

# **CEFET RJ - Centro Federal de Ensino Tecnológico Celso Suckow da Fonseca**

## **Laboratório de Máquinas Elétricas**

**Prof.: Luís Oscar de A. Porto Henriques**

### **Ensaio em Máquinas Assíncronas (Motor de Indução)**

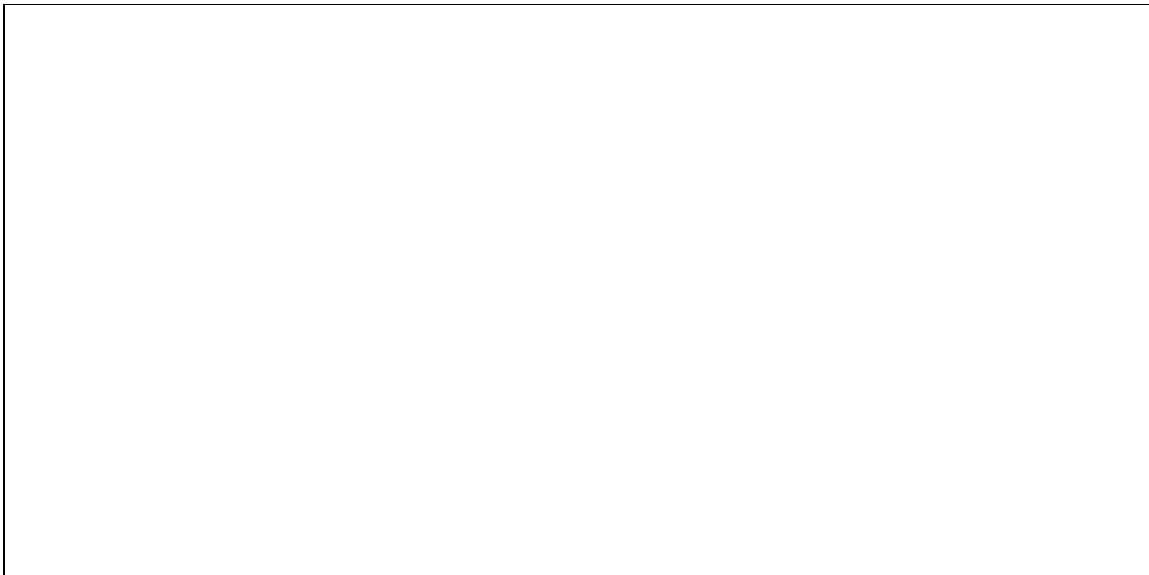
Objetivo: Determinar experimentalmente os parâmetros do circuito equivalente de uma máquina de indução. Para tal são realizados 3 ensaios:

- Ensaio de medida da resistência estatórica
- Ensaio de rotor bloqueado
- Ensaio a vazio

Existem alguns motivos que nos faz realizar ensaios nos motores:

- Verificação do desempenho do motor
- Determinação do torque ou do rendimento da máquina
- Avaliação das características da máquina

O circuito equivalente de um motor de indução trifásico é apresentado abaixo:



