

# Fundamentos de Máquinas de Indução Teoria e Prática

*Juliano Bitencourt Padilha*

*Lisandra Kittel Ries*

---

# Fundamentos de Máquinas de Indução

Teoria e Prática

Juliano Bitencourt Padilha

Lisandra Kittel Ries

---

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE SANTA CATARINA – IFSC**

**Campus Florianópolis**

Avenida Mauro Ramos n. 950, Florianópolis/SC

**Reitor**

Maurício Gariba Júnior

**Diretor do Campus Florianópolis**

Zízimo Moreira Filho

**Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica**

Edison Antonio Cardoso Aranha Neto

JULIANO BITENCOURT PADILHA  
LISANDRA KITTEL RIES

# Fundamentos de Máquinas de Indução

Teoria e Prática



FLORIANÓPOLIS  
2024

Catálogo na fonte pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Santa Catarina - IFSC

P123f Padilha, Juliano Bitencourt

Fundamentos de máquinas de indução: teoria e prática [recurso  
eletrônico] / Juliano Bitencourt Padilha, Lisandra Kittel Ries. –  
Florianópolis : IFSC, 2023.

67 p.

ISBN: 978-65-83787-00-2

1. Engenharia elétrica. 2. Máquinas elétricas. 3. Motor de indução. I.  
Padilha, Juliano Bitencourt. II. Ries, Lisandra Kittel. IV. Título.

CDD 621.3

# Prefácio

---

Este livro busca apresentar os fundamentos de máquinas de indução ao nível de cursos técnicos. Dessa forma, nós, autores procuramos empregar uma linguagem simples e direta, abordando os principais tópicos sobre o assunto. Nossa vivência lecionando na área foi de suma importância para esta tarefa. Temos consciência que livros consagrados na área apresentam um maior rigor na exposição dos assuntos, mas tais livros são normalmente utilizados em cursos de graduação. Ainda assim, essa obra pode ser útil até mesmo nesses cursos como referência bibliográfica complementar.

Em termos de estrutura, o livro apresenta três capítulos. O primeiro é dedicado basicamente aos aspectos teóricos da máquina de indução operando como motor. De maneira geral, a teoria é válida tanto para motores trifásicos quanto monofásicos. Porém, cabe ressaltar que o termo MIT (motor de indução trifásico) é utilizado ao longo do texto quando a teoria é particularizada para o caso do motor trifásico. Ao final do primeiro capítulo também são descritos os tipos de motores monofásicos encontrados comercialmente. Já no segundo capítulo são apresentados os principais ensaios que podem ser realizados com o motor trifásico. É importante que os ensaios, quando realizados, não sejam um fim em si só, logo, a análise dos dados experimentais deve ser encorajada. Pensando nisso, os equacionamentos matemáticos referentes a cada um dos ensaios são apresentados. Por fim, no terceiro e último capítulo, são descritas as possibilidades de operação da máquina de indução como gerador. É um capítulo sucinto, mas que visa a exemplificar que a máquina de indução, assim como as demais máquinas elétricas rotativas, pode operar tanto como motor quanto gerador.

Em termos de formatação do documento, o mesmo foi propositadamente redigido em folha formato A5, facilitando a leitura do arquivo PDF em *smartphones*, *tablets* e *e-readers*.

Por fim, desejamos aos leitores um bom proveito da obra e que a mesma venha a ser benéfica na jornada por conhecimentos de cada um.

# Biografia dos autores

---



## *Juliano Bitencourt Padilha*

Possui doutorado e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tendo concluído seus estudos em 2016 e 2010, respectivamente. Além disso, concluiu a graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 2008 e obteve formação técnica em Eletrotécnica no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria em 2003. Desde 2010 atua como professor no Câmpus Florianópolis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC). Suas áreas de interesse incluem a concepção e análise de dispositivos eletromagnéticos, programação e análise de dados.

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7454537433931848>



## *Lisandra Kittel Ries*

Possui doutorado, mestrado e graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tendo concluído seus estudos em 2018, 2013 e 2010, respectivamente. Além disso, concluiu graduação e mestrado em Engenharia Elétrica em 2010 pelo Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT) na França por meio de um programa de dupla titulação (BRAFITTEC). Desde 2014 atua como professora no Câmpus Florianópolis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC). Suas áreas de interesse incluem máquinas elétricas, eletrônica de potência, fontes de energia renováveis e metodologias de ensino para Engenharia Elétrica.

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8368869951636402>

# Sumário

---

## Capítulo 1 — Motores de Indução: Teoria

1. INTRODUÇÃO .....	5
2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS .....	5
3. CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE .....	8
4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MIT .....	13
5. VELOCIDADE DO CAMPO GIRANTE .....	14
6. ESCORREGAMENTO .....	15
7. FREQUÊNCIA DAS TENSÕES INDUZIDAS NO ROTOR .....	16
8. CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO .....	16
9. TORQUE MECÂNICO .....	17
10. EQUILÍBRIO DINÂMICO .....	17
11. FLUXO DE POTÊNCIA .....	19
12. RENDIMENTO .....	20
13. CATEGORIA DOS MOTORES DE INDUÇÃO .....	20
14. PARTIDA DOS MOTORES DE INDUÇÃO .....	24
15. CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT .....	25
16. MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS .....	30
EXERCÍCIOS .....	37

## Capítulo 2 — Motores de Indução: Prática

1. INTRODUÇÃO .....	41
2. IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS DE PLACA .....	41
3. MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA POR FASE DO ESTATOR .....	43
4. ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO .....	44
5. ENSAIO COM ROTOR LIVRE .....	47
6. ENSAIO COM CARGA .....	49
EXERCÍCIOS .....	51

