

# Análise e Dimensionamento de Motores Elétricos

Murilo Paiva Pereira<sup>1</sup>, Milene Galeti<sup>1</sup>, André Luiz Perin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Universitário FEI  
[uniempereira@fei.edu.br](mailto:uniempereira@fei.edu.br), [andreperin@fei.edu.br](mailto:andreperin@fei.edu.br)

**Resumo:** Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa da eficiência e aplicabilidade de duas arquiteturas diferentes de motores elétricos. A primeira arquitetura compreende um motor de indução, enquanto a segunda envolve um motor de relutância, ambos trifásicos. As análises dos diferentes designs foram realizadas por meio de simulações numéricas, utilizando como ferramenta o software Ansys Electronics. Parâmetros como torque, rendimento e corrente elétrica foram extraídos para verificar a influência do rotor no desempenho dos motores de relutância. Observou-se a influência da corrente, das indutâncias e do entreferro no rendimento da máquina.

## 1. Introdução

As máquinas elétricas têm sido fundamentais em aplicações industriais desde sua invenção no século XIX. Nomes como Michael Faraday e Nikola Tesla foram responsáveis por desenvolver os fundamentos e criação das primeiras máquinas elétricas [1]. Inicialmente, devido à tecnologia limitada, as máquinas de indução foram as primeiras a serem utilizadas. Essas máquinas operam com base no princípio da força gerada pela interação entre o campo magnético produzido pelas bobinas do estator e a corrente induzida no rotor. [2]

Avanços tecnológicos levaram à introdução de novas arquiteturas de máquinas elétricas, cada uma com vantagens e desvantagens distintas. Um desses modelos é a máquina síncrona de relutância. Seu princípio de funcionamento está diretamente ligado a variação da relutância no circuito magnético da máquina, ocasionado pela geometria do rotor [3]. O movimento rotativo desses dispositivos é gerado pela tendência do fluxo magnético de atravessar as seções transversais que apresentarem menor relutância. Sendo assim, o rotor é projetado de forma que apresente eixos denominados direto e de quadratura. O primeiro apresenta uma relutância magnética significativamente menor do que o segundo. Dessa forma, na presença do campo magnético gerado pelo estator, o rotor sofrerá torque no sentido do alinhamento. Assim o rotor entra em movimento, tendo em vista a natureza rotativa do campo magnético.

Apesar da versatilidade de ambos, essas máquinas possuem algumas desvantagens que podem ser cruciais para certas aplicações. No caso dos motores de indução, a corrente induzida no rotor gera calor por efeito Joule, podendo contribuir no aumento de temperatura de determinado sistema. Já os motores de relutância necessitam da eletrônica de potência para partir, aumentando o custo associado à máquina.

Este estudo tem como finalidade realizar uma análise comparativa do desempenho de ambos os motores. Para isso, foram realizadas simulações baseadas no método de elementos finitos, que

possibilitaram a análise considerando a diferença de geometria dos designs estudados.

## 2. Modelos e Simulação

O motor de indução foi escolhido como a máquina de referência para este estudo e é baseada em um modelo comercial disponível no mercado, com o intuito de guiar os parâmetros básicos utilizados na simulação. Este motor possui um rotor em gaiola de esquilo e um estator trifásico. Uma vez que os parâmetros iniciais, apresentados na Tabela I, foram definidos, um modelo de motor de indução no software Maxwell (Ansys) foi gerado, como mostrado na figura 1 [4].

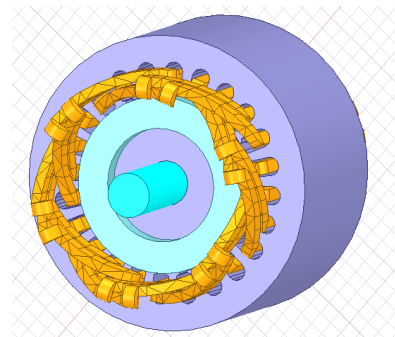


Figura 1 – Modelo de motor de indução trifásico 3D.

Tabela I – Dados de placa

Parâmetro	Valor
Número de Polos	4
Velocidade Síncrona	1800 RPM
Velocidade Nominal	1720 RPM
Potência Mecânica	0.33 HP
Tensão Nominal	380 V
Corrente Nominal	0.8 A
Frequência	60 Hz

Em seguida, a simulação desenvolvida para o motor de relutância apresenta todos os parâmetros básicos do estator idênticos ao motor de indução utilizado como referência. A única distinção entre os dois motores está no projeto do rotor. Conseqüentemente, o próximo passo envolveu a definição de uma arquitetura de rotor que demonstrasse desempenho equivalente, e o desenvolvimento de cinco modelos adicionais para compreender os efeitos de diferentes designs, incorporando variações no tamanho, quantidade e configurações das barreiras de fluxo. Possibilitando avaliar a influência de cada parâmetro no desempenho da máquina.

A partir dos parâmetros variáveis do design do rotor, seis rotores de relutância foram modelados. Assim, os sete modelos selecionados para análise foram: um rotor de indução com gaiola de esquilo (a) e seis rotores de relutância com diferentes arquiteturas (b, c, d, e, f, g), conforme mostrado na figura 2.

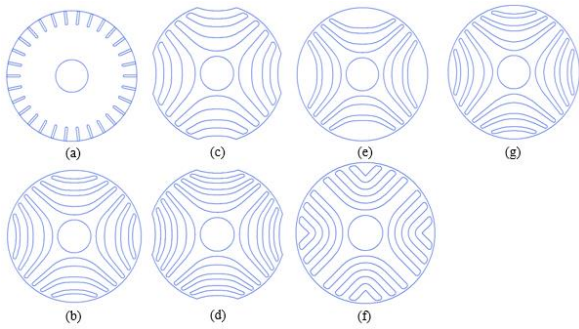


Figura 2 – (a) Rotor de indução; (b) Rotor de relutância referênciã; (c) Rotor de relutância com barreiras maiores; (d) Rotor de relutância com quatro barreiras; (e) Rotor de relutância com duas barreiras; (f) Rotor de Relutância com Poli-linha Concêntrica; (g) Rotor de Relutância com Curva Hiperbólica.

