



**TÉCNICO**  
LISBOA

**Universidade de Lisboa**  
**Instituto Superior Técnico**

## **Fundamentos de Energia Eléctrica**

Guia do 3º Trabalho Laboratorial

**Máquina de Indução**

**Regime permanente**

Laboratório de Máquinas Eléctricas

**2023/24 P1**

# Índice

<b>1. Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Introdução teórica .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Lista de Material.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Ensaios da Máquina de Indução .....</b>	<b>9</b>
4.1. Ensaio em vazio .....	9
4.2. Ensaio com rotor bloqueado .....	10
4.3. Ensaios em carga.....	11
<b>5. Trabalho pós-laboratorial.....</b>	<b>13</b>

## 1. Objetivos

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Efetuar ensaios que permitam a determinação dos parâmetros do circuito equivalente da Máquina de Indução.
- Obter as características em regime permanente para carga mecânica variável.

## 2. Introdução teórica

As máquinas de indução de rotor em gaiola, que constitui o objecto de estudo deste trabalho, são constituídas por um estator com um circuito magnético no qual estão implantados três enrolamentos distribuídos em cavas e por um rotor constituído por um circuito magnético de ferro macio também com cavas onde se encontram barras condutoras curto-circuitadas nos topos (rotor em gaiola ou em curto-circuito).

Os enrolamentos do estator são percorridos por um sistema trifásico de correntes alternadas e sinusoidais quando forem alimentados por um sistema trifásico de tensões também alternadas e sinusoidais da mesma frequência  $f$ . Sendo  $p$  o número de pares de polos da máquina, estas correntes criam um campo girante de indução magnética que roda à velocidade de sincronismo, dada por:

$$N_s = \frac{60f}{p} \text{ (rpm)} \quad (1)$$

Rodando o rotor da máquina à velocidade de  $N_r$  (rpm), define-se o escorregamento relativo como:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2)$$

O escorregamento relativo contém a mesma informação que a velocidade, mas revela-se mais apropriado para o estudo destas máquinas.

O comportamento das máquinas elétricas em regime transitório rege-se por um sistema de equações diferenciais não lineares e variantes no tempo. Não faz parte dos temas desta disciplina.

Em regime permanente, o estudo das máquinas de indução pode ser feito com a ajuda de um esquema equivalente como o representado na Fig. 1, onde o índice  $r$  se refere ao rotor, o índice  $s$  ao estator e o índice  $m$  à magnetização.

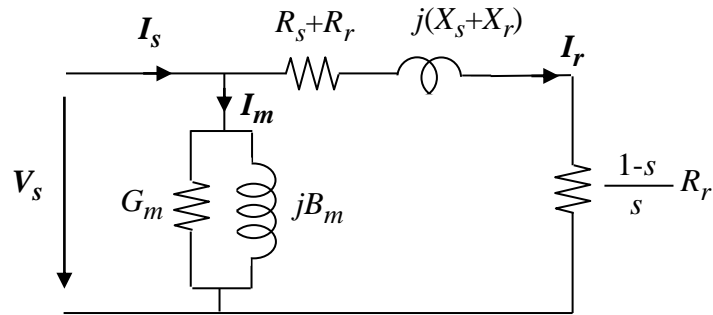


Figura 1: Esquema equivalente por fase da máquina de indução.

A corrente do estator  $I_s$  é dada pela soma (vectorial) da corrente de magnetização  $I_m$  (fortemente indutiva) com a corrente **equivalente** do rotor  $I_r$ , a qual depende fortemente do escorregamento  $s$ .

O valor da resistência fictícia  $R_r/s = R_r + R_r(1-s)/s$  determina o comportamento destas máquinas. Uma vez que o valor da resistência  $R_r$  do rotor é relativamente baixo, só se obterão valores de correntes razoáveis com escorregamentos  $s$  baixos, próximos de zero, de modo a que o valor da resistência fictícia  $R_r/s$  seja elevado. No arranque o escorregamento é unitário e, como consequência, a corrente nos enrolamentos do estator é elevada, podendo tomar valores de várias vezes o valor nominal (ver Figura 2).

A correntes de arranque elevadas correspondem quedas de tensão significativas, as quais constituem perturbações à alimentação dos consumidores vizinhos. Para diminuir estas perturbações é necessário reduzir o valor da corrente de arranque, usando métodos de arranque apropriados, que se adaptem às características da rede onde o motor se encontra ligado e que sejam também adaptados à carga mecânica que este acciona. Estes métodos de arranque traduzem-se, entre outros, pela aplicação transitória de um valor relativamente baixo de tensão ou pela introdução temporária de impedâncias em série com os enrolamentos do estator.