## Capítulo 3 — Geradores de Indução

1. INTRODUÇÃO .....	53
2. GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À REDE .....	53
3. GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE .....	54
EXERCÍCIOS .....	57
EXERCÍCIO DE REVISÃO .....	58
REFERÊNCIAS .....	63

---

## Motores de Indução: Teoria

### 1. INTRODUÇÃO

As máquinas girantes podem operar tanto como motor quanto como gerador. A máquina de indução (máquina assíncrona) tem sua maior aplicabilidade como motor, representando a maior carga em indústrias. Isso ocorre devido às inúmeras vantagens que o motor de indução apresenta perante os demais tipos de motores, a citar algumas: operação em corrente alternada (não há necessidade de fontes em corrente contínua), robustez (requer conseqüentemente menos manutenção), disponibilidade comercial em uma ampla faixa de potência e menor custo de aquisição.

Neste capítulo será apresentada uma teoria geral a respeito da máquina de indução operando como motor.

### 2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

A máquina de indução é constituída basicamente de duas partes: estator (parte estática) e rotor (parte girante).

#### **Estator**

O estator é composto por um núcleo ferromagnético formado por chapas de Fe-Si (Ferro-Silício) normalmente de GNO (grão não-orientado) e bobinas. As bobinas são alojadas nas ranhuras do estator e o espaço entre ranhuras é denominado dente do estator (ver Figura 1.1).

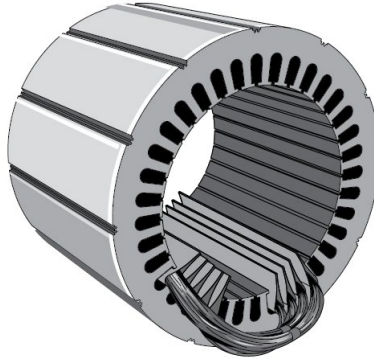


Figura 1.1 – Estator de uma máquina de indução parcialmente preenchido com bobinas.

Fonte: ELECTRIC-MAGNETIC WORLD, 2017.

## Rotor

O rotor de uma máquina de indução também apresenta um núcleo ferromagnético formado por chapas de Fe-Si normalmente de GNO. No caso do rotor, suas ranhuras podem ser preenchidas por barras condutoras de alumínio/cobre/liga de cobre (rotor tipo gaiola – ver Figura 1.2) ou bobinas (rotor bobinado – ver Figura 1.3).

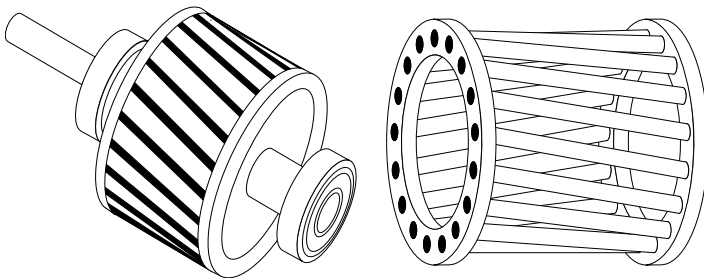


Figura 1.2 – Rotor tipo gaiola.

Fonte: elaboração própria.

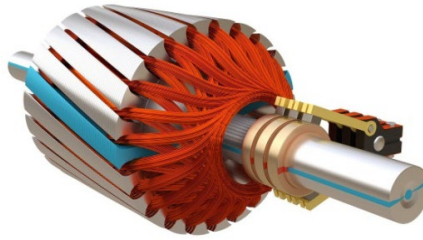


Figura 1.3 – Rotor bobinado.  
Fonte: BARADKAR, 2019.

Características do rotor gaiola:

- Construção simples, robustez e baixo índice de manutenção.
- Elevada corrente de partida, fazendo necessário o seu controle por meio de mecanismos auxiliares (uma exigência por parte das concessionárias de energia, de modo a minimizar os impactos na rede).
- Normalmente as barras do rotor são inclinadas, de modo que o fluxo magnético entre elas não apresente conteúdo harmônico (ver Figura 1.4) e que o torque desenvolvido pela máquina não apresente pequenas variações.
- Utilizados em ambientes com muita poeira e materiais abrasivos.
- Motores instalados em locais de difícil acesso.

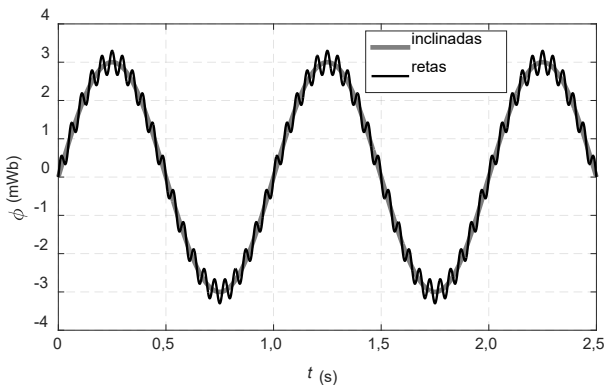


Figura 1.4 – Fluxo entre barras: diferença entre barras retas e inclinadas.  
Fonte: elaboração própria.

Características do rotor bobinado:

- a) Apresenta no rotor enrolamentos trifásicos, geralmente ligados em Y. Os terminais da ligação são conectados a anéis condutores dispostos no eixo da máquina, que em contato com as escovas possibilitam acesso ao circuito do rotor.
- b) Construção mais complexa e de maior custo.
- c) Maior necessidade de manutenção quando comparado com o tipo gaiola (o desgaste das escovas é um item a ser observado).
- d) É utilizado principalmente em aplicações com altas potências e nas quais a partida do motor é realizada com carga acoplada ao eixo.

