

# Laboratório de CEME - Lab 3

## Simulação de de máquina elétrica rotativa

Cleiton M. Freitas

### 1 Objetivo

O objetivo desta experiência é analisar o funcionamento de uma máquinas elétrica rotativa a partir de suas equações de fluxo concatenado. Diferentemente dos laboratórios anteriores, a análise conduzida será voltada para a condição de regime permanente.

### 2 Máquina Rotativa Analisada

A máquina elétrica analisada neste semana é conhecida como máquina síncrona. O termo síncrona indica que, para o devido funcionamento dela, deve haver sincronia entre a frequência mecânica de rotação do rotor e a frequência elétrica das tensões e correntes no estator. Além disso, a máquina síncrona possui uma bobina no rotor e esta é alimentada com corrente contínua para produzir o campo magnético principal da máquina <sup>1</sup>. A Figura 1 apresenta a vista frontal de uma máquina síncrona com três bobinas do estator, uma para cada fase, e uma bobina no rotor.

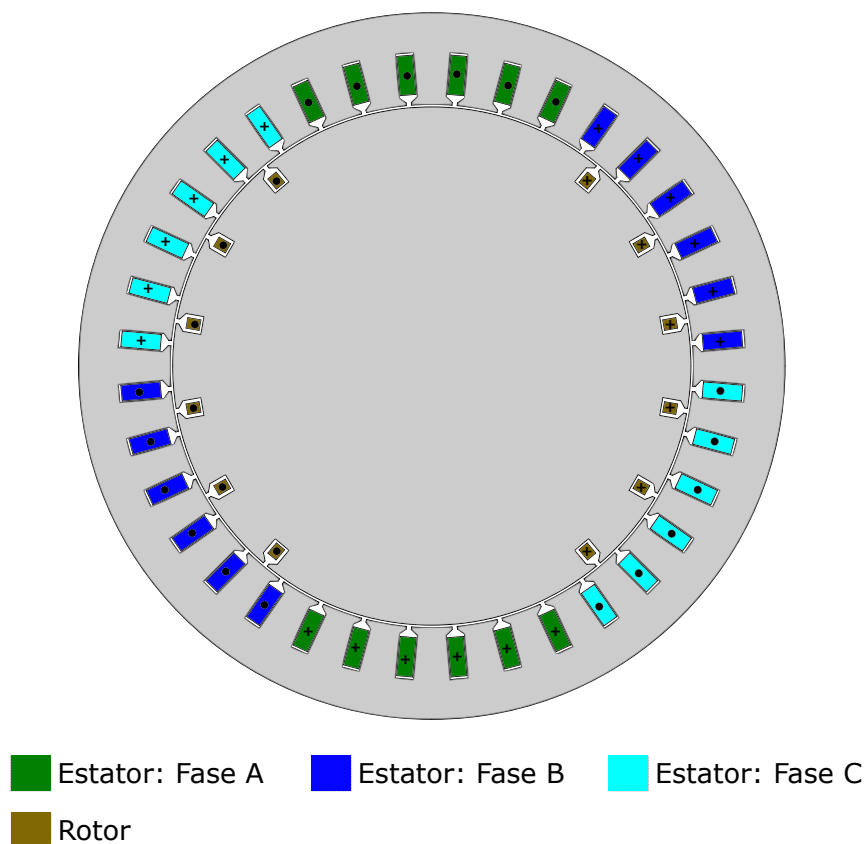


Figura 1: Máquina síncrona de dois polos

<sup>1</sup>Máquinas reais também podem conter outros enrolamentos, chamados de enrolamentos amortecedores, não considerados aqui

A máquina da Figura 1 poder ser descrita pelo seguinte conjunto de equações de fluxo concatenado:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a(t) \\ \lambda_b(t) \\ \lambda_c(t) \\ \lambda_f(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ L_{da} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \\ i_f(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde os subscritos  $a$ ,  $b$  e  $c$  indicam grandezas referentes as bobinas do estator, enquanto que  $f$  indica grandezas relativas a bobina do rotor <sup>2</sup>.

### 3 Dados do Problema

A Tabela 1 contem os dados construtivos da máquina indicada na Figura 1. Este parâmetros, no entanto, são irrelevantes para as análises que realizaremos.