Na Fig. 2, apresenta-se a variação de algumas grandezas importantes para a compreensão do funcionamento da Máquina de Indução. Estas grandezas estão representadas relativamente aos valores nominais. Note-se que, em funcionamento normal, apenas a zona próxima da velocidade de sincronismo é relevante (valores reduzidos de corrente, valores razoáveis do factor de potência, etc.).

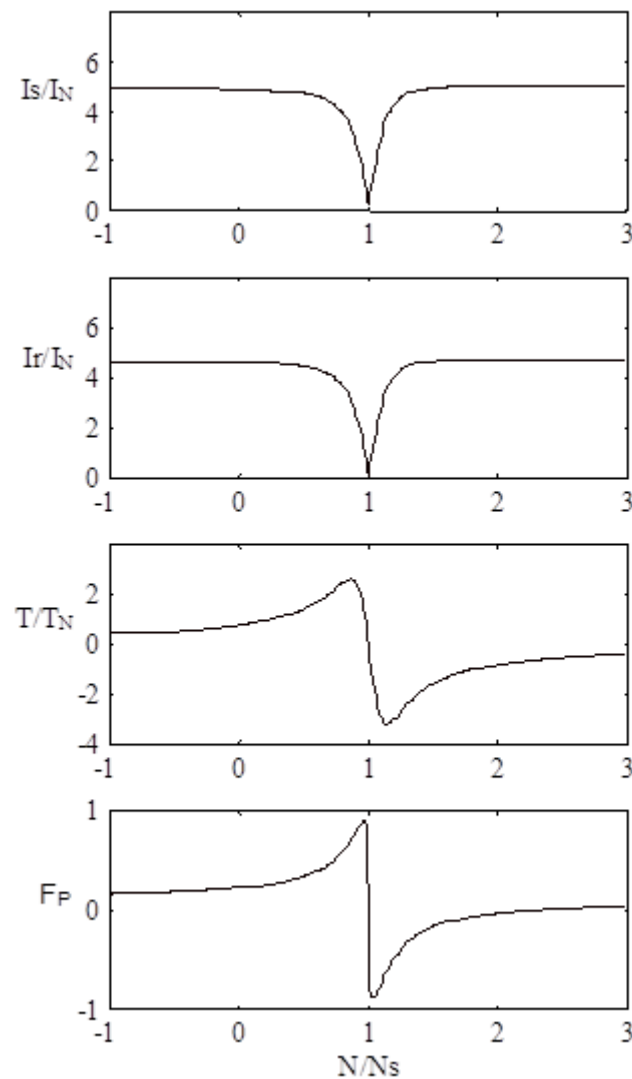


Figura 2: Corrente do estator, corrente do rotor, binário, e fator de potência em função da velocidade de rotação da máquina, quando alimentada a tensão de valor eficaz e frequência constantes.

Na Fig. 3, apresenta-se a variação das grandezas da Máquina de Indução em função da carga mecânica, i.e., da potência mecânica disponibilizada no veio. Estas características são válidas apenas para a situação normal de funcionamento, caracterizada por valores reduzidos do escorregamento.