Motores comerciais desse tipo podem apresentar resistências externas que são utilizadas durante o processo de partida, proporcionando elevado torque e acentuada redução da corrente de partida. Após a partida, essas resistências são desacopladas, diminuindo as perdas elétricas e o escorregamento. Ainda, em motores de grande porte, as escovas ficam em contato com os anéis coletores somente durante a partida do motor, evitando desgaste desnecessário das escovas e anéis coletores durante o funcionamento em regime, permitindo um maior tempo de uso para o conjunto.

### 3. CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE

Neste tópico iremos abordar de que forma podemos criar um campo magnético girante a partir de campos pulsantes.

A Figura 1.5 ilustra o fluxo magnético produzido por uma bobina pela qual circula uma corrente alternada. Pela regra da mão direita, o fluxo apresenta direção horizontal e sentido que alterna periodicamente. A intensidade desse fluxo também varia, pois a corrente é alternada (varia de intensidade no tempo).

**Observação:** embora o fluxo magnético seja uma grandeza escalar, assim como a corrente elétrica, é comum atribuímos direção e sentido a essas grandezas. As grandezas realmente vetoriais são a densidade de corrente e a densidade de fluxo magnético.

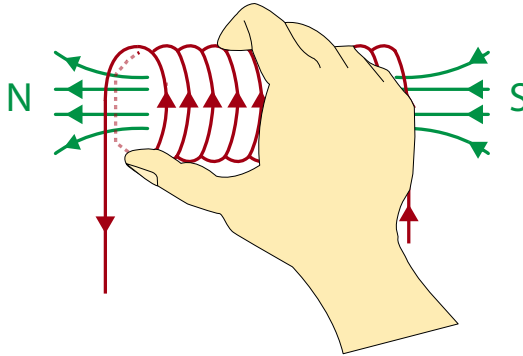


Figura 1.5 – Regra da mão direita para determinação do sentido do fluxo magnético. Na bobina representada e alimentada por CA, o fluxo pulsa na direção horizontal (mantém a direção, porém varia o sentido e a intensidade).

Fonte: elaboração própria.

Vamos agora ilustrar como é possível gerar um campo magnético girante a partir de dois campos pulsantes (campo girante no sistema bifásico – ver Figura 1.6).

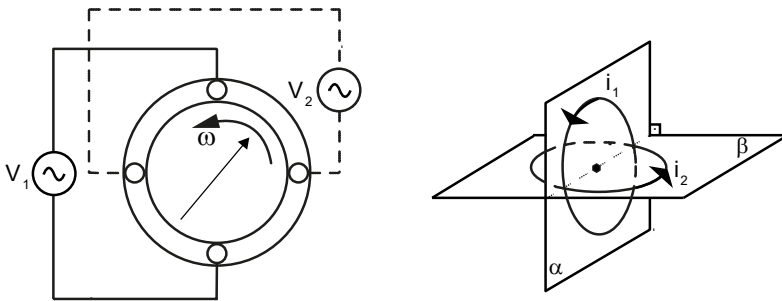


Figura 1.6 – Bobinas deslocadas em  $90^\circ$  no espaço.  
Fonte: elaboração própria (adaptado de SILVEIRA *et al.*).

No sistema bifásico representado na Figura 1.6 as bobinas estão deslocadas em  $90^\circ$  no espaço e são alimentadas por fontes de tensão sinusoidais defasadas em  $90^\circ$ , de modo que produzem campos magnéticos pulsantes nas direções horizontal (bobina alimentada por  $V_1$ ) e vertical (bobina alimentada por  $V_2$ ), respectivamente.

Vamos considerar, então, os seguintes fluxos para as bobinas:

$$\phi_1 = \phi_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1.1)$$

$$\phi_2 = \phi_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + 90^\circ) = \phi_{m\acute{a}x} \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (1.2)$$

Onde:  $\phi_1$  e  $\phi_2$  são, respectivamente, os fluxos magnéticos produzidos pelas bobinas 1 e 2 (em Wb) e  $\phi_{m\acute{a}x}$  é o valor de pico desses fluxos;  $\omega$  é a velocidade angular em rad/s;  $t$  é o tempo em s.

Como esses fluxos são perpendiculares entre si, o módulo do fluxo resultante será dado por:

$$\phi_R = \sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2} \quad (1.3)$$

$$\phi_R = \sqrt{[\phi_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t)]^2 + [\phi_{m\acute{a}x} \cdot \text{cos}(\omega t)]^2} \quad (1.4)$$

$$\phi_R = \sqrt{\phi_{m\acute{a}x}^2 \cdot \{[\text{sen}(\omega t)]^2 + [\text{cos}(\omega t)]^2\}} \quad (1.5)$$

$$\phi_R = \sqrt{\phi_{m\acute{a}x}^2 \cdot \{1\}} = \phi_{m\acute{a}x} \quad (1.6)$$

Conforme (1.6), concluímos que o módulo do fluxo resultante será sempre constante, embora mude de direção e sentido. Se a defasagem das tensões  $V_1$  e  $V_2$  for diferente de  $90^\circ$  não teremos mais um campo perfeitamente circular (que mantém a intensidade), mas sim, um campo elipsoidal.