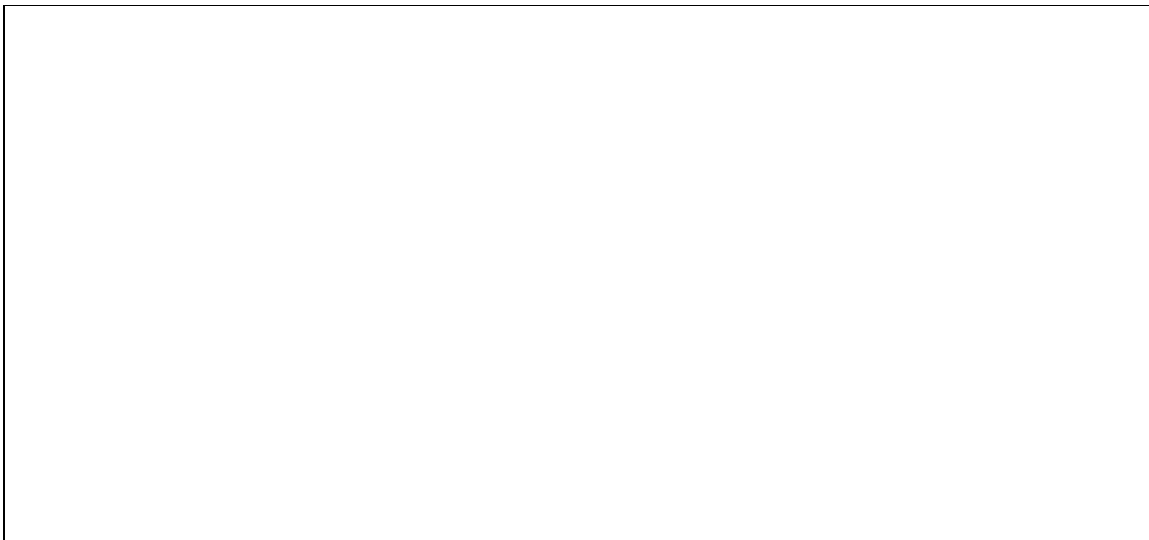
## Ensaio 1: Ensaio de Corrente Contínua

### a) Preparação:

Para a execução deste experimento precisamos de uma fonte de tensão contínua, um ohmímetro ou de um amperímetro e um voltímetro.

### b) Execução: Medição da resistência estatórica do motor.

Aplica-se uma tensão contínua em duas fases do estator com o rotor parado. Eleva-se esta tensão até um nível em que a corrente alcance o valor de corrente nominal apresentada na placa de dados do motor.



Leia o valor de corrente no amperímetro e o valor de tensão no voltímetro

Se o motor estiver em  $\Delta$ , teremos:  $R_{eq} = \frac{2}{3} R \Rightarrow R_{\Delta} = \frac{3}{2} \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$

Se o motor estiver em Y, teremos:  $R_{eq} = 2R \Rightarrow R_Y = 2 \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$

Complete o quadro abaixo:

$V_{dc}$	$I_{dc}$	R

## Ensaio 2: Ensaio à vazio

### a) Introdução teórica

De forma semelhante ao ensaio a vazio de um transformador, o ensaio em vazio de um motor de indução nos dá informações acerca da corrente de excitação e das perdas sem carga.

Como o próprio nome diz, trata-se de energizar a máquina assíncrona operando como motor, sem carga mecânica acoplada a seu eixo, sob tensão e frequência nominais, e realizar medições de tensão aplicada, corrente circulante e potência ativa consumida nesta condição. A partir destas medições é possível quantificar a impedância equivalente do motor na condição de vazio.

Sem carga, as correntes no rotor assumem somente um valor pequeno necessário para produzir torque eletromagnético suficiente para vencer os torques de atrito e ventilação. Nesta situação, as perdas no cobre do rotor são muito pequenas e podem ser desprezadas. Por outro lado, as perdas no cobre do estator são consideráveis devido a razoável corrente de magnetização circulante. Subtraindo estas perdas no cobre do estator da potência ativa medida em vazio, pode-se obter um valor aproximado das perdas rotacionais ( $P_R$ ) equivalente as condições normais de operação.

$P_R = P_0 - 3I_0^2 R$ , sendo R, a resistência estatórica do motor (obtida pelo ensaio de corrente contínua)

Alternativamente, se durante o ensaio forem realizadas uma série de medições com tensão de alimentação variável, para cada medição medindo-se as corrente do estator e a potência de entrada, nestas condições, a potência de entrada pode ser considerada como a soma das perdas nos enrolamentos do estator, perdas no ferro e perdas mecânicas (devido ao atrito e ventilação)

$$P_0 = 3I_0^2 R + P_{fe} + P_{mec} = P_{cobre} + P_{fe} + P_{mec}$$



Uma vez que a resistência no estator é conhecida, pode-se diminuir as perdas no cobre das perdas medidas e obter-se a curva contendo apenas a soma das perdas mecânicas mais as perdas no ferro.