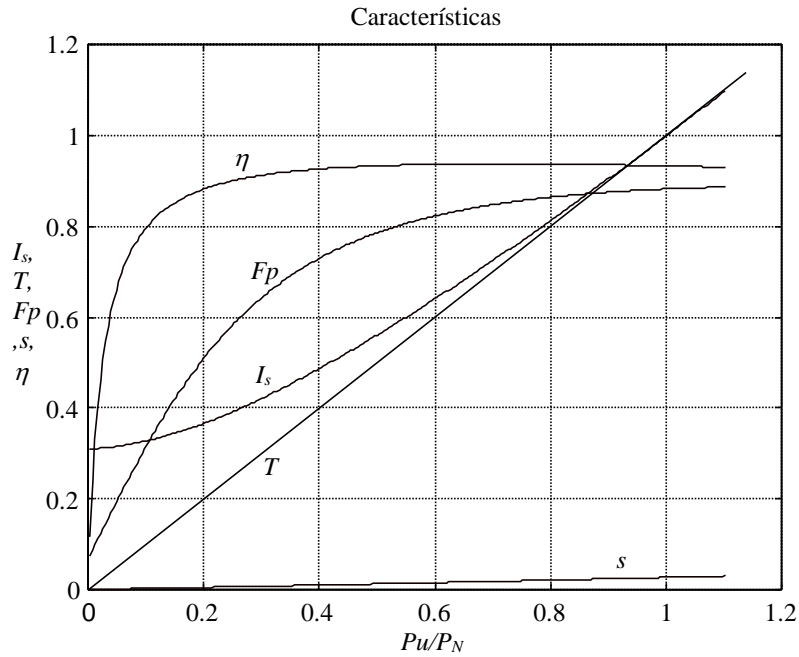


Figura 3: Rendimento, fator de potência, corrente do estator, binário e escorregamento em função da carga (potência mecânica).

Em funcionamento normal (baixos valores do escorregamento), o valor da resistência  $R_r/s$  é determinante, sendo a corrente  $I_r$  fortemente resistiva. O carácter resistivo vai diminuindo à medida que o valor do escorregamento aumenta. A corrente  $I_s$  resulta da soma de  $I_m$  com  $I_r$ , como se mostra na Fig. 4 para dois pontos de funcionamento ( $a$  e  $b$ ). É possível mostrar que a corrente  $I_s$  descreve uma circunferência no plano de Argand. Como esta circunferência tem um diâmetro muito superior ao módulo das amplitudes complexas das correntes, na zona de funcionamento normal obtém-se um arco que, por ser pequeno comparado com o diâmetro da circunferência, pode ser confundido com um segmento de recta.

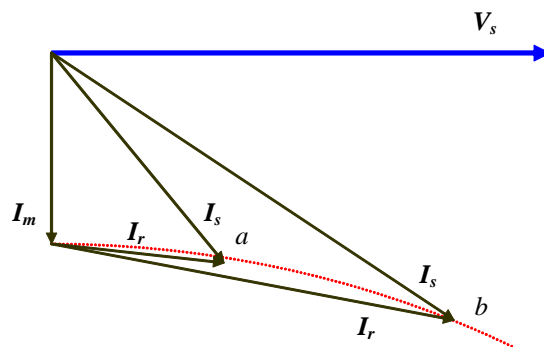


Figura 4: Diagrama vetorial da máquina em carga. (para dois pontos de funcionamento em carga).

### 3. Lista de Material

#### Grupo Máquina de Indução – Máquina de Corrente Contínua

No laboratório existem quatro grupos de máquinas, cada um constituído por uma Máquina de Indução e uma Máquina de Corrente Contínua, sendo disponibilizado um grupo por bancada. As duas máquinas de cada grupo encontram-se mecanicamente acopladas através dos seus eixos, rodando, por isso, em conjunto (e à mesma velocidade). Na Fig. 5, ilustram-se os componentes de cada grupo.



Figura 5: Elementos do grupo Máquina de Indução – Máquina de Corrente Contínua: Máquina de Indução (1), Máquina de Corrente Contínua (2), acoplamento dos eixos das máquinas (3), sensor de rotações do taquímetro (4) e ventilador da Máquina de Corrente Contínua (5).