Na Figura 1.7 à esquerda temos os vetores indução magnética (variável  $B$  em T) produzidos quando consideramos tensões defasadas em  $90^\circ$  (os vetores resultantes podem ser decompostos em componentes  $B_x$  e  $B_y$ ). Lembrando que a indução magnética é o produto da permeabilidade magnética do meio ( $\mu$  em Wb/(A.m)) pelo campo magnético ( $H$  em A/m). De maneira geral, as induções magnéticas que encontramos no interior de um motor apresentam valores máximos entre 1 e 2 T. Os vetores resultantes apresentam sempre o mesmo módulo ao longo do tempo. Já na Figura 1.8 temos as mesmas representações apresentadas na Figura 1.7, porém considerando uma defasagem de  $60^\circ$  para as tensões.

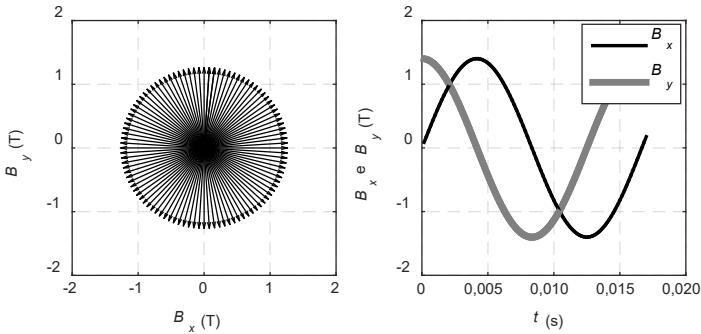


Figura 1.7 – Campo girante produzido para tensões defasadas de  $90^\circ$ .  
Fonte: elaboração própria.

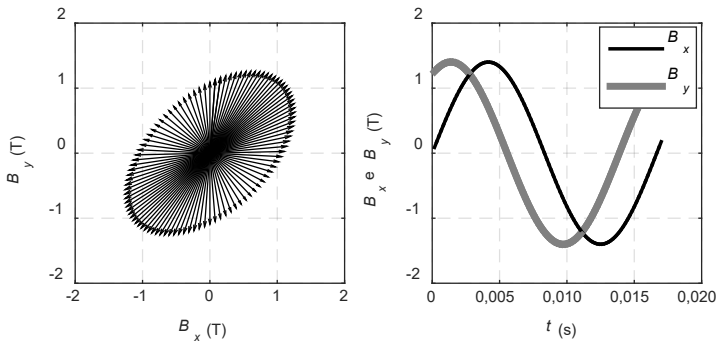


Figura 1.8 – Campo girante produzido para tensões defasadas de  $60^\circ$ .  
Fonte: elaboração própria.

Assim como no sistema bifásico, em um sistema trifásico também é possível criar um campo magnético girante (ver Figura 1.9). É o que acontece em um MIT (motor de indução trifásico), em que três enrolamentos deslocados  $120^\circ$  no espaço recebem as tensões trifásicas da rede (defasadas em  $120^\circ$ ).

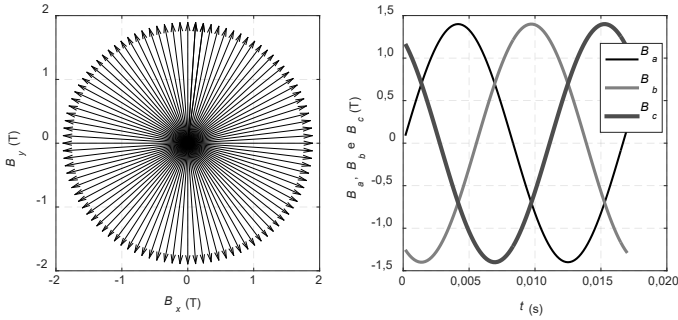


Figura 1.9 – Campo girante produzido por um sistema trifásico.  
Fonte: elaboração própria.

Consideramos que um motor de indução trifásico apresenta as correntes apresentadas na Figura 1.10.

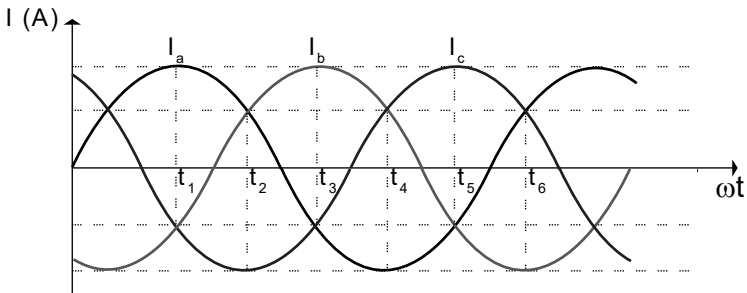


Figura 1.10 – Correntes de um motor de indução trifásico.  
Fonte: elaboração própria.

Na Figura 1.11 temos uma representação esquemática do estator do motor, onde assumimos três conjuntos de bobinas (bobinas A, B e C). Se a corrente for instantaneamente positiva, assumimos entrando nas letras sem asterisco, caso contrário, se for negativa, assumimos entrando nas letras com asterisco na Figura 1.11. Representando os vetores do campo na Figura 1.11, observamos que ao longo do tempo (instantes  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$  e  $t_6$ ), o campo resultante (seta maior) mantém o mesmo módulo e gira no sentido horário. Se invertermos duas fases (trocar a alimentação da fase A pela fase B, mantendo a disposição das bobinas), veremos que o campo girante inverterá o sentido.

