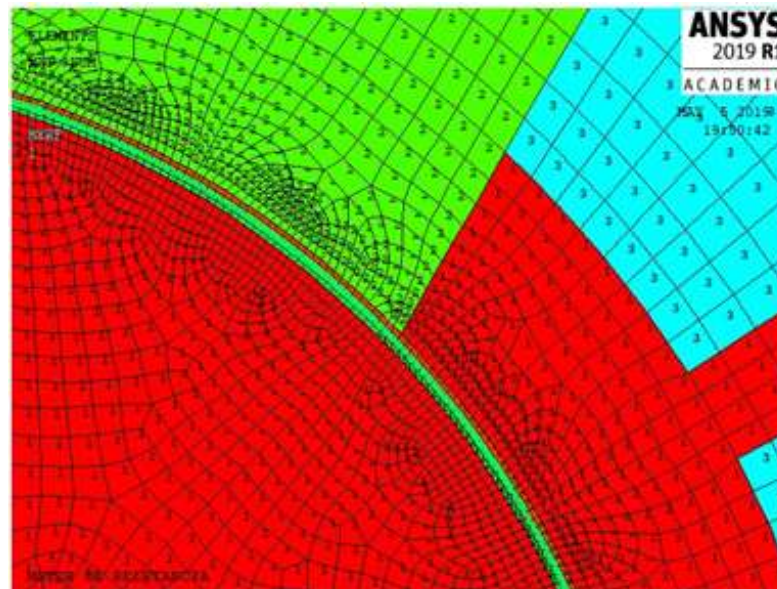
Figura 2 - Malha do Motor de Relutância Chaveado.



Fonte: O autor.

Uma particularidade importante da malha planejada do Método dos Elementos Finitos é o fato de que, em locais de grande variação de densidade de fluxo magnético, como por exemplo, o entreferro e suas proximidades, é necessário um maior adensamento dos elementos. A Figura 3 ilustra a malha desta região.

Figura 3 - Malha do entreferro e proximidades.



Fonte: O autor.

4 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA

O funcionamento do Motor de Relutância Chaveado baseia-se no princípio de que o conjugado é produzido pela tendência do rotor em se deslocar para a posição em que a indutância do enrolamento excitado é máxima. Em outras palavras, no momento em que é introduzida uma corrente nas bobinas de uma das fases, os polos do estator referentes à fase energizada e os polos do rotor mais próximos tendem a se alinhar. Portanto, para produzir torque, este tipo de máquina deve ser projetada para que as indutâncias variem na medida em que o rotor se desloca (FITZGERALD *et al.*, 1971).

Quando ocorre o alinhamento entre um par de polos do estator e um par de polos do rotor, esta fase encontra-se na posição *alinhada*. Nesta condição, a relutância do caminho magnético é mínima e, conseqüentemente, a indutância de fase é máxima. Neste momento específico, não há produção de conjugado naquela fase, já que a tendência do rotor é permanecer nesta posição (SIGNORELLI ET AL, 2005).

Tomando o ângulo *Angdrot* da Figura 1 como 45° , os polos da fase A do estator, definidos na Figura 4, ficarão totalmente desalinhados dos polos do rotor. Neste caso,

diz-se que o rotor se encontra na posição *desalinhada*. Neste ponto, a relutância é máxima e a indutância é mínima. Esta posição caracteriza-se pela ausência de estabilidade. Portanto, qualquer movimento do eixo moverá o rotor para a próxima posição de alinhamento com os polos do estator cuja fase estiver excitada.

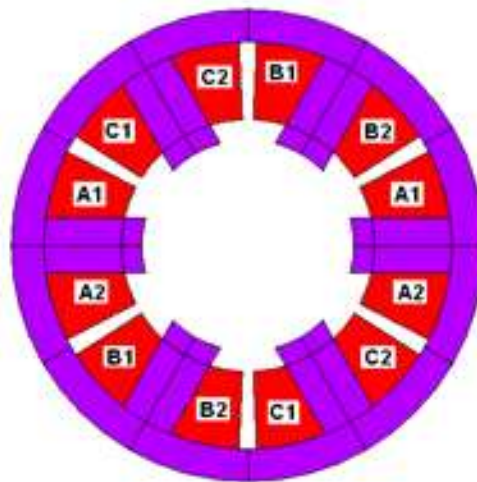


Figura 4 - Definição das fases da máquina. **Fonte: O autor.**

Em resumo, quando uma fase é excitada, o torque tende a girar o rotor até a posição mais próxima do máximo enlaçamento de fluxo. Ao remover a corrente das bobinas desta fase e excitando-se a próxima, o rotor se movimenta no sentido de aumentar o fluxo desta nova fase e assim por diante.