#### Módulos de bancada

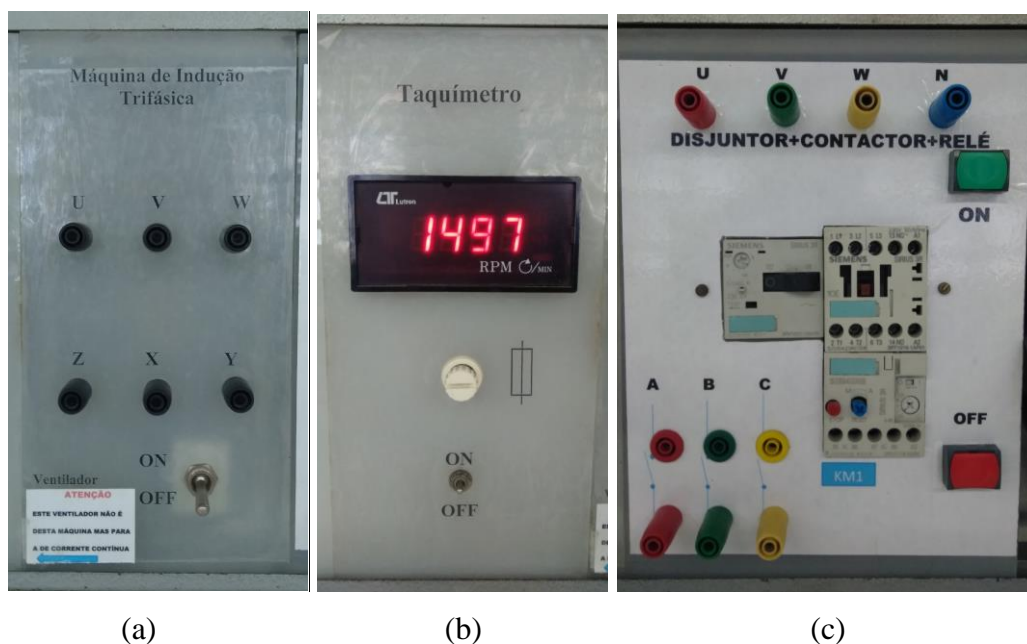


Figura 6: Módulo dos terminais acessíveis do estator da Máquina de Indução (a); módulo do taquímetro (b) e módulo do Disjuntor+contactor+relé (c).

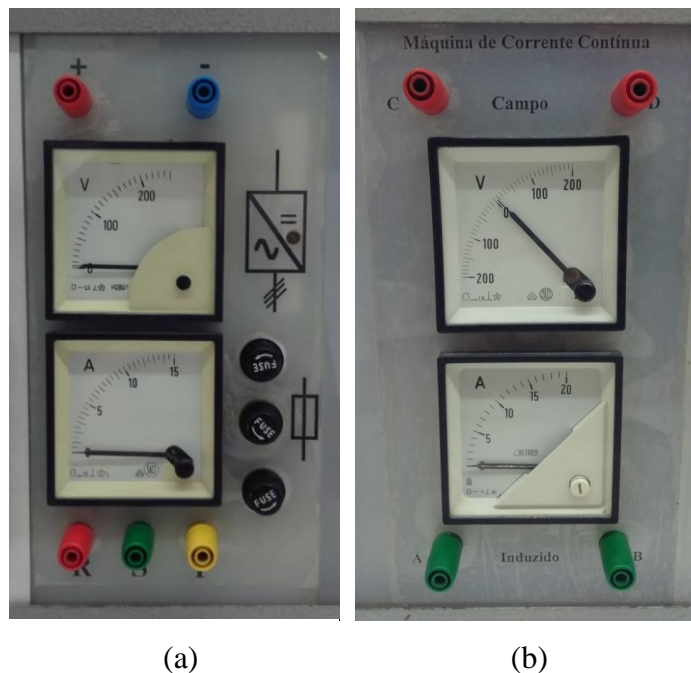


Figura 7: Módulo do retificador trifásico (a) e módulo dos terminais acessíveis da Máquina de Corrente Contínua (b).

### Multímetro Digital INTEGRA 1232

Além de poder medir as tensões e correntes do sistema trifásico, permite também medir a potência ativa, reativa, aparente e o fator de potência. Utiliza três transformadores de corrente com isolamento galvânico sendo alimentado através das tensões que está a medir.

Deverá ser usado nos ensaios da Máquina de Indução em vazio, com rotor bloqueado e em carga.



Fig. 8 Multímetro digital INTEGRA 1232

### Carga resistiva

No ensaio da Máquina de Indução em carga, é utilizada como carga que absorve a potência (elétrica) gerada pela Máquina de Corrente Contínua.

### Multímetro digital e Pinça Amperimétrica

Devem ser usados como alternativa de maior precisão aos instrumentos de painel com medições do induzido da Máquina de Corrente Contínua (Fig. 7.b).



## 4. Ensaio da Máquina de Indução

Neste trabalho estuda-se a Máquina de Indução em funcionamento como motor (conversão de energia elétrica em energia cinética rotacional) nas situações de vazio, rotor bloqueado e carga. O objetivo da realização dos ensaios em vazio e com rotor bloqueado é a determinação dos valores dos parâmetros do esquema monofásico equivalente (cf. Fig. 1); os ensaios em carga permitem o traçado das principais curvas características (cf. Fig. 3).

### 4.1. Ensaio em vazio

#### Esquema das ligações

O esquema das ligações necessárias à realização do ensaio encontra-se representado na Fig. 9. A Máquina de Indução é alimentada através do autotransformador, o qual permite ajustar a tensão aplicada aos enrolamentos do estator da máquina. A medida das grandezas do estator da máquina é realizada pelo Multímetro Digital INTEGRA 1232.