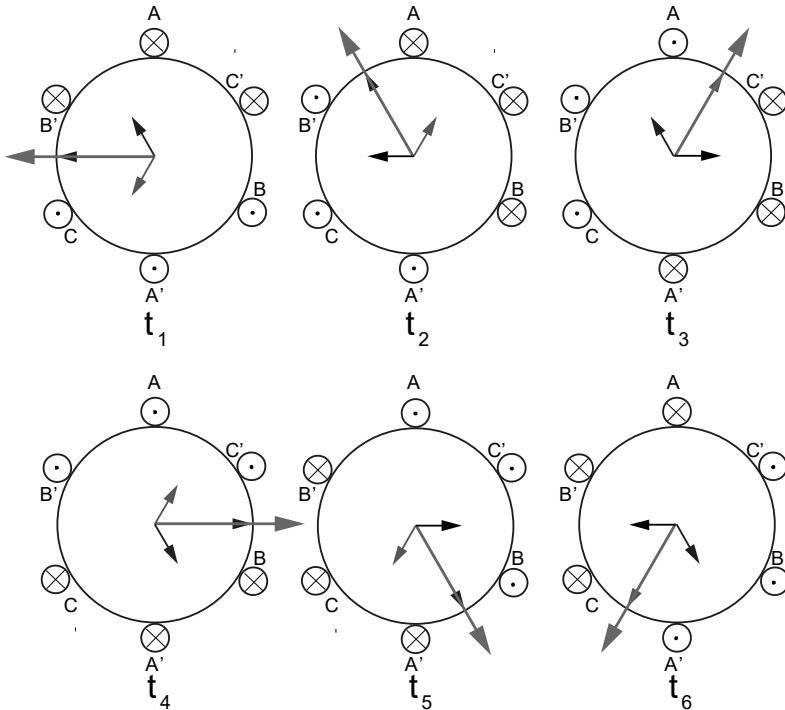


Figura 1.11 – Representação esquemática do estator de uma máquina de indução trifásica produzindo um campo magnético girante.

Fonte: elaboração própria (adaptado de SILVEIRA *et al.*).

#### 4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MIT

Inicialmente alimentamos o estator a partir da rede CA, produzindo um campo girante no interior do motor (lembrando pela lei de Ampère: corrente elétrica gera campo magnético). Tal campo atua sobre o rotor, induzindo tensões nas bobinas/barras do rotor pela lei de Faraday-Lenz. Como o rotor é um circuito fechado, circulará corrente pelo mesmo. A interação entre o campo girante e a corrente no rotor produz forças tangenciais ao rotor (ver Figura 1.12) e, conseqüentemente, torque mecânico, de modo que o rotor irá girar a uma velocidade inferior a do campo girante (motor assíncrono).

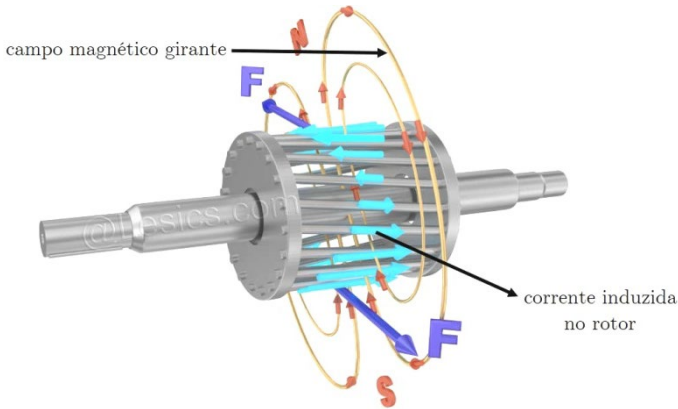


Figura 1.12 – O campo gerado pelo estator atravessa o rotor e induz correntes na gaiola. Uma força surge nas barras (regra da mão direita: indicador no sentido da corrente, dedo médio no sentido do campo e polegar no sentido da força).

Fonte: BARADKAR, 2019.

## 5. VELOCIDADE DO CAMPO GIRANTE

A velocidade do campo girante produzido pelo estator em um motor de indução é dada por:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1.7)$$

Onde:  $n_s$  é a velocidade do campo girante (ou velocidade síncrona) em rpm;  $f$  é a frequência da rede CA em Hz; e  $p$  é o número de polos da máquina.

Pela equação (1.7), podemos concluir que o controle de velocidade do motor de indução pode ser efetuado por meio do controle da frequência ou pela variação do número de polos. O controle pela frequência possibilita uma variação contínua da velocidade, já no controle pelo número de polos, que está condicionado a múltiplos de 2 (2, 4, 6, 8...), a variação é discreta (para 60 Hz, teríamos: 3600 rpm (2 polos), 1800 rpm (4 polos), 1200 rpm (6 polos), e assim por diante).

É importante destacar que a velocidade mecânica do rotor ( $n_R$ ) é ligeiramente inferior à velocidade síncrona (o motor de indução é uma máquina assíncrona). Por outro lado, o campo produzido pelo rotor gira com a mesma velocidade do campo girante produzido pelo estator. Como

isso é possível se  $n_R$  é menor que  $n_S$ ? Isso é possível pois as correntes no rotor apresentam uma determinada frequência, de modo que essa frequência juntamente com a rotação mecânica do rotor faz com que o rotor produza um campo girante que tem a mesma velocidade do campo produzido pelo estator.

## 6. ESCORREGAMENTO

Uma vez que mecanicamente o rotor não gira com a mesma velocidade do campo girante do estator, surge o conceito de *escorregamento* ( $s$ ):

$$s = \frac{n_S - n_R}{n_S} \quad (1.8)$$

E em termos percentuais:

$$s_{\%} = 100 \cdot \left( \frac{n_S - n_R}{n_S} \right) \quad (1.9)$$

A partir da equação (1.8), também podemos escrever:

$$n_R = (1 - s) \cdot n_S \quad (1.10)$$

Teoricamente o escorregamento pode variar entre 0 e 1 (ou, em termos percentuais, entre 0 e 100%). Um escorregamento igual a 0 significa uma operação a vazio e com todas as perdas sendo desprezadas (as correntes no rotor tenderiam a 0). Já um escorregamento igual a 100% ocorre na situação de rotor travado. Na prática, para um motor operando a plena carga, o escorregamento fica em torno de 1 a 7%.