Tabela 1: Parâmetros da máquina rotativa analisada

Parâmetro	Símbolo	Valor
Distância do Entreferro	$g$	$1mm$
Raio do Rotor	$r$	$9.9cm$
Profundidade	$P$	$15cm$
Número de Espiras por Fase do Estator	$N_s$	$72$
Número de Espiras do Rotor	$N_r$	$180$
Corrente Nominal das Bobinas do Estator	$I_s$	$8A_p$
Corrente Nominal das Bobinas do Rotor	$I_r$	$2A_p$
Velocidade Nominal da Máquina	$N$	$3600RPM$

Com ajuda de um programa voltado para simulação eletromagnética da máquina, o FEMM, foram obtidas as seguintes indutâncias para a máquina:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = 0.063H \quad (2)$$

$$L_{ff} = 0.449H \quad (3)$$

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{bc} = -0.027H \quad (4)$$

$$L_{af} = 0.129 \sin(\theta + 1.57)H \quad (5)$$

$$L_{bf} = 0.129 \sin(\theta - 0.524)H \quad (6)$$

$$L_{cf} = 0.129 \sin(\theta - 2.618)H \quad (7)$$

onde  $\theta$  é a posição do rotor da máquina medida em radianos.

### 4 Atividades preliminares

Considerando as equações de fluxo concatenado, obtenha:

- As equações para as tensões induzidas de todas as bobinas da máquina
- O torque eletromagnético em função das correntes e da posição do rotor

<sup>2</sup>A bobina do rotor é chamada de bobina de campo, por isso o  $f$  de *field* geralmente utilizado em livros de máquinas elétricas

## 5 Casos Teste: Tensão Induzida

As próximas subseções apresentam os casos testes que devem ser simulados usando o Google Colab.

### 5.1 Tensão induzida: máquina em vazio 1

Considerando que:

- As bobinas do estator estão em vazio (em circuito aberto);
- A bobina do rotor é alimentada com 2A CC;
- A máquina é mantida girando a 3600RPM;

1. Plote as tensões induzidas das bobinas
2. A partir dos resultados, determine a frequência e a amplitude das tensões induzidas.

### 5.2 Tensão induzida: máquina em vazio 2

Repita o caso anterior considerando que a velocidade de rotação é 3200RPM.

### 5.3 Tensão induzida: plena carga 1

Considerando que

- As bobinas do estator conduzem correntes:

$$i_a = 8 \sin(120\pi t - \pi/6) \quad (8)$$

$$i_b = 8 \sin(120\pi t - \pi/6 - 2\pi/3) \quad (9)$$

$$i_c = 8 \sin(120\pi t - \pi/6 + 2\pi/3) \quad (10)$$

- A bobina do rotor é alimentada com 2A CC;
- A máquina é mantida girando a 3600RPM;

1. Plote as tensões induzidas das bobinas
2. A partir dos resultados, determine a frequência e a amplitude das tensões induzidas.
3. A partir dos resultados de tensão e corrente, compute a potência instantânea trifásica das bobinas do estator

### 5.4 Tensão induzida: plena carga 1

Repita o caso anterior considerando que a velocidade de rotação é 3200RPM.

## 6 Casos Teste: Torque

Utilizando scripts no Google Colab, compute e plote o torque desenvolvido pela máquina nas seguintes condições.

### 6.1 Torque: plena carga 1

Considerando que

- As bobinas do estator conduzem correntes:

$$i_a = 8 \sin(120\pi t - \pi/6) \quad (11)$$

$$i_b = 8 \sin(120\pi t - \pi/6 - 2\pi/3) \quad (12)$$

$$i_c = 8 \sin(120\pi t - \pi/6 + 2\pi/3) \quad (13)$$

- A bobina do rotor é alimentada com 2A CC;
- A máquina é mantida girando a 3600RPM;

## 6.2 Torque: plena carga 2

Repita o caso anterior , mas desta vez considerando que a máquina gira a 3200RPM

## 6.3 Torque: monofásico

- As bobinas do estator conduzem correntes:

$$i_a = 8 \sin(120\pi t - \pi/6) \quad (14)$$

$$i_b = 0 \quad (15)$$

$$i_c = 0 \quad (16)$$

- A bobina do rotor é alimentada com 2A CC;
- A máquina é mantida girando a 3600RPM;

## 7 Relatório

Além dos gráficos, o relatório deverá conter uma análise detalhada dos resultados envolvendo:

- Explicação dos resultados
- Comparação entre os diferentes casos