Extrapolando-se esta curva para a tensão zero, pode-se determinar as perdas mecânicas e as perdas no ferro.

A partir das medidas, podemos calcular a impedância  $Z_0$ , a resistência  $R_0$  e a reatância a vazio ( $X_0$ )

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0}$$

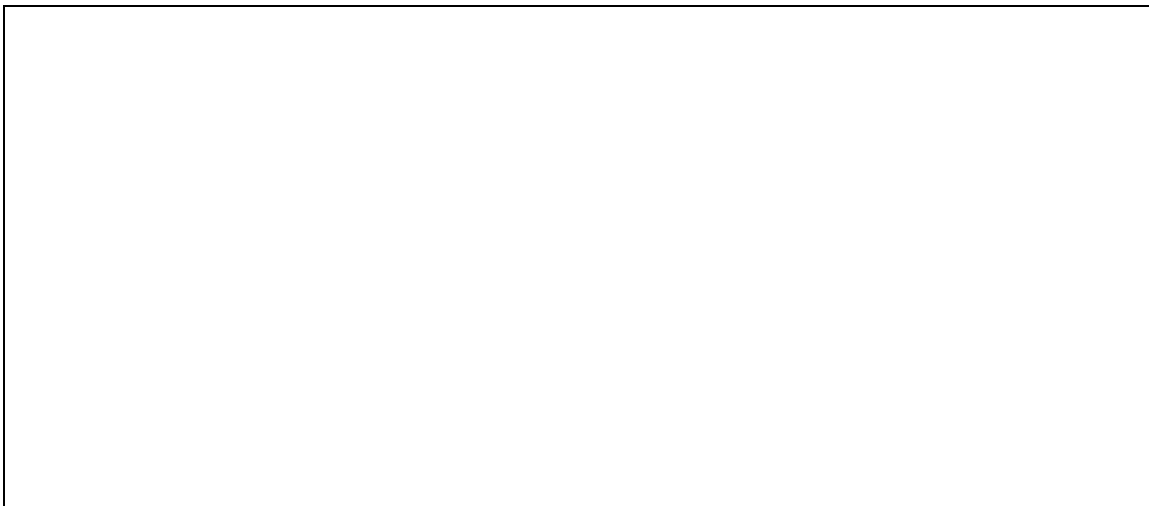
$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

Em função do escorregamento ser muito pequeno na situação a vazio ( $s \rightarrow 0$ ), a resistência do rotor refletida para o estator assume um valor muito grande. A combinação em paralelo do circuito do rotor e o braço magnetizante, nos gera um valor aproximadamente igual ao da reatância magnetizante.

#### b)Preparação:

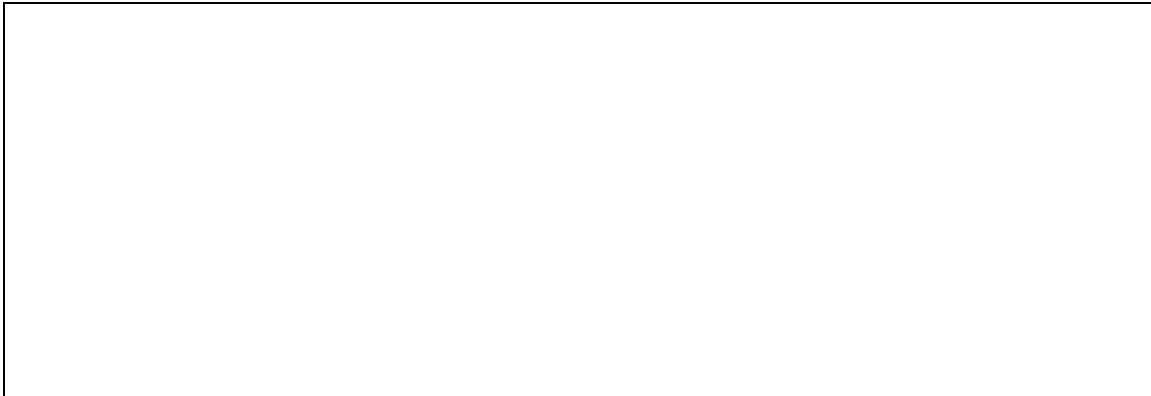
Para a execução desta experiência devemos usar: fonte de tensão trifásica senoidal, voltímetro, amperímetro e 2 wattímetros. O esquema de ligação é:



#### c)Execução:

De acordo com a montagem, mede-se a tensão aplicada, a corrente na fase e a potência consumida em W usando-se os 2 wattímetros.

O teste à vazio busca informações acerca do ramo magnetizante. Deixando-se o rotor livre ou solto. Dá-se partida do motor com tensão reduzida. Quando o motor está em regime, aplica-se a tensão nominal no estator ( ou até 125% da tensão nominal) de forma a obtermos um escorregamento pequeno ( próximo a zero). Isto faz com que  $R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)$  seja bem grande e este ramo tenha impedância muito grande. Assim o circuito será reduzido a:



Nesta condição, a potência consumida pelo motor será composta pelas perdas por efeito Joule no estator ( $P_{estator} = 3R_1 I_1^2$ ), as perdas no ferro ( considerada desprezível devido à corrente no rotor ser desprezível). Assim, os parâmetros  $R_m$  e  $X_m$  são:

$$R_m = \frac{V_0^2}{P_0} \text{ e } X_m = \frac{V_0^2}{\sqrt{V_0^2 I_0^2 - P_0^2}}$$

Completemos a tabela:

$V_0$	$I_0$	$W_1$	$W_2$	$P_0$

### Ensaio 3 : Ensaio de rotor bloqueado

#### a) Introdução teórica

O ensaio de rotor bloqueado (ou rotor travado) tem fundamentalmente os mesmos objetivos que o ensaio de curto-circuito de um transformador, ou seja, determinar as impedâncias série dos enrolamentos do estator e do rotor. Como característica construtiva de um motor de indução é diferente de um transformador, efeitos por exemplo, em sua impedância de dispersão podem ocorrer pela saturação magnética dos caminhos de fluxo disperso e pela frequência do rotor. A impedância de rotor bloqueado pode também ser afetada pela posição do rotor, embora este efeito seja pequeno no caso de motores com rotor em gaiola.

Sob ponto de vista de principio, recomenda-se que o ensaio de rotor bloqueado seja realizado em condições de corrente e frequência do rotor próximas dos valores encontrados no motor em operação.

Como o próprio nome especifica, trata-se de energizar a máquina assíncrona operando como motor, bloqueando mecanicamente o seu eixo, sob corrente nominal, tensão reduzida (10% a 20%) e frequência reduzida quanto possível.

Realiza-se medições de tensão aplicada, corrente circulante e potência ativa consumida nesta condição. A partir destas medidas é possível quantificar a impedância equivalente do motor na condição de rotor bloqueado.

Com base na medição, calcula-se a impedância de rotor bloqueado ( $Z_{rb}$ ), a resistência ( $R_{rb}$ ) e a reatância do rotor bloqueado ( $X_{rb}$ ).

$$Z_{rb} = \frac{V_{rb}}{I_{rb}}$$

$$R_{rb} = \frac{P_{rb}}{I_{rb}^2}$$

$$X_{rb} = \sqrt{Z_{rb}^2 - R_{rb}^2}$$

Como já foi dito, na situação de rotor bloqueado o escorregamento é unitário, e se a corrente magnetizante for desprezada, a reatância de rotor bloqueado ( $X_{rb}$ ) representa a reatância de dispersão do estator e do rotor adicionadas.

$$X_{rb} = X^{rotor} + X^{estator}$$

O comportamento dinâmico do motor é pouco afetado devido a como esta reatância está distribuída entre o estator e o rotor.