## 7. FREQUÊNCIA DAS TENSÕES INDUZIDAS NO ROTOR

Um motor de indução trabalha induzindo tensões no circuito no rotor e conseqüentemente correntes, pois o circuito elétrico do rotor (gaiola ou bobinas) forma um caminho fechado. Por essa razão, o motor de indução é também denominado algumas vezes de transformador rotativo. Entretanto, diferentemente de um transformador convencional, a frequência no secundário (rotor) não é necessariamente igual à frequência do primário (estator). De forma geral, a frequência das tensões no rotor ( $f_R$ ) pode ser expressa em termos do escorregamento e da frequência do estator:

$$f_R = s \cdot f \quad (1.11)$$

## 8. CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO

Considerando máquinas de mesma potência nominal, podemos afirmar que a corrente de magnetização de um motor de indução é maior do que a de um transformador convencional. Por que isso ocorre? No motor temos a presença de entreferro (região de ar entre o estator e o rotor), fazendo com a relutância do circuito magnético aumente (lembrando: a permeabilidade magnética do ar é baixa comparada com a de materiais ferromagnéticos). Com uma relutância maior, é necessária uma maior corrente de magnetização para a produção de um determinado nível de fluxo magnético e, portanto, a reatância de magnetização ( $X_m$ ) no circuito equivalente de um motor de indução terá um valor menor do que em um transformador convencional. Observando a Figura 1.13, podemos chegar às conclusões aqui apresentadas. Na figura, no eixo  $y$  temos o fluxo magnético e no eixo  $x$  a força magnetomotriz (número de espiras vezes a corrente, e responsável por produzir o campo magnético).

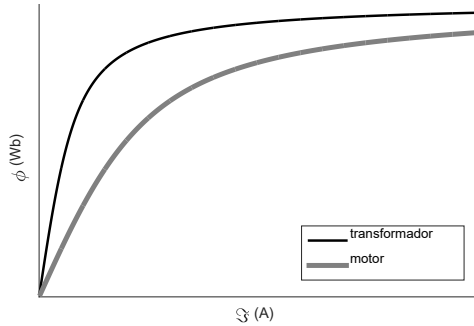


Figura 1.13 – Curva de magnetização de um motor de indução comparada com a de um transformador convencional. Observe que para um mesmo fluxo, o motor requer uma corrente maior do que o transformador.

Fonte: elaboração própria.

## 9. TORQUE MECÂNICO

A potência de saída útil ( $P_{saída}$ ) no eixo de uma máquina girante é dada:

$$P_{saída} = \tau_{carga} \cdot \omega_R \quad (1.12)$$

Onde:  $\tau_{carga}$  é o torque de carga em N.m; e  $\omega_R$  é a velocidade mecânica angular do rotor em rad/s.

Uma vez que  $n_R$  é dado em rpm, como converter rpm para rad/s? Se 1 rotação é igual a  $2\pi$  rad, e 1 minuto é igual a 60 segundos, temos que:

$$\omega_R = n_R \cdot \frac{2\pi}{60} = n_R \cdot \frac{\pi}{30} \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (1.13)$$

## 10. EQUILÍBRIO DINÂMICO

Vamos analisar o equilíbrio dinâmico do motor de indução a partir da seguinte equação:

$$\tau_e - \tau_L = J \cdot \alpha \quad (1.14)$$

Onde:  $\tau_e$  é o torque eletromagnético em N.m;  $\tau_L$  é o torque resistente (potência de saída + perdas mecânicas);  $J$  é o momento de inércia do rotor em  $\text{kg.m}^2$  (depende da estrutura física do rotor); e  $\alpha$  é a aceleração angular  $\text{rad/s}^2$ .

Em uma condição de equilíbrio temos  $\tau_e = \tau_L$ , de modo que  $\alpha = 0$ , ou seja, o motor não está acelerando nem desacelerando e opera com uma velocidade constante. Considerando que o motor opera em regime, duas situações podem ocorrer: a) aumento do  $\tau_L$ ; b) diminuição do  $\tau_L$ . Vamos analisar cada uma delas.

### a) Aumento do $\tau_L$

Se  $\tau_L$  aumenta, momentaneamente o lado esquerdo da equação (1.14) torna-se negativo, e como  $J$  é constante, necessariamente  $\alpha$  torna-se negativo, caracterizando uma desaceleração do rotor. À medida que o rotor desacelera, as correntes no rotor aumentam, aumentando consequentemente o  $\tau_e$  até o ponto em que o equilíbrio é restabelecido ( $\tau_e = \tau_L$  e  $\alpha = 0$ ) e o motor passa a operar com uma velocidade constante e inferior à que antecedeu o aumento de  $\tau_L$ .

### b) Diminuição do $\tau_L$

Se  $\tau_L$  diminui, momentaneamente o lado esquerdo da equação (1.14) torna-se positivo, e como  $J$  é constante, necessariamente  $\alpha$  torna-se positivo, caracterizando uma aceleração do rotor. À medida que o rotor acelera, as correntes no rotor diminuem, diminuindo consequentemente o  $\tau_e$ , até o ponto em que o equilíbrio é restabelecido ( $\tau_e = \tau_L$  e  $\alpha = 0$ ) e o motor passa a operar com uma velocidade constante e superior à que antecedeu a diminuição de  $\tau_L$ .