É importante ressaltar que, além de variar com a posição do rotor, a indutância varia com as correntes de fase. A saliência do estator é outro fator que aumenta a diferença entre os valores máximo e mínimo da indutância, fato este que melhora a produção de torque do motor (SIGNORELLI ET AL, 2005).

O torque é dado pela seguinte relação:

$$C(\theta; i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta; i)}{\partial \theta}$$

Da equação de torque, pode-se concluir que o sentido do conjugado não depende do sentido da corrente aplicada, já que este parâmetro está elevado ao

quadrado. Esta é uma característica do Motor de Relutância Chaveado que simplifica seu acionamento, uma vez que, sem a necessidade da corrente reversa, o circuito de controle pode usar, para certas aplicações, apenas uma chave por fase, reduzindo drasticamente sua complexidade (SIGNORELLI ET AL, 2005).

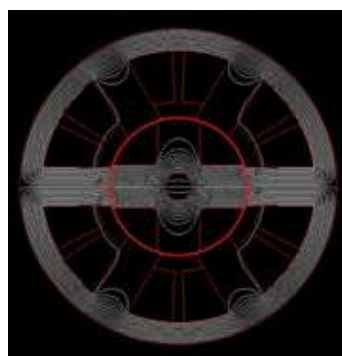
Outra observação importante é que, para a obtenção de operação e desempenho desejados, o ângulo *Angdrot* do rotor deve ser conhecido a todo instante de forma que os chaveamentos responsáveis pela alimentação das fases possam ser feitos corretamente. Assim, deve-se utilizar sensores de posição precisamente posicionados. Ademais, a seleção adequada dos ângulos de chaveamento é um fator determinante para evitar a presença de um indesejado torque negativo no eixo do Motor de Relutância Chaveado (DIAS, 2011).

5 – SIMULAÇÃO

O Motor de Relutância Chaveado 6/4 descrito foi simulado pelo Método dos Elementos Finitos para verificação dos conceitos apresentados até aqui. Tomou-se como referência a fase A da máquina.

A seguir, são apresentadas as linhas de fluxo da máquina para $Angdrot=0^{\circ}$, 30° , 45° , 60° e 90° , respectivamente:

Figura 5 - Fluxo para $Angdrot=0^{\circ}$.



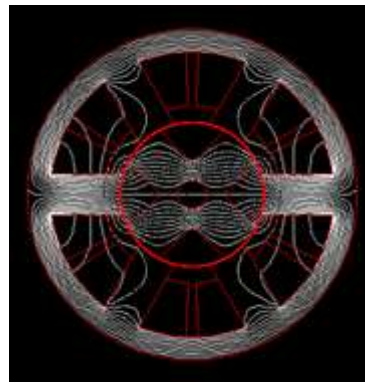
Fonte: O autor.

Figura 6 - Fluxo para Angdrot=30°.



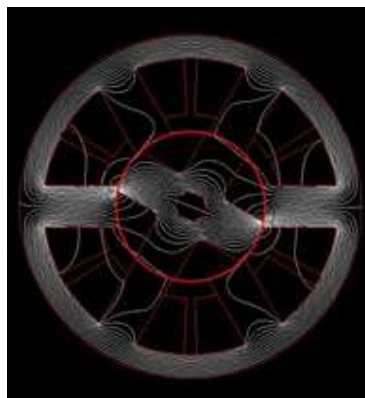
Fonte: O autor.

Figura 7 - Fluxo para Angdrot=45°.

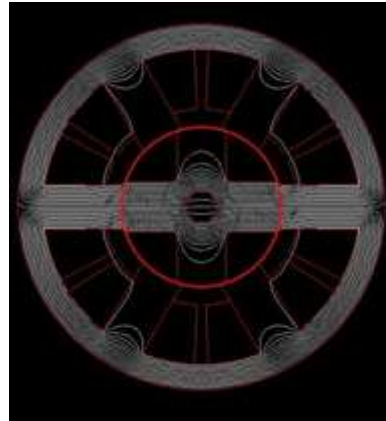


Fonte: O autor.

