

## MÁQUINAS ELÉTRICAS – ATIVIDADE 8

### ENSAIOS EM PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Alunos do Grupo:

---



---



---



---

Data de entrega da Atividade:

- Até 22/10/2019: nota plena
- Até 29/10/2019: nota ajustada por um fator 0,7
- Após 29/10/2019: nota ajustada por um fator 0,5

Objetivos:

- Realizar ensaios em motor de indução trifásico para levantar os parâmetros do circuito equivalente

Material:

- Motor de indução trifásico com rotor em gaiola
- Fonte Variável CA Trifásica e CC
- Medidor de grandezas elétricas (potência, corrente e tensão)
- Tacômetro

### Resumo teórico

O circuito equivalente de um motor de indução trifásico é uma poderosa ferramenta para avaliar o comportamento do motor em função da variação da carga. Entretanto, nem sempre se conhece os valores dos parâmetros do circuito equivalente do motor. Todavia, estes valores podem ser obtidos através da realização de uma série de ensaios no motor de indução, cujo fundamento e detalhamento são descritos pela norma 112 da IEEE. Nos tópicos seguintes, apresenta-se o princípio destes ensaios.

#### Circuito Equivalente de um Motor de Indução

O motor elétrico de indução é um conversor eletromecânico de energia que converte parte da energia elétrica recebida da rede de energia em energia mecânica disponível no seu eixo.

A diferença entre a energia elétrica entregue ao motor e a energia mecânica disponível em seu eixo constituem as perdas que ocorrem no processo de conversão de energia. Essas perdas podem ser classificadas em:

- perdas Joule ( $r \times I^2$ ): ocorrem em função da circulação de corrente elétrica nos enrolamentos do estator e do rotor do motor;
- perdas no material ferromagnético: são as perdas que ocorrem em função da Histerese (magnetização e desmagnetização do material) e, também, em função da circulação de correntes parasitas de Foucault;
- perdas mecânicas: são perdas que estão associadas com o atrito que ocorre nos enrolamentos e com o ar, além da parcela de conjugado necessária para a ventilação do próprio motor.

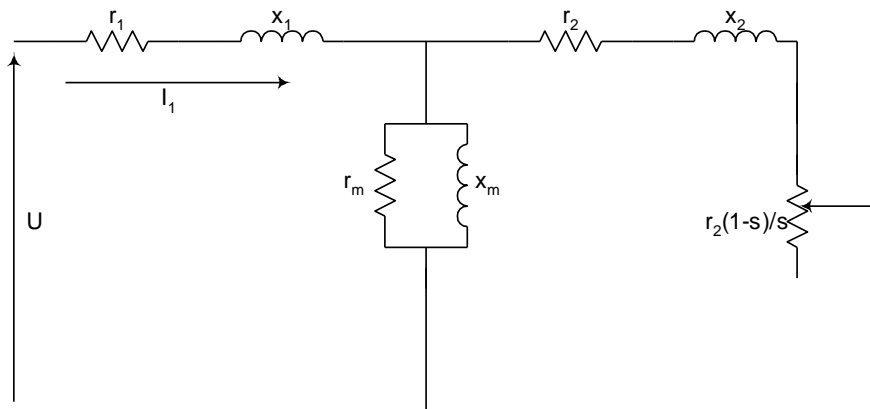
O rendimento do motor de indução é determinado por:

$$\eta = \frac{P_{\text{Mecânica}}}{P_{\text{Elétrica}}} \Rightarrow \eta = \frac{P_{\text{Elétrica}} - (Perdas_{\text{Joule}} + Perdas_{\text{Ferro}} + Perdas_{\text{Mecânicas}})}{P_{\text{Elétrica}}}$$

Máquinas de indução de pequeno porte (da ordem de dezenas de HP) apresentam rendimentos na faixa de 70 a 85%, nas condições nominais de operação. Máquinas de maior porte podem atingir rendimentos consideráveis (até 95%), evidenciando a importância dos motores de indução nos acionamentos elétricos industriais. Tais qualidades são acompanhadas de uma robustez mecânica considerável e de um custo relativamente baixo.