A Figura 1.14 ilustra de forma genérica o comportamento do torque eletromagnético e da velocidade de um MIT de 4 polos e 60 Hz ao longo da partida. Observe que tanto o torque quanto a velocidade permanecem constantes ( $\tau_e = \tau_L$  e  $\alpha = 0$ ) após certo tempo (regime permanente).

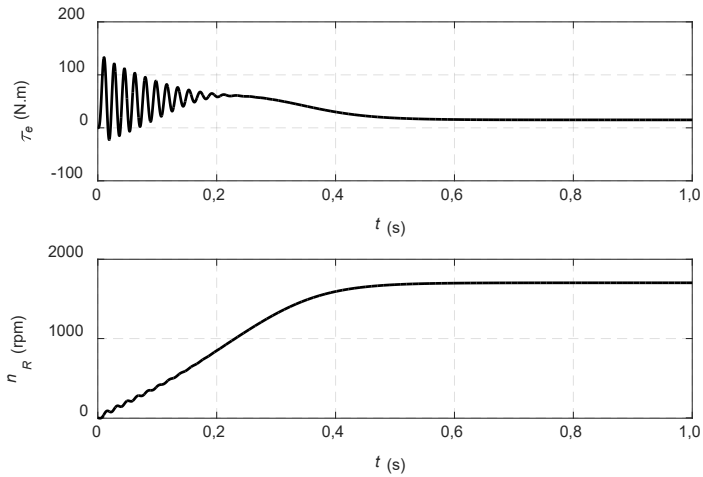


Figura 1.14 – Evolução do torque eletromagnético e da velocidade ao longo da partida de um MIT.

Fonte: elaboração própria.

## 11. FLUXO DE POTÊNCIA

A Figura 1.15 ilustra o fluxo de potência referente ao motor MIT. A descrição de cada grandeza é indicada diretamente na figura.

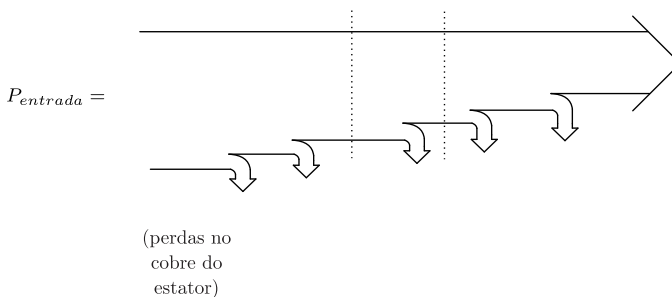


Figura 1.15 – Fluxo de potência do MIT.

Fonte: elaboração própria.

Algumas observações sobre o fluxo de potência:

- a) A potência de entreferro é aquela entregue do estator para o rotor.
- b) Representamos as perdas no núcleo em sua totalidade antes da potência de entreferro, pois as perdas no núcleo do rotor são muito menores que as perdas no núcleo do estator. Lembrando que a frequência no rotor é pequena (equação (1.11)), o que torna as perdas ferromagnéticas menores no mesmo.
- c) Quanto maior a velocidade do motor, maiores são as perdas por atrito, ventilação e suplementares. Por outro lado, menores são as perdas no núcleo. Portanto, essas três categorias de perdas são algumas vezes denominadas perdas rotacionais e são consideradas constantes independente da velocidade.

## 12. RENDIMENTO

O rendimento do motor, assim como nas demais máquinas, é dado pela relação entre a potência útil disponível no eixo ( $P_{saída}$ ) e a potência entregue ao motor (solicitada da rede,  $P_{entrada}$ ). Em termos percentuais temos:

$$\eta_{\%} = 100 \cdot \left( \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \right) \quad (1.15)$$

## 13. CATEGORIA DOS MOTORES DE INDUÇÃO

De forma genérica, a Figura 1.16 ilustra a curva torque *versus* velocidade de motores de indução. É interessante lembrar que a multiplicação do torque em N.m pela velocidade em rad/s nos fornece a potência de saída do motor (equação (1.12)).

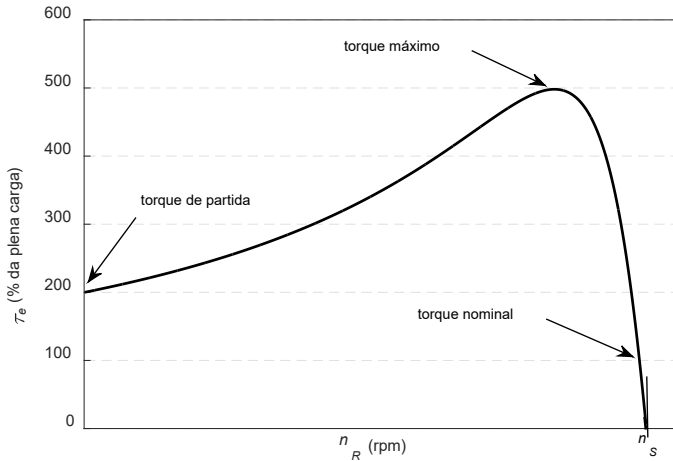


Figura 1.16 – Relação torque *versus* velocidade típica de um motor de indução.  
Fonte: elaboração própria.

Ainda, conforme as suas características de torque em relação à velocidade, e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor gaiola são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Essas categorias são definidas em norma (ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1) e são a seguir descritas.

### **Categoria N**

Torque de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados comercialmente e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes e ventiladores.