Figura 8 - Fluxo para Angdrot=60°.



Fonte: O autor.

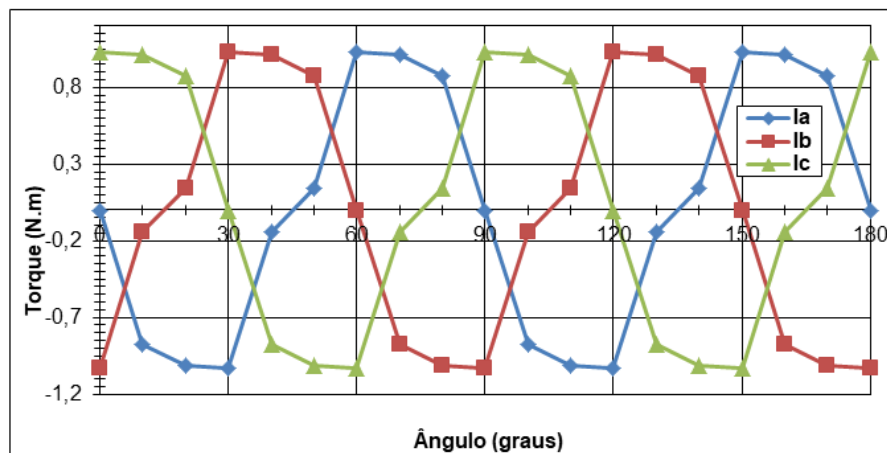
Figura 9 - Fluxo para Angdrot=45⁰.

Fonte: O autor.

Observa-se claramente o padrão descrito na seção 5. Inicialmente, para $\text{Angdrot}=0^0$, os polos do rotor estão totalmente alinhados com os polos da fase A do estator. Neste ponto, observa-se a condição de máximo fluxo. Na medida em que o rotor se move, o fluxo tende a decair até o ponto em que $\text{Angdrot}=45^0$, momento em que as linhas de fluxo estão no nível máximo de desalinhamento. A partir deste ponto, o fluxo volta a crescer até atingir um novo ponto máximo em $\text{Angdrot}=90^0$.

O mesmo processo acima foi repetido para as três fases e foram coletados os valores de torque para cada variação de 10^0 no deslocamento do rotor. O resultado é o gráfico da Figura 10.

Figura 10 - Torque para cada fase da máquina.



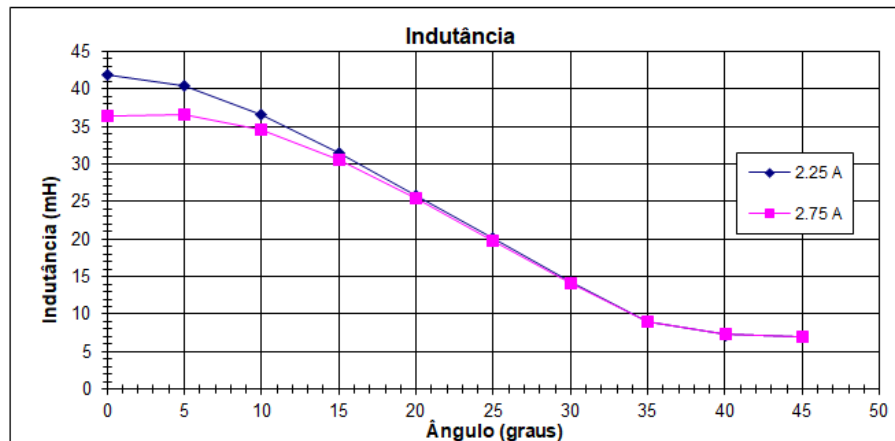
Fonte: O autor.

Tomando novamente como exemplo a fase A, observa-se que o torque é nulo para $\text{Angdrot}=0^\circ$ e $\text{Angdrot}=45^\circ$, regiões de respectivo máximo e mínimo alinhamento entre rotor e estator. Já em $\text{Angdrot}=30^\circ$ e $\text{Angdrot}=60^\circ$, ocorrem os pontos de máximo módulo do torque, tendo em vista que estas são as regiões de máxima taxa de variação da indutância.