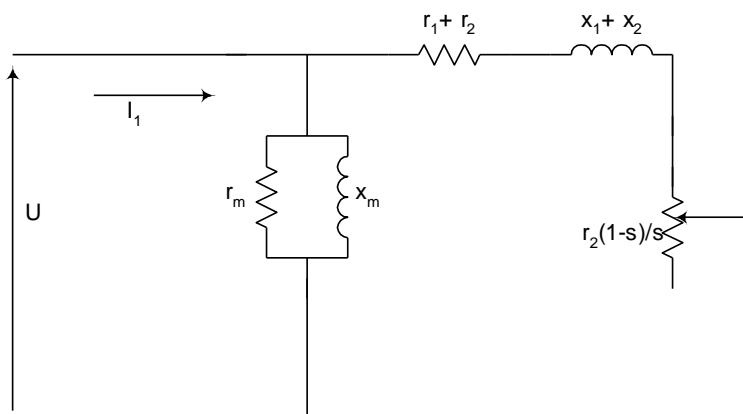
Um motor de indução pode ser representado por um circuito elétrico equivalente. Esse circuito é bastante útil para se avaliar o desempenho do motor em diferentes situações de acionamento. A Figura 1 apresenta o circuito elétrico equivalente de um motor de indução por fase.

**Figura 1: Circuito elétrico equivalente de um motor de indução por fase.**



Avaliando o circuito da Figura 1, observa-se que o escorregamento (em última análise a carga acionada) tem uma característica fundamental no comportamento da máquina assíncrona. Para facilitar a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente, é usual considerar que o fluxo da máquina é determinado apenas pela tensão de alimentação. Este modelo é denominado de circuito equivalente a fluxo constante, sendo representado como na Figura 2.

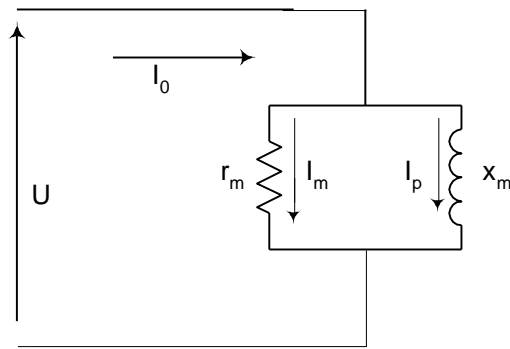
**Figura 2: Circuito equivalente de um motor de indução considerando fluxo constante.**



A partir desse modelo, pode-se determinar os parâmetros do circuito equivalente a partir dos ensaios em vazio e de rotor bloqueado.

#### Ensaio em vazio.

No ensaio em vazio o motor é conectado à rede elétrica, a tensão nominal, e posto a girar sem carga no seu eixo. A velocidade de seu eixo será próxima à velocidade síncrona do campo girante, ou seja, seu escorregamento será próximo de zero. Isso faz com que a impedância do ramo direto da Figura 2 tenda a infinito, não interferindo no funcionamento do motor em vazio. Assim o circuito equivalente fica reduzido ao mostrado na Figura 3:

**Figura 3: Circuito equivalente do motor de indução durante o ensaio em vazio.**

A partir do circuito da Figura 3 pode-se determinar os valores do ramo magnetizante do motor de indução pelas relações:

$$r_m = \frac{U_f^2}{P_{of}}; \quad I_{mf} = \frac{U_f}{r_m}; \quad I_{pf} = \sqrt{I_{of}^2 - I_{mf}^2}; \quad X_m = \frac{U_f}{I_{pf}}$$

Sendo:

$r_m$  = resistência do ramo de magnetização, por fase, do circuito equivalente do motor de indução [ $\Omega$ ];

$x_m$  = reatância do ramo de magnetização, por fase, do circuito equivalente do motor de indução [ $\Omega$ ];

$I_{of}$  = corrente em vazio, por fase, do motor de indução [A];

$I_{mf}$  = parcela da corrente em vazio, por fase, que percorre a resistência de magnetização [A].