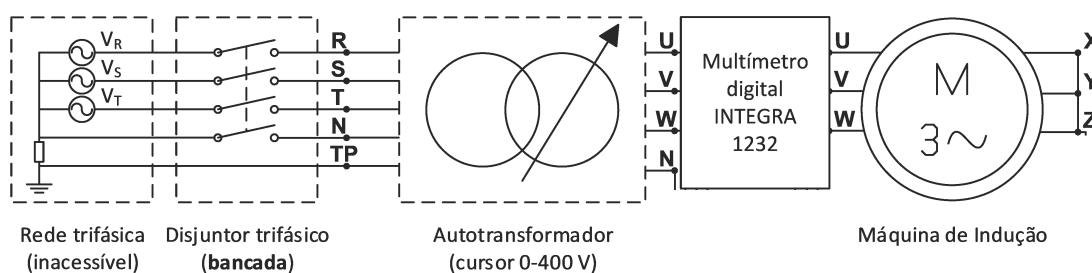


Figura 9: Esquema de ligações para os ensaios em vazio e com rotor bloqueado.

Para ligar os enrolamentos do estator da Máquina de Indução em estrela, é necessário ligar entre si os terminais X, Y e Z do módulo da MI (cf. Fig. 6.a), como se ilustra na Fig. 10. A saída do autotransformador (terminais U, V, W e N) deverá ser ligada aos respetivos terminais de alimentação da MI (terminais U, V, W e ponto de neutro da estrela XYZ)

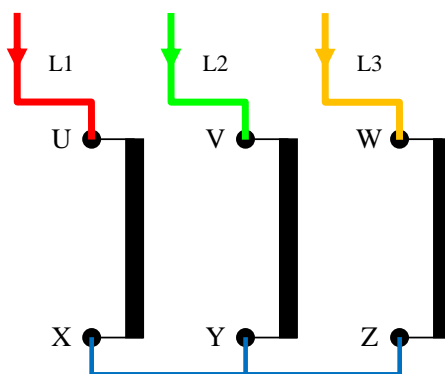


Figura 10: Esquema de ligação dos enrolamentos do estator da MI em estrela; cada par de terminais (U,X), (V,Y) e (W,Z) corresponde a um dos enrolamentos do estator.

### Condução do ensaio

- 1) Comutando o interruptor do módulo do taquímetro (Fig. 6.b) para a posição ON, ligue o taquímetro do grupo.
- 2) Assegure-se de que o cursor do autotransformador se encontra na posição **zero**. Ligue o disjuntor trifásico da bancada.
- 3) Atuando no cursor do autotransformador, aumente progressivamente a tensão aplicada à MI até um valor próximo do nominal ( $V_n = 400 \text{ V}$ ). A máquina deverá arrancar e acelerar até o veio (rotor) atingir uma velocidade próxima da velocidade de sincronismo (1500 rpm).
- 4) Registe os valores eficazes da tensão (simples) e da corrente numa das fases do estator, os valores das potências ativa e aparente absorvidas pela MI e os valores do fator de potência e da velocidade do rotor.
- 5) Atuando no cursor do autotransformador, reduza o valor da tensão aplicada até **zero**, de forma a parar a máquina de indução (verifique no taquímetro que a máquina para completamente). Desligue o disjuntor trifásico.

## 4.2. Ensaio com rotor bloqueado

### Esquema das ligações

Neste ensaio, as ligações mantêm-se inalteradas relativamente às do ensaio em vazio (cf. Figura 8).

### Condução do ensaio

- 1) Assegure-se de que o cursor do transformador se encontra na posição **zero**, que a máquina está parada (taquímetro) e que o disjuntor trifásico está desligado.
- 2) Bloqueie o rotor da MI.
- 3) Ligue o disjuntor trifásico. Atuando no cursor do autotransformador, aumente progressivamente a tensão aplicada à máquina até atingir o valor nominal de corrente nominal no estator ( $I_n = 4,9 \text{ A}$ ).
- 4) Registe os valores eficazes da tensão (simples) e da corrente numa das fases do estator, os valores das potências ativa e aparente absorvidas pela MI e os valores do fator de potência e da velocidade do rotor.