Uma observação importante é o fato de que, na prática, a comutação das chaves de acionamento ocorre a cada 30° , e, assim sendo, apenas a parte positiva do gráfico seria visualizada, e sem a intercorrência de fases, tendo em vista que apenas uma é alimentada por vez.

O gráfico da figura 7 apresenta a variação da indutância com relação ao ângulo de giro do rotor:

Figura 11 - Variação da indutância para diferentes correntes.

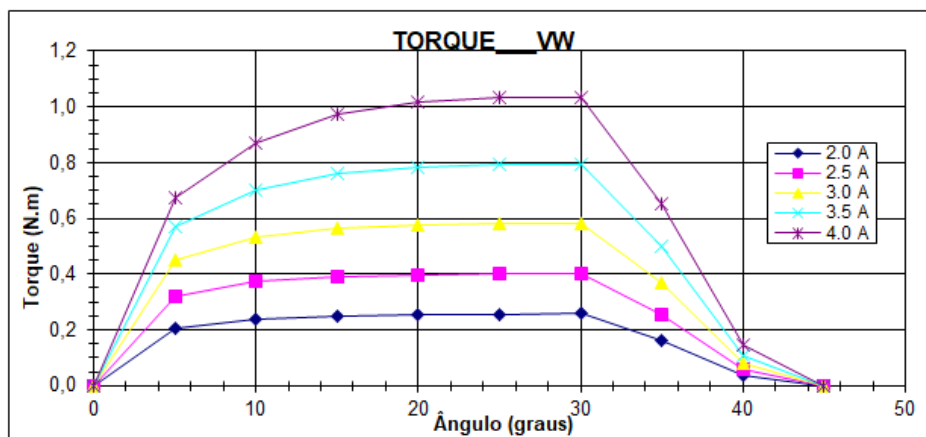


Fonte: O autor.

Para o gráfico da Figura 11, foram utilizados dois valores diferentes de corrente para observar o comportamento da indutância, novamente tendo a fase A como referência. Fica claro que para valores mais altos de corrente a indutância tende a sofrer um decréscimo.

A figura 12 apresenta a variação do torque para diferentes valores de corrente:

Figura 12 - Variação do torque para diferentes correntes.



Fonte: O autor.

Para o gráfico da Figura 12, foram utilizados cinco valores diferentes de corrente. A fase A foi utilizada como referência e os valores do torque foram calculados em módulo. Observa-se que, para correntes mais altas, há um aumento no torque do motor.

6 – CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram obtidas e analisadas graficamente as características de fluxo magnético, torque e indutância de um Motor de Relutância Chaveado, e esses dados confrontados com a teoria eletromagnética associada. Em virtude dos resultados apresentados, é possível concluir que o método computacional utilizado (Elementos Finitos) se mostrou satisfatório para a obtenção dessas importantes características da máquina em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, C; SIGNORELLI M, “Princípio de Funcionamento e Acionamento do Motor a Relutância Variável”, Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

DISPONÍVEL EM https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2005/ceel2005_045.pdf

E. M. HALL, S. RAMAMURTHY, “Analysis, Dimensional Sizing and Configuration Comparison of Switched-Reluctance Motors Operating Under Multiphase Excitation”, IEEE 2002.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, “Electric Machinery”, 6th Edition, McGraw-Hill Inc 1971.

G. M. ZAMBRANO; “Simulação do Ensaio de Resposta em Frequência em Máquina Síncrona de Polos Salientes Utilizando o Método dos Elementos Finitos”, 2003.

DISPONÍVEL EM http://www.pee.ufrj.br/index.php/en/producoes-academica/dissertacoes-de-mestrado/2003_1/2003121601-2003121601/file

NABETA, S; CARDOSO, J; “Determinação dos Parâmetros de Máquinas Síncronas Pela Simulação por Elementos Finitos do Ensaio de Resposta em Frequência”, 1998. DISPONÍVEL EM <https://www.sba.org.br/revista/vol9/v9a163.pdf>

R.J.DIAS; “Motores a Relutância Variável 6X4 e 6X6. Estudo Comparativo de Operação e Desempenho”, 2011. DISPONÍVEL EM: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14461/1/d.pdf>