

# Análise de um motor BLDC pelo método dos elementos finitos

Daniel Flores Silva, Daniel Henrique Nogueira Dias, Bruno Soares Moreira Cesar Borba

Universidade Federal Fluminense

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de um motor BLDC real, através de simulação 2-D utilizando o método de elementos finitos por meio do programa Maxwell. Esses motores representam um grande desafio para a obtenção das curvas características de torque x velocidade. Quanto maior a potência, mais difícil se torna para executar testes de bancada. Portanto, a modelagem de elementos finitos pode representar uma solução econômica e confiável para obter curvas de desempenho.

Palavras Chaves: Motor BLDC; Análise por elementos finitos; Motores elétricos.

## BLDC MOTOR ANALYSIS USING FINITE ELEMENT METHOD

### ABSTRACT

This work has the objective to analyze a real BLDC motor behavior through a 2-D finite-elements simulation using ANSYS Maxwell. These motors represent a major challenge for obtaining torque x speed characteristics curves. The greater the power, the harder it becomes to run bench tests. Therefore, finite-element modeling can represent an economical and reliable solution to obtain performance curves.

Keywords: BLDC motor; Finite-Elements analysis; Electric motors.

## I. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos no setor de energia elétrica têm contribuído para o aumento da complexidade dos motores elétricos. A eletrônica de potência, que se consolidou na década de 1970 com a produção industrial dos transistores de potência, foi crucial para o controle de motores elétricos. Outra tecnologia responsável pelo aumento foi a descoberta de novos materiais magnéticos, na década de 1980, com densidade de energia consideravelmente maior do que os antecessores. Portanto, cada vez mais os motores elétricos e seus diferentes métodos de controle são estudados, principalmente num quadro mundial de aumento da frota de veículos elétricos. Nesse cenário, o motor sem escovas de ímãs permanentes, ou BLDC, produto de um esforço multidisciplinar que envolve áreas de engenharia mecânica, elétrica e de controle, se destaca dos demais por sua densidade energética e versatilidade[1][2].

O BLDC, apesar do nome, é uma máquina síncrona, cujo campo é fornecido pelos ímãs no rotor, enquanto o estator é alimentado por tensões polifásicas. A velocidade ou o torque deste tipo de máquina podem ser controlados através de um inversor de frequência modulado por largura de pulso (PWM). O inversor, alimentado por uma fonte de tensão contínua, é responsável por fornecer pulsos quadrados de corrente para a máquina, de acordo com a realimentação de sinais obtidos por

sensores de posição, localizados no estator da máquina, responsáveis por determinar o momento certo do chaveamento[3][4].

A fim de definir o motor que melhor se adequa a um determinado veículo elétrico, é necessário analisar a curva de performance do motor frente ao comportamento da carga mecânica para diferentes velocidades. Entretanto, a obtenção dessas curvas não é tarefa fácil, visto que o mercado não tem a prática de fornecê-las, ou as fornece para apenas uma condição de alimentação. Por outro lado, obter essas curvas por meio de ensaios pode ser custoso e perigoso à medida que a potência da máquina aumenta. Portanto, o objetivo deste artigo é apresentar a análise de um motor BLDC, através de uma simulação 2D, não-linear, discreta, utilizando o método dos elementos finitos para calcular o campo magnético no motor e o torque no rotor[5][6].

## II. MÉTODOS

A análise do comportamento deste motor foi realizada mediante simulações pelo programa computacional ANSYS Maxwell. Para obtenção da forma de onda da corrente, o motor foi conectado ao inversor de frequência e as correntes foram observadas através de um osciloscópio. Nos itens seguintes, apresentam-se as características principais do motor, as medições realizadas e as etapas de construção do modelo do motor.

### A. Parâmetros do motor

O motor analisado é um motor BLDC trifásico de fluxo radial de 12 ranhuras e 14 polos de rotor externo. Os parâmetros de operação desse tipo de motor comumente são referenciados à alimentação do inversor, ou seja, estão no referencial contínuo no tempo. A tensão de alimentação do inversor é de 24 V e corrente nominal de 80 A. O motor tem velocidade nominal de 5800 rpm a 700 Hz. Os principais parâmetros geométricos do motor são resumidos na Tabela 1, enquanto a Figura 1 apresenta um corte transversal do motor.