$I_{pf}$  = parcela da corrente em vazio, por fase, que percorre a reatância de magnetização [A].

$U_f$  = tensão, por fase, aplicada ao estator do motor [V];

$P_{of}$  = potência elétrica, por fase, do motor em vazio [W].

No ensaio em vazio, a potência de entrada medida pelos instrumentos deve ser igual às perdas do motor. As perdas no cobre do rotor são desprezíveis porque a corrente  $I_2$  é extremamente pequena [devido à elevada resistência de carga  $R_2(1 \text{ s/s})$ ]; portanto, elas podem ser ignoradas. As perdas no cobre do estator são dadas por:

$$\Delta P_{Estator} = 3 * I_{of}^2 * R_1$$

Sendo:

$\Delta P_{Estator}$  = perdas no cobre do estator [W];

$x_m$  = reatância do ramo de magnetização, por fase, do circuito equivalente do motor de indução [ $\Omega$ ];

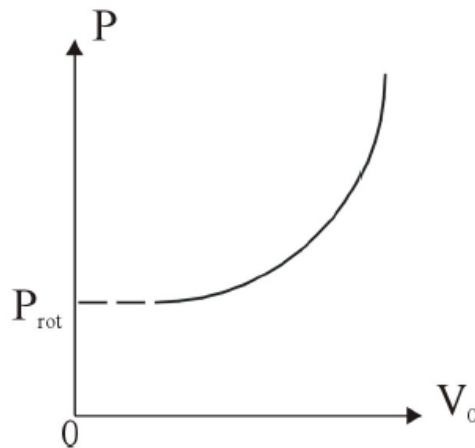
$I_{of}$  = corrente em vazio, por fase, do motor de indução [A];

$R_1$  = resistência do estator, por fase [ $\Omega$ ].

Assim, a potência medida no ensaio em vazio é constituída pelas seguintes parcelas:

$$P_o = \Delta P_{Estator} + \Delta P_{Núcleo} + \Delta P_{Mecânicas}$$

As perdas mecânicas também são conhecidas como perdas rotacionais, constituídas por perdas por atrito, ventilação e as chamadas perdas suplementares, sendo que através do ensaio em vazio essas perdas também podem ser obtidas. Para isso, toma-se valores de tensão e potência medidos até o momento em que a corrente começa a aumentar. Com esses dados pode-se construir um gráfico similar ao mostrado na Figura 4.

**Figura 4: Gráfico  $P_o$  x  $V_o$  – Obtenção de  $\Delta P_{Mecânicas}$** 

Extrapolam-se a curva do gráfico da Figura 4 até que se cruze o eixo da potência. Este ponto corresponde ao valor das perdas mecânicas ou rotacionais. Desta forma as perdas no núcleo podem ser determinadas por:

$$\Delta P_{Núcleo} = P_o - (\Delta P_{Estator} + \Delta P_{Mecânicas})$$

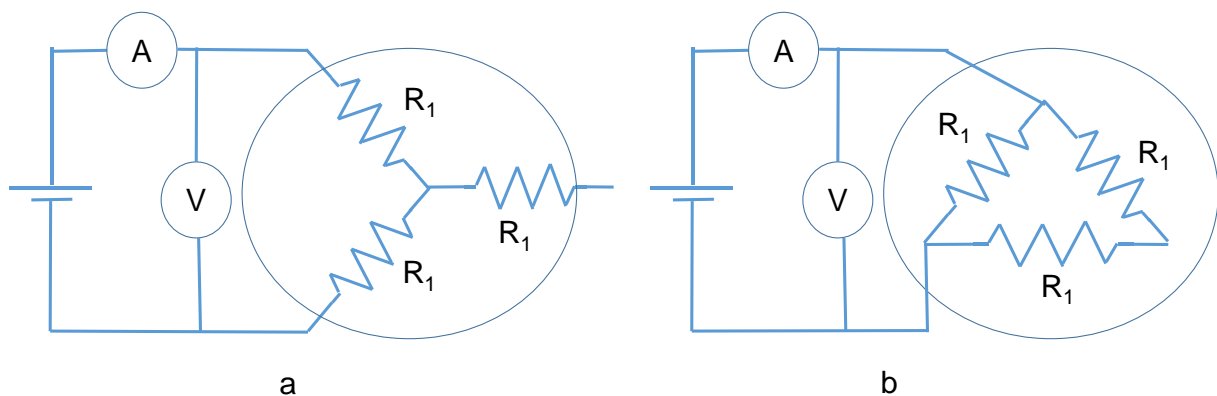
$$\Delta P_{Núcleo} = P_o - (3 * I_{of}^2 * R_1 + \Delta P_{Mecânicas})$$