### 3. Resultados

Os parâmetros essenciais para análise, como torque, corrente, índice de saliência e rendimento do motor, foram escolhidos a fim de avaliar e comparar o comportamento da máquina, considerando os diferentes designs. Para padronizar a avaliação, o rendimento foi calculado de acordo com a equação (1) para facilitar a análise de motores com diferentes parâmetros[5].

$$\text{rendimento} = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \quad (1)$$

Além disso, o índice de saliência demonstra a importância do projeto do rotor no desempenho. Rotores com maior disparidade de indutância entre os eixos exibem maior fator de saliência e torque [5], como mostra a equação (2):

$$T = \frac{3}{2} p (\xi - 1) * \left( \frac{E_m}{\omega * L_{dm}} \right)^2 \sin(2\delta) \quad (2)$$

A equação para calcular o torque (T) considera vários parâmetros, incluindo índice de saliência ( $\xi$ ), ângulo da corrente ( $\delta$ ), número de pares de polos (p), tensão de magnetização ( $E_m$ ), velocidade angular ( $\omega$ ) e indutância no eixo direto ( $L_{dm}$ ). A Tabela II apresenta os dados extraídos de cada simulação feita, possibilitando realizar a análise das performances de cada máquina.

Tabela II – Resultados da simulação

	Corrente (A)	Torque (Nm)	Índice de Saliência	Rendimento (%)
(c)	1,98	3,96	6,8	69,48
(d)	1,97	3,83	6,54	67,6
(f)	1,77	3,45	5,48	71,76
(b)	1,57	3,17	4,91	74,56
(g)	1,56	3,17	4,89	74,56
(e)	1,43	2,55	3,78	70,22
(a)	0,72	1,34	-	78,49

A partir desses valores, foi possível notar que máquinas mais eficientes mostraram menores perdas nos enrolamentos, indicando maior conversão de energia elétrica em mecânica, como pode ser visto na Figura 3. O motor (a) teve menor torque, seguido pelo motor (e), já os motores (c) e (d) apresentaram os torques mais altos.

Analisando a influência das indutâncias direta  $L_{dm}$ , de quadratura  $L_{qm}$  e da corrente de magnetização  $I_m$  no índice de saliência (3), entende-se como esse parâmetro afeta o torque da máquina. [5]

$$\xi = \frac{L_{dm} * I_m}{L_{qm}} \quad (3)$$

A partir dessa relação. Nota-se que com a tensão fixa, apenas a corrente e a arquitetura do rotor podem variar a potência mecânica. Em resumo, tanto o aumento da corrente quanto o aumento da diferença entre as indutâncias interferem na potência de saída do motor.

Assim, analisar a eficiência é crucial, pois o índice de saliência influencia diretamente o torque. Apesar de (a) ter o menor torque, é o mais eficiente entre os sete modelos. Logo em seguida, (b) é o segundo mais eficiente e com o quarto maior torque. Além disso, os menores rendimentos são (c) e (d), mesmo sendo ambos respectivamente os motores com maior torque, devido a corrente elevada exigida pelos motores, gerando maiores perdas por efeito Joule.

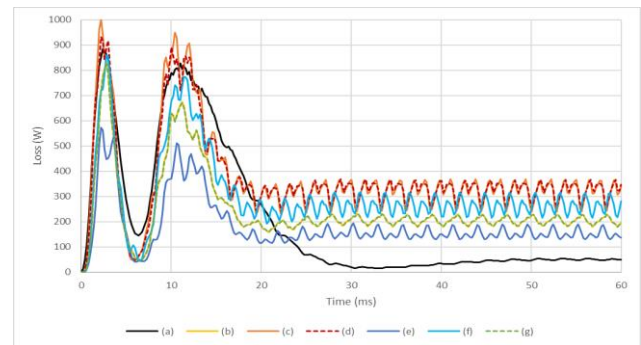


Figura 3 – Perdas por efeito Joule nos enrolamentos durante o funcionamento das máquinas.

### 4. Conclusões

Considerando todas as análises apresentadas, é possível discutir as implicações dos resultados das simulações para o futuro projeto de motores de relutância. Primeiramente fica evidente que garantir o maior torque não necessariamente resulta em maior rendimento. É de crucial importância garantir otimização do rotor e estator, de forma que a menor corrente possível seja gerada juntamente com um alto índice de saliência.

Em conclusão, essas considerações oferecem insights valiosos para o desenvolvimento de projetos de motores de relutância mais eficientes e avançados no futuro.

### 5. Referências

- [1] B. M. Notaros, *Eletromagnetismo*. Boston: Pearson, 2011.
- [2] Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, *Motor de Indução*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no. 33. 2016.
- [3] C. E. G. Martins, *Motores Síncronos de Relutância com Barreira de Fluxo e Partida Assíncrona*. no. 109, pp. 5-24, Aug. 2003.
- [4] R. M. L. R. Branco, *Modelação e Simulação de Motores Síncronos de Relutância*. no. 106. Mar. 2015.
- [5] S. D. Umans, *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. MGH, 2014

### Agradecimentos

Murilo Pereira agradece à instituição Centro Universitário FEI pelo apoio para a realização deste trabalho.

<sup>1</sup> Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto com vigência de 02/2023 a 01/2024.