Tabela 1- Dados geométricos do motor.

Descrição	Medida (mm)
Raio Ext. Rotor	24,37
Raio Int. Rotor	23,38
Raio Ext. Estator	20,05
Raio Int. Estator	7,00
Espessura do Ímã	3,10
Entreferro	0,23

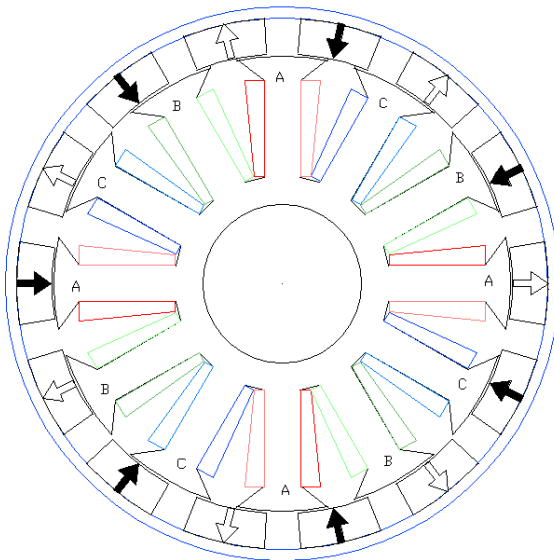


Figura 1 - Corte transversal do motor

### B. Medição das correntes impostas

Afim de se evitar a complexidade da modelagem do inversor, foram realizadas medições da forma de onda da corrente para diferentes velocidades, sem carga. A Figura 2 ilustra a forma de onda das correntes das fases A,C, para a velocidade nominal de 5800 rpm.



Figura 2 - Formas de onda das correntes impostas pelo inversor à 5800 rpm.

Como pode ser observado, o período de cada fase pode ser dividido em 6 partes iguais. Nas primeiras duas partes, a corrente na fase A pode ser aproximada por um pulso de amplitude 5. Na terceira parte, a amplitude do pulso é zero. Na quarta e quinta partes, a corrente na fase A pode ser aproximada por um pulso de amplitude -5. Por fim, a última parte é um pulso de amplitude zero. O mesmo é feito para as outras três fases, com um defasamento de  $120^\circ$  entre cada.

### C. Definição de Materiais

Em seguida, foi definido o material de cada parte, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Para a definição dos ímãs permanentes, foram criados 14 novos materiais, a partir do material NdFeB35 e cada um foi associado à um ímã. Nas definições avançadas de cada ímã foi possível definir, através de coordenadas cilíndricas, a orientação dos ímãs, conforme ilustrada na Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 2-Definição de materiais.

Descrição	Material
Enrolamentos	Cobre
Ímãs	NdFeB 35
Núcleo	Aço 1010
Carcaça	Aço 1010
Região	Vácuo

### D. Definição das excitações

Por se tratar de uma máquina trifásica de 12 ranhuras, tem-se que o número de bobinas por fase é 4. Entretanto, para facilidade na simulação, cada bobina foi dividida em duas. Foi criado um critério de cores para identificação, na qual as cores claras indicam polaridade positiva e as cores mais escuras indicam polaridade negativa. Cada fase tem uma cor, sendo a fase A vermelha, fase B verde e fase C azul. Em seguida, foram definidos os enrolamentos das fases A, B e C, como sendo o conjunto de quatro bobinas de cada fase.

A partir das formas de onda das correntes, os enrolamentos de cada fase foram ligados ao circuito externo ilustrado na

Figura 3. Este circuito possui dois geradores de pulso, uma resistência e uma indutância por fase. Um gerador de pulso é responsável pelo pulso de amplitude positiva, enquanto o outro é responsável pelo pulso de amplitude negativa. O valor de resistência por fase ( $0,028\Omega$ ) é dado do motor, e as indutâncias de cada fase estão vinculadas ao modelo do motor, o que significa que qualquer variação de indutância presenciada na simulação 2-D também irá acontecer no circuito externo.