$R_1$  pode ser obtido a partir do ensaio de corrente contínua descrito a seguir

#### Ensaio de Corrente Contínua

Neste ensaio aplica-se uma tensão contínua no motor de indução. Como a corrente é contínua, não há tensão induzida no rotor e as reatâncias do estator e do rotor são nulas. Desta forma, a única grandeza que limita o fluxo de potência no motor é a resistência do estator que pode ser determinada pela aplicação da Lei de Ohm.

A Figura 5 apresenta dois circuitos básicos para a realização do ensaio de corrente contínua, sendo que na Figura 5(a) o motor está ligado em estrela e na Figura 5(b) o motor está ligado em triângulo.

**Figura 5: Circuito utilizado para Ensaio de Corrente Contínua**

Para os dois casos:

$$R_{eq} = \frac{V}{I}$$

Sendo:

$R_{eq}$  = resistência equivalente obtida no ensaio [ $\Omega$ ]

$V$ : tensão contínua aplicada ao ensaio [V]

$I$ : corrente contínua aplicada ao ensaio [A] – normalmente equivalente ao valor da corrente nominal do motor

Se o motor estiver ligado em estrela, o valor de  $R_1$  é obtido por:

$$R_{eq} = 2 * R_1 \Rightarrow R_1 = \frac{R_{eq}}{2} \Rightarrow R_1 = \frac{V}{2 * I}$$

Se o motor estiver ligado em triângulo, o valor de  $R_1$  é obtido por:

$$R_{eq} = \frac{2}{3} * R_1 \Rightarrow R_1 = \frac{3 * R_{eq}}{2} \Rightarrow R_1 = 3 * \frac{V}{2 * I}$$

Percebe-se que:

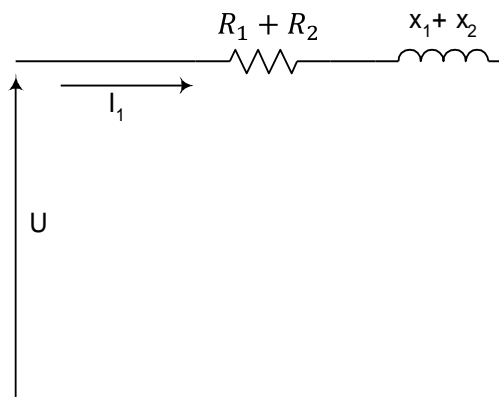
$$R_{1\Delta} = 3 * R_{1Y}$$

#### Ensaio de rotor bloqueado

O terceiro ensaio realizado em um motor de indução para determinar seus parâmetros é denominado de ensaio de rotor bloqueado ou de rotor travado, que corresponde ao ensaio de curto-circuito de transformadores. Neste ensaio, o rotor do motor é bloqueado ( $\omega_{rotor} = 0$ ) de modo que não possa se mover, sendo uma tensão aplicada ao motor e medidas as correntes e potência. Aplica-se uma tensão no estator de forma a obter-se a corrente nominal do motor.

Nestas condições, o escorregamento do motor tende a 1 de forma que a impedância do ramo de magnetização possa ser desconsiderada. A Figura 6 apresenta esquema do circuito elétrico equivalente durante ensaio de curto-circuito.