### 4.3. Ensaio em carga

Nestes ensaios, a Máquina de Indução absorve potência da rede elétrica, convertendo-a em potência mecânica disponibilizada no seu veio, enquanto a Máquina de Corrente Contínua funciona como gerador, convertendo a energia mecânica do seu veio (fornecida pela MI) em energia elétrica, a qual é, por sua vez, absorvida por uma carga resistiva ligada ao induzido da MCC.

#### Esquema das ligações

O esquema de ligações da Máquina de Indução e da Máquina de Corrente Contínua encontra-se representado na Fig. 11. De notar que, ao contrário dos ensaios em vazio e com rotor bloqueado, o autotransformador não é usado para alimentar a Máquina de Indução, alimentando agora o retificador trifásico. Os voltímetros e amperímetros encontram-se instalados nos respetivos módulos de bancada (cf. Fig. 7.a e Fig. 7.b). A carga da MCC é constituída pelo paralelo das três resistências de fase ( $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ ), cujos valores são ajustáveis, e pela resistência  $R$  ( $12\ \Omega$ ) da carga resistiva.

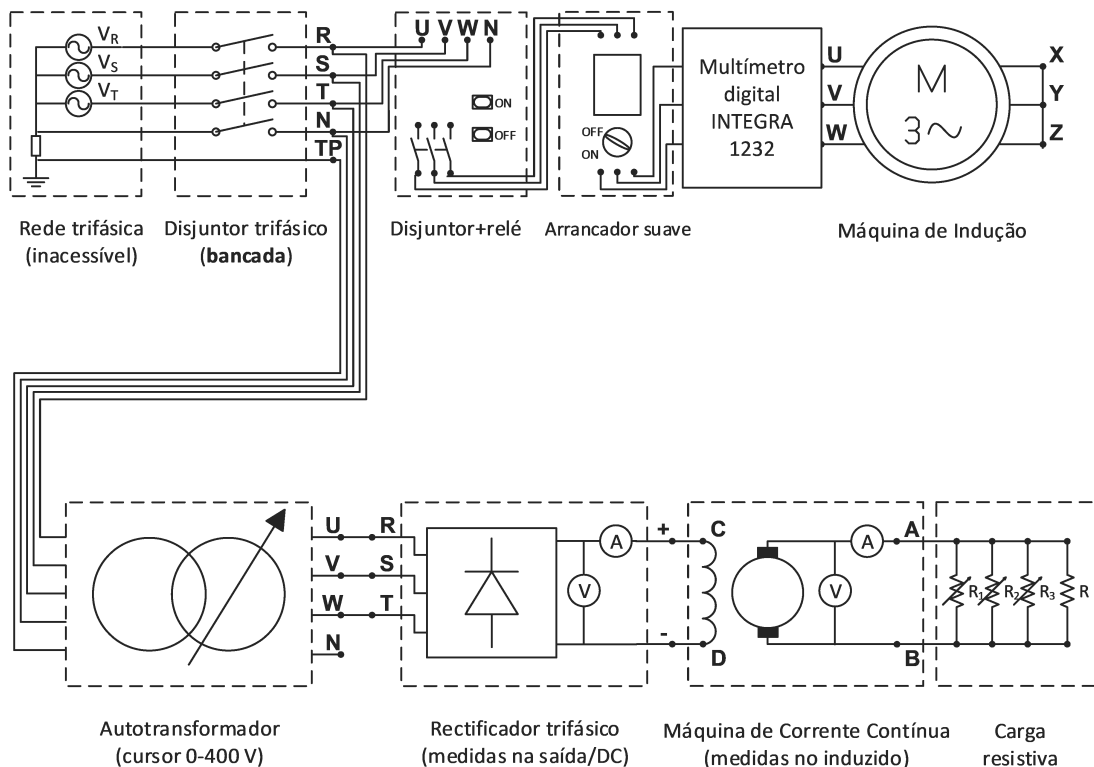


Figura 11: Esquema de ligações para o ensaio em carga da Máquina de Indução.