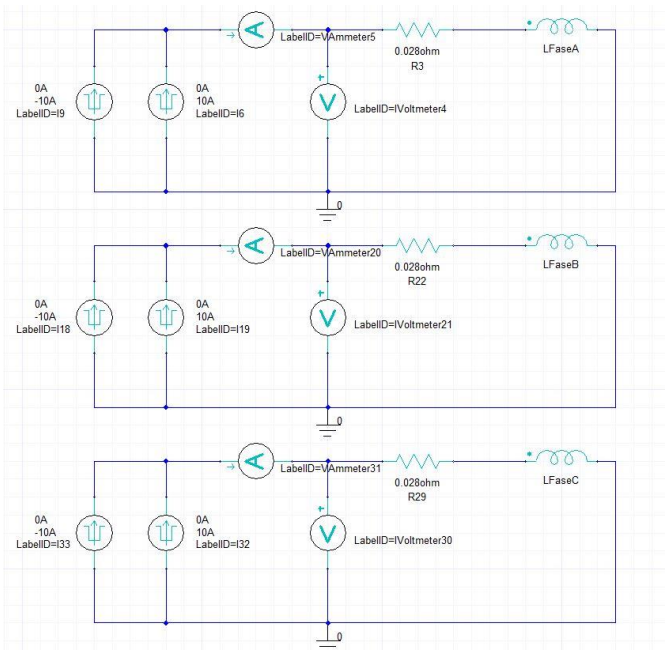


Figura 3 - Circuito externo de alimentação dos enrolamentos.

#### E. Definição da banda de rolagem

Para definir que o conjunto carcaça e ímãs, que compõe o rotor, são peças livres para girar, foi definida uma banda de rolagem. Esta banda de rolagem é a superfície localizada entre o raio externo do rotor e o raio externo do estator, portanto compreende carcaça, ímãs e o entreferro entre ímã e núcleo.

Em seguida, na configuração de movimento, foi definido que o tipo de movimento é de rotação ao longo do eixo z, sem deslocamento inicial e com velocidade constante igual à velocidade nominal (5800 rpm).

#### F. Definição das Malhas

A definição da malha numa simulação de elementos finitos é um dos pontos mais importantes, visto que se o número de elementos for muito baixo, a precisão dos resultados pode ser comprometida, ao passo que se o número de elementos for muito grande, os recursos computacionais serão extremamente altos.

Portanto, foram criadas seis malhas diferentes, visando otimizar pontos que necessitam de uma análise mais precisa do campo magnético, economizando em áreas que não necessitam de tanta precisão. O número de elementos de cada malha foi refinado de acordo com uma análise de tentativa e

erro, observando a convergência dos resultados e o tempo de simulação. A primeira malha, definida no interior da área de todas as bobinas, possui um total de 250 elementos. A segunda malha, definida no interior da região de interesse (vácuo) possui um total de 200 elementos. A terceira malha, definida no interior da área do núcleo, possui um total de 250 elementos. A quarta malha, definida no interior da superfície da banda de rolagem, que compreende a carcaça, os ímãs e o entreferro, possui um total de 3000 elementos. A plotagem das malhas pode ser observada na figura a seguir.