**Figura 6: Circuito equivalente do motor de indução durante o ensaio de curto-circuito.**



A partir da análise desse circuito e das medições realizadas pode-se determinar os demais parâmetros. Tem-se:

$$Z_{RB} = \frac{U_{ccf}}{I_{ccf}}; \quad R_1 + R_2 = \frac{P_{ccf}}{I_{ccf}^2}; \quad X_1 + X_2 = \sqrt{U_{ccf}^2 - (R_1 + R_2) I_{ccf}^2}$$

sendo:

$U_{ccf}$ : tensão, por fase, aplicada no ensaio de curto-circuito [V];

$P_{ccf}$  = potência de curto-circuito, por fase, do motor [W];

$I_{ccf}$  = corrente do ensaio de curto-circuito, por fase, do motor [A];

$I_N$  = corrente nominal aplicada ao estator de motor.

Com o valor de  $R_1$  obtido no ensaio de corrente contínua, obtém-se a resistência do rotor:

$$R_2 = (R_1 + R_2) - R_1$$

Os valores de  $x_1$  e  $x_2$  são mais difíceis de serem separados e é usual fazer-se  $x_1 = x_2$ .

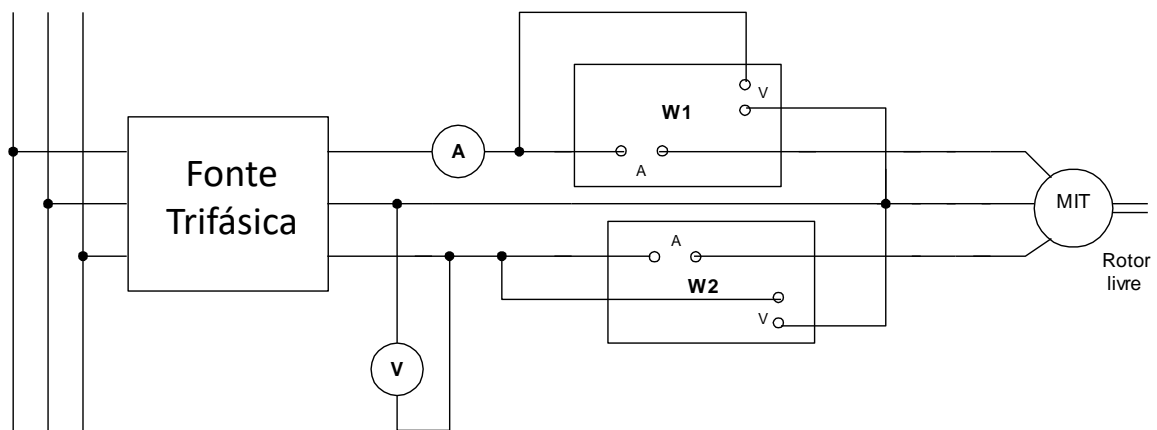
## PARTE PRÁTICA

Para a realização deste ensaio o motor de 4 polos estará ligado em  $\Delta$ , 220V.

### Ensaio em vazio.

Monte o circuito mostrado na Figura 7.

**Figura 7: Circuito para o ensaio em vazio do motor de indução.**



Inicialmente aplica-se 220 V, ou o valor mais próximo possível, e mede-se as correntes, a potência e a a velocidade do rotor, completando a primeira linha da Tabela 1.

A seguir, deve-se variar a tensão aplicada ao estator do motor até o momento que a corrente começar a aumentar e completar a Tabela 1 com os dados de medição solicitados.

Tabela 1: Dados do ensaio em vazio do motor de indução.