### Condução do ensaio

- 1) Assegure-se de que o cursor do transformador se encontra na posição **zero**, que a máquina está parada (taquímetro) e que o disjuntor trifásico está desligado.
- 2) Efetue as ligações relativas à Máquina de Indução, conforme ilustrado na parte superior da Fig. 10. (ligação dos terminais X, Y e Z entre si) e ligação dos módulos Disjuntor+contator+relé e Arrancador suave em cascata. Assegure-se de que o comutador do Arrancador Suave se encontra na posição OFF.
- 3) Efetue as ligações relativas à Máquina de Corrente Contínua, conforme ilustrado na parte inferior da Fig. 10: ligação em cascata do autotransformador, retificador trifásico e enrolamento de campo da MCC (terminais C e D) e ligação da carga resistiva ao induzido da MCC (terminais A e B), com todas as resistências da carga ligadas em paralelo.
- 4) Ajuste os comutadores A1, A2 e A3 da carga resistiva de forma a ter o valor mínimo de resistência na carga (posições 5-5-5).
- 5) Ligue o ventilador da carga resistiva.
- 6) Ligue a alimentação do módulo do Arrancador suave (use uma das tomadas disponíveis na bancada).
- 7) Ligue o taquímetro.
- 8) Ligue o disjuntor trifásico da bancada.
- 9) Comutando o interruptor do módulo da MI (cf. Fig. 6.a) para a posição ON, ligue o **ventilador da MCC**.
- 10) Ligando o módulo do Disjuntor+contator+relé (pressionado o botão ON) e o módulo do Arrancador suave (mudando o comutador para a posição ON), a Máquina de Indução deverá arrancar e a velocidade aumentar até atingir cerca de 1500 rpm. Caso isto não se verifique, não prossiga o ensaio e chame o docente.
- 11) Atuando no cursor do autotransformador, aumente a tensão aplicada/corrente no enrolamento de campo da MCC até que a Máquina de Indução esteja a absorver uma potência aparente da rede próxima da nominal ( $S_n = 3,3 \text{ kVA}$ ), sendo também a corrente nas fases do estator da MI próxima da nominal ( $I_n = 4,9 \text{ A}$ ).
  - a) Registe os valores eficazes da tensão (simples) e da corrente numa mesma fase do estator da MI, bem como das potências ativa e aparente absorvidas no estator, fator de potência e tensão e corrente no induzido da MCC (primeira linha da tabela).
- 12) Atuando no cursor do autotransformador, diminua a tensão aplicada/corrente no enrolamento de campo da MCC de forma a baixar o valor da tensão no induzido da MCC ( $V_{DC}$ ) em intervalos de cerca de 10 V, até zero.

- a) Registe os valores das restantes linhas da tabela.
- 13) Assegure-se de que o cursor do autotransformador se encontra na posição **zero**. Desligue o ventilador da MCC (interruptor na posição OFF). Desligue o Arrancador suave (comutador na posição OFF), fazendo parar a MI. Desligue o módulo Disjuntor+contator+relé, pressionando o botão OFF. Desligue o disjuntor trifásico da bancada.

## 5. Trabalho pós-laboratorial

Nota: Os valores nominais da Máquina de Indução constam na primeira folha do relatório (folha de identificação do grupo).

- 1) Para os valores obtidos no ensaio em vazio, determine os valores pedidos das grandezas (tensão e corrente no estator, potências absorvidas no estator da MI).
- 2) Para os valores obtidos no ensaio com rotor bloqueado, determine os valores pedidos das grandezas (tensão e corrente no estator, potências absorvidas no estator da MI).
- 3) Determine os valores dos parâmetros do esquema equivalente da MI.
- 4) Para cada conjunto de valores obtidos no ensaio em carga, determine o valor do binário e da potência mecânica no veio das máquinas, os valores das grandezas em p.u., o escorregamento ( $s$ ) e o rendimento (células a azul nas duas tabelas).
  - a) Os valores de tensão e corrente no induzido da máquina de corrente contínua ( $V_{DC}$ ,  $I_{DC}$ ) deverão ser tomados como medidas auxiliares que irão permitir determinar o valor do binário e da potência mecânica fornecida pela MI. Os valores a calcular podem ser obtidos a partir das expressões de cálculo apresentadas nesta página.
  - b) Após o cálculo dos valores, as curvas características da MI e do lugar geométrico da corrente  $I_s$  deverão ser automaticamente geradas.
  - c) Comente os resultados obtidos (valores calculados e curvas características).

Fórmulas auxiliares de cálculo:

$$P_{mec} = V_{DC}I_{DC} + r_a I_{DC}^2$$

$$P_{mec} = V_{DC}I_{DC} + 2I_{DC}^2$$

$$T = \frac{P_{mec}}{\frac{2\pi}{60} N_r}$$

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_s}$$