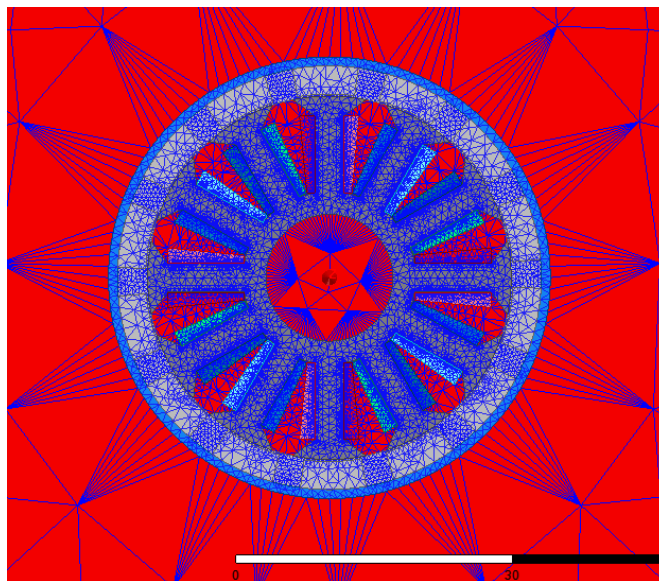


Figura 4 - Plotagem da malha de análise.

### III. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

O objetivo da simulação é mostrar a curva de torque, correntes, tensões, bem como a distribuição das linhas de campo e a densidade de fluxo magnético, para o caso do motor à velocidade nominal, sem carga mecânica acoplada ao eixo.

Deve-se atentar que ao trabalhar na frequência nominal de 700 Hz o passo de simulação deve ser suficientemente pequeno para reproduzir as variações de corrente no tempo. Portanto, foi definido o passo de integração como sendo de 28,57  $\mu$ s, o que é 50 vezes menor que um ciclo e um tempo de simulação de 8 ciclos ou 11,43 ms. Em seguida, o tempo final de simulação foi dividido em 12 passos iguais e, em cada passo, será gerada uma imagem com o arranjo instantâneo da densidade de fluxo e das linhas de campo. A profundidade do motor também foi inserida, de forma que o resultado final de torque não necessite de qualquer ajuste.

A Figura 5 ilustra o comportamento do torque da máquina à vazio. A máquina entrou em regime com aproximadamente 65 mN.m com oscilações de  $\pm 3$  mN.m. A Figura 6 ilustra o comportamento das correntes impostas através do circuito externo, enquanto a Figura 7 ilustra o comportamento das tensões.

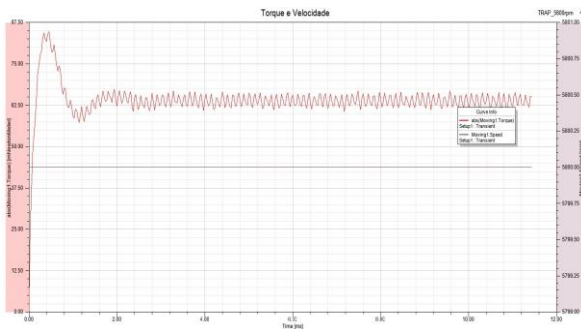


Figura 5 - Torque e velocidade.

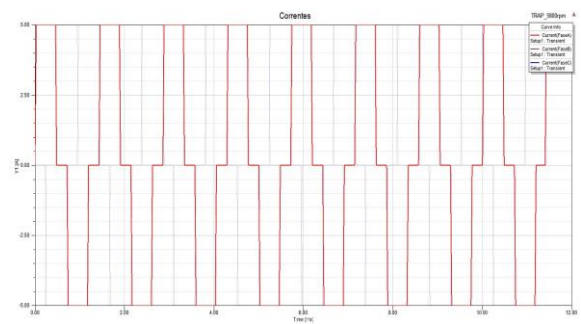


Figura 6 - Correntes impostas.

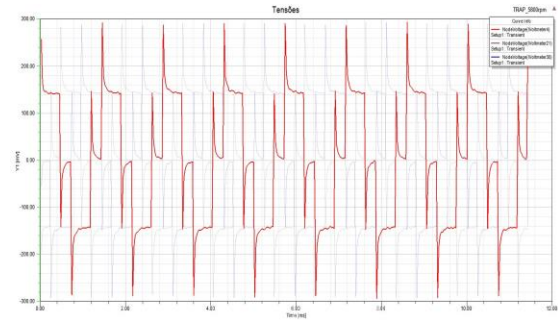


Figura 7 - Tensões resultantes

Já a Figura 8 ilustra a densidade de fluxo, enquanto a Figura 9 mostra as linhas de campo no instante  $t=0$ .