Valores Medidos									Valores Calculados		
U <sub>o</sub> Esperado [V]	U <sub>o</sub> Medido [V]	I <sub>Ro</sub> [A]	I <sub>so</sub> [A]	I <sub>to</sub> [A]	I <sub>o</sub> médio [A]	W <sub>1</sub> [W]	W <sub>2</sub> [W]	n [rpm]	P <sub>o</sub> [W]	Cos Φ <sub>o</sub>	s
220											
210											
190											
180											
170											
160											
150											
140											
130											
120											
110											
100											
90											
80											
70											
60											
50											
40											
30											
20											
10											

Com os dados obtidos na tensão nominal (**220 V – 1ª linha da tabela**) obtenha os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução ( $r_m$  e  $x_m$ ). Lembre que:

$$r_m = \frac{U_f^2}{P_{0f}}; \quad I_{mf} = \frac{U_f}{r_m}; \quad I_{pf} = \sqrt{I_{of}^2 - I_{mf}^2}; \quad X_m = \frac{U_f}{I_{pf}}$$

(espaço para cálculos)

$$r_m = \quad X_m =$$

Com os dados da Tabela 1, construa um gráfico similar ao da Figura 4. Extrapole a curva obtida e determine as perdas mecânicas do motor.

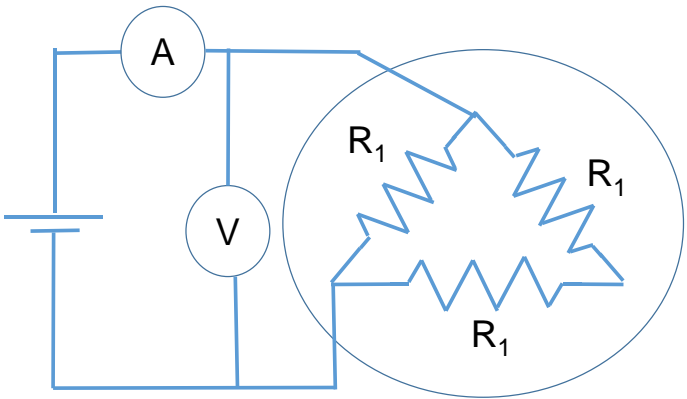


$$\Delta P_{Mecânicas} =$$



Ensaio de corrente-contínua

Monte o circuito mostrado na Figura 8.



Ajuste a tensão do circuito para se obter uma corrente equivalente à corrente nominal do motor (1,8 A). Calcule R1 e complete a Tabela 2.

Tabela 2: Dados Ensaio de Corrente Contínua

V <sub>CorrenteContínua</sub> [V]	I <sub>CorrenteContínua</sub> [A]	R <sub>1</sub> [Ω]

Lembre-se que para o motor ligado em triângulo:

$$R_1 = 3 * \frac{V}{2 * I}$$

Com os dados obtidos nos ensaios em vazio e de corrente contínua, determine as perdas no núcleo:

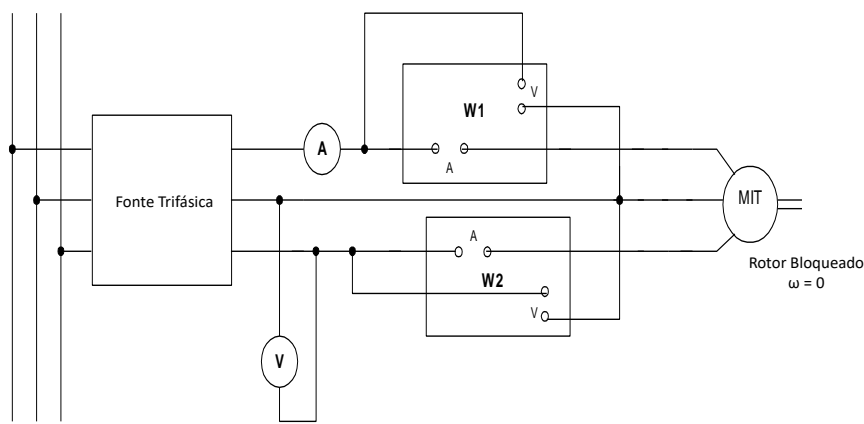
$$\Delta P_{Núcleo} = P_o - (3 * I_{of}^2 * R_1 + \Delta P_{Mecânicas})$$

$$\Delta P_{Núcleo} =$$

Ensaio de rotor bloqueado.

Monte o circuito mostrado na Figura 8.

Figura 6: Circuito para o ensaio do motor com rotor bloqueado.