Segundo o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) podemos empiricamente distribuir os valores de  $X^{\text{rotor}}$  e  $X^{\text{estator}}$  da seguinte forma:

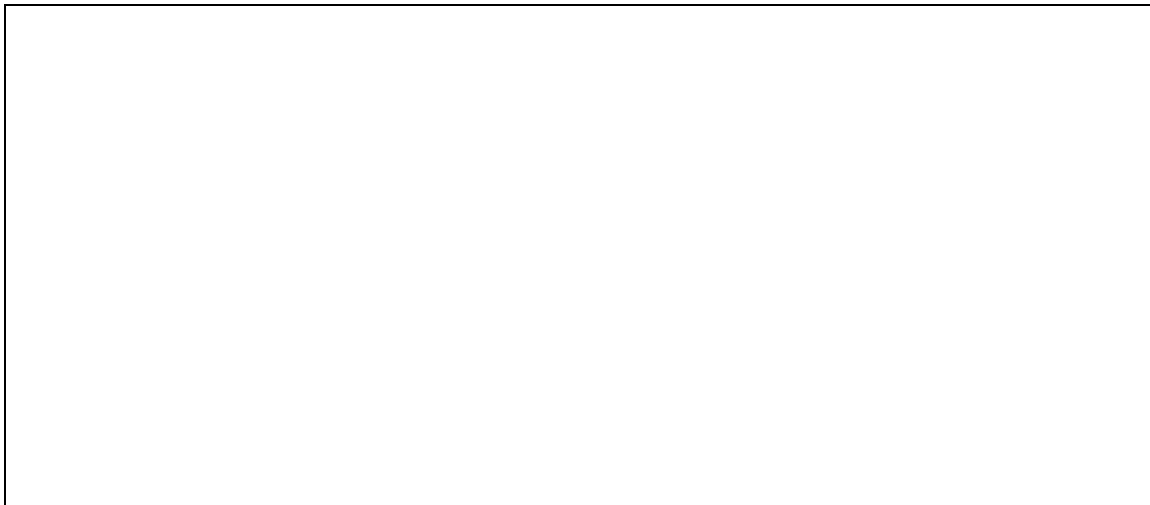
Classe de motor	Descrição	$X^{\text{rotor}}$	$X^{\text{estator}}$
A	Torque de partida normal, corrente de partida normal	0.5	0.5
B	Torque de partida normal, corrente de partida baixa	0.4	0.6
C	Torque de partida alto, corrente de partida baixa	0.3	0.7
D	Torque de partida alto, escorregamento alto	0.5	0.5
Rotor bobinado		0.5	0.5

A reatância magnetizante ( $X_m$ ) pode ser determinada com base na reatância de ensaio a vazio e com base na distribuição de reatância de dispersão (tabela anterior)

O valores de  $R^{\text{estator}}$  e  $R^{\text{rotor}}$  são obtidos de forma semelhante.

#### b)Preparação:

Para a execução desta experiência devemos usar: fonte de tensão trifásica senoidal, voltímetro, amperímetro e 2 wattímetros. O esquema de ligação é:

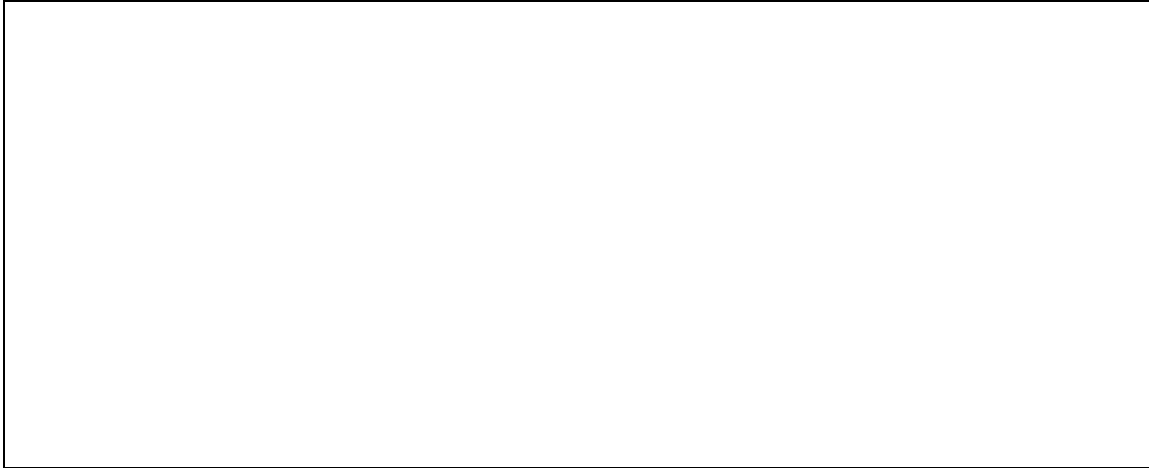


#### c)Execução:

Como foi apresentado anteriormente: Neste ensaio, trava-se o rotor, impedindo-o de girar. Curto circuita-se os terminais do rotor ( se for bobinado) e aplica-se uma tensão reduzida nos terminais de alimentação do estator. ( geralmente de 10% a 20%) de forma a ter no máximo a corrente nominal. Este baixo valor de tensão é justificado pois, como o rotor está parado, a velocidade do fluxo visto do rotor é a mesma da velocidade deste mesmo fluxo visto do estator. O que significa que o escorregamento é igual a 1 ( $s=1$ ).

Diante disto:  $R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) = 0$  então temos:  $Z_2 = R_2 + jX_2$

Porém, a esta baixa tensão, o ramo magnetizante é considerado ausente, ficando o modelo matemático assim :



Preencher a tabela:

V	$I_{rb}$ (A)	$W_1$	$W_2$	$P_{rb}$

Itens a ponderar:

- Determinar, a partir dos dados dos ensaios, os parâmetros do circuito equivalente do MIT
- Porque no ensaio a vazio não existem perdas no ferro do rotor?
- Traçar as curvas  $I_0 \times V_0$  e  $P_0 \times V_0$ .
- Com base na curva  $P_0 \times V_0$ , determinar as perdas por atrito e ventilação.

## Ensaio 4 – Diagrama Circular

### a) Introdução teórica

O diagrama circular, relativo às correntes estatóricas de um motor assíncrono, é traçado com relativa facilidade, desde que se conheçam dois pontos do mesmo. Estes dois pontos obtêm-se efetuando a medição da corrente absorvida no funcionamento a vazio e em curto-circuito do motor e as correspondentes fatores de potência.

As medições antes mencionadas são efetuadas com processos análogos aos empregados nos transformadores trifásicos. São feitos os ensaios de rotor bloqueado, rotor livre e de corrente contínua.

Dependendo do sistema de ligação das fases, a corrente e a tensão de fase estatórica a vazio resultam:

$$\text{a) estrela: } V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \text{ e } I_{F0} = I_{L0}$$

$$\text{b) triângulo: e } V_F = V_L \text{ e } I_{F0} = \frac{I_{L0}}{\sqrt{3}}$$

A potência absorvida pelo motor é dada pela diferença entre a indicação dos dois wattímetros, pois, com o motor a vazio o fator de potência é com certeza inferior a 0,5, isto é,  $W = W_1 - W_2$ . O fator de potência a vazio é obtido da expressão:

$$W_0 = 3V_F I_{F0} \cos \varphi_0$$

Determinada assim a intensidade da corrente a vazio e o ângulo de defasagem em atraso  $\varphi_0$  com respeito à tensão de alimentação, é possível traçá-la, ficando assim definida a origem da semicircunferência.