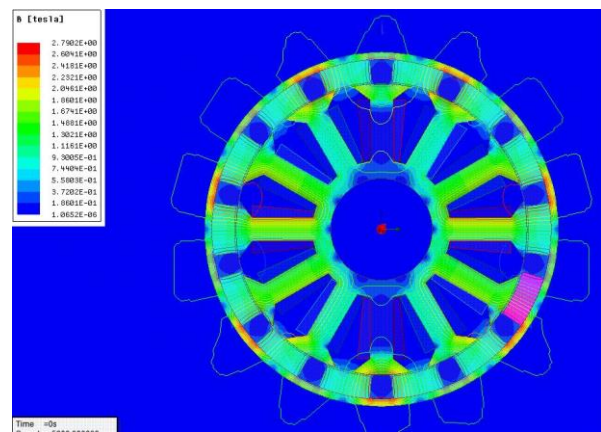


Figura 8 - Densidade de fluxo no instante  $t=0$ s.

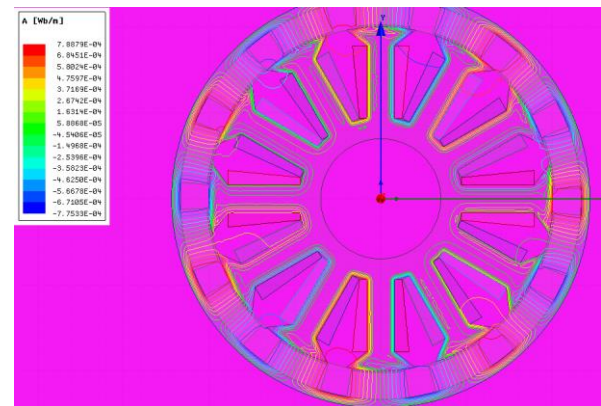


Figura 9 - Linhas de campo no instante  $t=0$ .

### IV. CONCLUSÕES

Através da simulação foi possível observar que a máquina completou 360 graus com pouco menos de 8 ciclos de corrente, sem oscilação de velocidade. Ao observar a curva de torque também é possível notar que a oscilação de torque também é bem reduzida, principalmente devido ao arranjo ranhuras-polo de 12-14. Entretanto, devido ao fato da simulação não levar em consideração o controle inerente do inversor, a tensão resultante das correntes impostas não teve nenhum limite, o que a levou a picos de quase 300 V.

Através dos métodos apresentados, é possível traçar a curva de torque x velocidade da máquina para qualquer situação de carga e velocidade. Basta mudar a frequência das correntes impostas para variar a velocidade e por fim, variar a amplitude das correntes impostas para variar a carga mecânica acoplada.

Por meio da comparação dos resultados obtidos nesta simulação com ensaios em curto e a vazio da máquina, é possível determinar a precisão da simulação, cabendo a análise da necessidade da simulação 3-D do mesmo modelo.

A partir da inserção da modelagem do inversor neste modelo, pode ser possível analisar o comportamento da máquina frente a diferentes carregamentos, bem como uma possível otimização da geometria dada uma carga específica.

## V. REFERENCES

- [1] D. F. Silva, *Dimensionamento de conjunto propulsor para barco movido à energia solar.*, Niterói: UFF, 2015.
- [2] G. H. Jang, J. H. Chang, D. P. Hong and K. S. Kim, "Finite-Element Analysis of an Electromechanical Field of a BLDC Motor Considering Speed Control and Mechanical Flexibility," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, Março 2002.
- [3] C. C. Chan, "Novel Permanent Magnet Motor Drives for Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 331-339, 1996.
- [4] K. T. Chau, "Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vols. 2246-57, Junho 2008.
- [5] D. C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, 1<sup>a</sup> ed., New York: Mcgraw-Hill, 1994.
- [6] T. J. E. Miller and J. R. Hendershot Jr, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, 1<sup>a</sup> ed., Oxford: Magna Physics Publications, 1994.