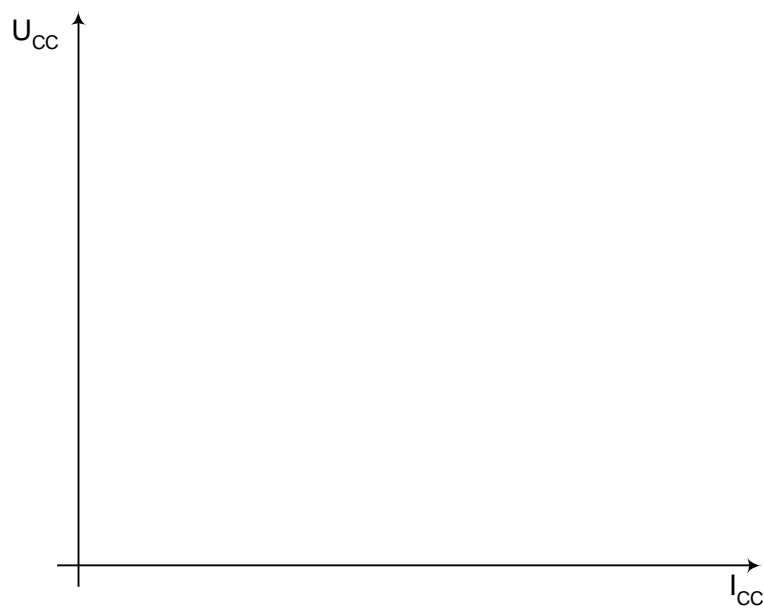


Com o rotor bloqueado, varie a tensão do estator do motor até se obter a corrente nominal (1,8 A) e meça  $U_{CC}$ ,  $I_{CC}$  e  $P_{CC}$  (grandezas de curto-circuito), preenchendo a tabela 2.

Tabela 3: Dados do ensaio do motor de indução com rotor bloqueado.

$U_{CC}$ [V]	$I_{CC}$ Desejado [A]	$I_{CC}$ Medido [A]	$P_{CC}$ [W]
	0,2		
	0,4		
	0,6		
	0,8		
	1,0		
	1,2		
	1,4		
	1,6		
	1,8		

A partir dos dados obtidos construa os gráficos:  $U_{CC}$  x  $I_{CC}$ ;  $P_{CC}$  x  $I_{CC}$





Com os dados obtidos para a corrente nominal (1,8 A) obtenha os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução ( $R_1 + r_2$ ;  $x_1 + x_2$ ). Com o dado de  $R_1$  determinado no ensaio de corrente contínua, determine o valor de  $R_2$ . Lembre que:

$$Z_{RB} = \frac{U_{ccf}}{I_{ccf}}; \quad R_1 + R_2 = \frac{P_{ccf}}{I_{ccf}^2}; \quad X_1 + X_2 = \sqrt{U_{ccf}^2 - (R_1 + R_2)^2}$$

$$R_2 = (R_1 + R_2) - R_1$$

(espaço para cálculos)

$$Z_{RB} =$$

$$R_1 + R_2 =$$

$$X_1 + X_2 =$$

$$R_2 =$$

### Questões

- 1) Um motor de indução trifásico ligado em estrela apresenta os seguintes valores nominais:

$$P_N = 15 \text{ cv} \quad U_N = 220 \text{ V} \quad f_N = 60 \text{ Hz} \quad n_N = 1775 \text{ rpm}$$

Foram realizados ensaios em vazio e de curto-circuito nesse motor que apresentaram os seguintes resultados:

$$P_o = 1.160 \text{ [W]} \quad I_o = 15 \text{ [A]} \quad U_o = 220 \text{ V} \quad P_{cc} = 600 \text{ [W]} \quad U_{cc} = 10,5 \text{ [V]} \quad \Delta P_{\text{Mecânicas}} = 500 \text{ W}$$

A resistência ôhmica do estator do motor foi estimada em  $39 \text{ m}\Omega/\text{fase}$ . Determine os demais parâmetros do circuito e as perdas no núcleo deste motor.