Não é possível efetuar-se o ensaio do curto-circuito, isto é, com motor parado, utilizando a tensão de alimentação  $V$  da linha; porque a corrente absorvida pelo motor, nestas condições, seria muito elevada e poderia danificá-lo.

Assim sendo, aplica-se aos bornes do motor com rotor bloqueado uma tensão reduzida,  $V_{rb}$ , cujo valor é tal que faça o motor absorver a corrente normal de funcionamento  $I'_1$ .

A tensão de curto-circuito é aproximadamente  $\frac{1}{4}$ , isto é, 25% do valor da tensão normal. Este valor é consideravelmente superior aos necessários aos transformadores (5% até 8%) pelo fato da presença do entreferro aumentar consideravelmente a dispersão no caso dos motores assíncronos.

O valor da corrente de curto-circuito que o motor absorve quando cada fase estatórica é alimentada pela tensão de fase  $V_f$  é dada pela seguinte proporção:

$$I_{rb} = I \frac{V}{V_{rb}}$$

A soma ou a diferença das indicações dos dois wattímetros fornece a potência de curto-circuito relativa a tensão  $V'_{rb}$ , isto é,  $W'_{rb} = W_1 \pm W_2$ . Sendo tal potência expressa por:

$$W_{rb} = 3V_{rb}I_{rb} \cos \varphi_{rb}$$

Transferindo sobre o diagrama, a corrente do motor  $I_0$ , em valor e fase, define-se o início da semicircunferência. A transferência, no mesmo diagrama da corrente de curto-circuito  $I_{rb}$ , que o motor bloqueado absorveria, se alimentado pela tensão normal, fornece o segmento  $OB$ , defasado do ângulo  $\varphi_{rb}$  em atraso com respeito a  $V_1$ .

Une-se o ponto  $I_0$  ao  $B$ , obtendo o valor da corrente de reação primária no funcionamento com o rotor bloqueado. Do ponto médio  $M$  da corda  $I_0B$ , traça-se a perpendicular que encontra a reta  $I_0C$  no ponto  $O'$ . Este ponto é o centro da semicircunferência  $I_0ABC$ , ou seja do diagrama circular do motor em questão.

Os motores assíncronos são construídos de forma a apresentar o máximo fator de potência quando funcionando com plena carga. Por esta razão, no diagrama, a corrente  $I$  de plena carga é representada pelo segmento  $OA$ , tangente á semicircunferência.

A corrente a vazio  $I_0$  é da ordem de 30% da normal de plena carga . O valor da corrente de curto-circuito  $I_{rb}$  em geral é de 3 até 8 vezes o da corrente normal.

O fator de potência de curto-circuito em geral é inferior a 0,5, mas é maior que o fator de potência a vazio, por isso  $\varphi_{rb} < \varphi_0$ .

O centro real do diagrama circular é o ponto  $O''$ , o qual é obtido traçando do ponto  $I_0$  a reta perpendicular  $I_0^{\perp}$ , a qual intercepta a reta  $OB=I_{rb}$  no ponto  $A_0$ . Do ponto médio do segmento  $I_0A_0$  traça-se a reta paralela ao eixo  $OX$ , a qual encontra a reta  $MO'$  no ponto  $O''$ , que é o centro real do diagrama circular.

b)Execução:

Completar a tabela abaixo:

Ensaio a vazio

$V_0$	$I_0$	$P_0$	$\cos\varphi_0$

### Ensaio de rotor bloqueado

$V_{rb}$	$I_{rb}$	$P_{rb}$	$\cos\phi_{rb}$

$I'_{rb} = I_{rb} \frac{V}{V_{rb}}$	$W_{cobre} = R(I'_{rb})^2$

Traçar o diagrama circular, referente a uma fase do motor, com base nos valores medidos e calculados.