### **Categoria H**

Torque de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior torque na partida, como peneiras, transportadores carregadores e cargas de alta inércia.

## Categoria D

Torque de partida alto, corrente de partida normal e alto escorregamento (+ de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de torques de partida muito alto e corrente de partida limitada.

A Figura 1.17 ilustra de forma genérica a relação entre torque e velocidade para os diferentes tipos de categoria.

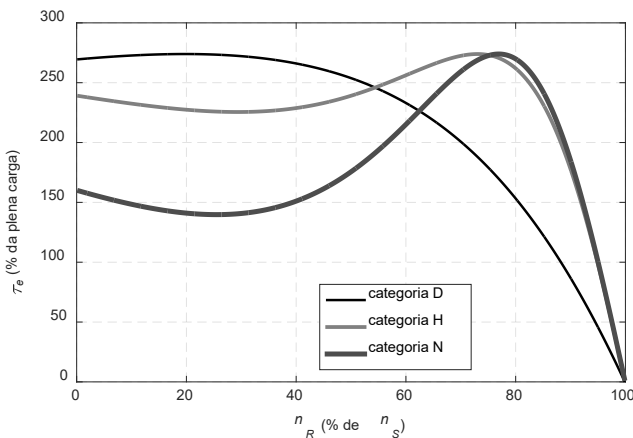


Figura 1.17 – Curvas torque *versus* velocidade para os diferentes tipos de categorias.  
Fonte: elaboração própria.

Em rotores do tipo gaiola, a categoria do motor está diretamente relacionada ao formato das barras da gaiola. Barras de menor espessura fazem com que o rotor apresente uma maior resistência elétrica e conseqüentemente um maior torque de partida e maior escorregamento. Por outro lado, barras de maior espessura fazem com que o rotor apresente uma menor resistência elétrica e conseqüentemente um menor torque de partida e menor escorregamento. A Figura 1.18 ilustra uma chapa do núcleo de um rotor do tipo gaiola com um possível formato para as barras do rotor (que preencherão as ranhuras).

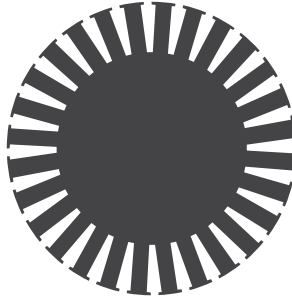


Figura 1.18 – Chapa de um rotor do tipo gaiola. Nas ranhuras são alojadas as barras do rotor.  
Fonte: elaboração própria (adaptado de CHAPMAN, 2013).

O que foi descrito no parágrafo anterior é bem ilustrado pela Figura 1.19, onde é apresentado o efeito da variação da resistência do rotor sobre a característica de torque *versus* velocidade de um motor de indução bobinado.

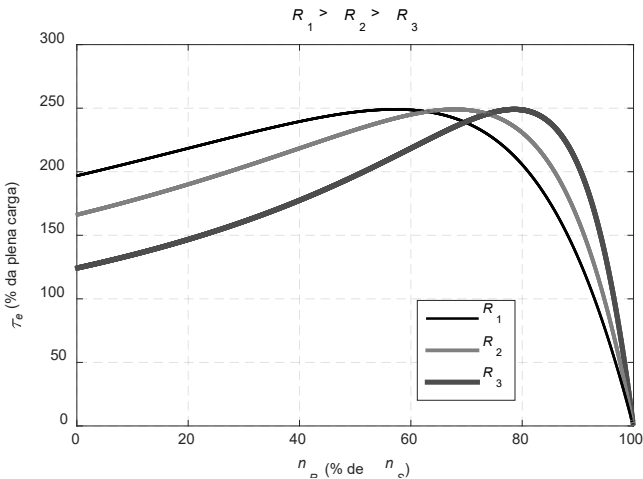


Figura 1.19 – Influência da resistência do rotor na curva torque *versus* velocidade.  
Fonte: elaboração própria.

## 14. PARTIDA DOS MOTORES DE INDUÇÃO

As correntes de partida em motores de indução, em geral, ficam entre 6 a 10 vezes a corrente nominal. Para motores de pequeno porte, esse fator não causa problemas significativos, porém, para motores maiores, esse pico de corrente pode provocar elevadas quedas de tensão e por consequência distúrbios operacionais em equipamentos de comando e proteção.

No caso de motores de indução bobinados, a partida pode ser feita com correntes relativamente baixas inserindo resistências extras ao circuito do rotor durante a partida. Essas resistências não só aumentam o torque de partida, como também reduzem a corrente de partida. Já no caso de motores do tipo gaiola, esse procedimento não é possível, e outros métodos devem ser adotados para a redução da corrente de partida, sendo os principais sendo: chave estrela-triângulo, chave compensadora (utilização de autotransformadores), *soft starter* (chave eletrônica) e inversores. Os três primeiros agem apenas sobre o valor da tensão de alimentação, enquanto o último age sobre o valor da tensão de alimentação e sobre a frequência (controle da velocidade e do torque).

Para os três primeiros métodos, é importante compreender que a corrente de partida é reduzida de forma diretamente proporcional à diminuição da tensão de alimentação, ao passo que o torque de partida diminui com o quadrado da tensão (ver Figura 1.20). Portanto, se o motor for usado com uma carga acoplada ao seu eixo, então poderemos aplicar apenas um valor limitado de redução da tensão (e consequentemente da corrente).

Na Figura 1.20, com linha menos espessa, temos a característica torque *versus* velocidade de um motor hipotético para alimentação com tensão nominal, e com linha mais espessa, a característica para o caso de uma redução da tensão de alimentação. Observe que na segunda situação (redução para 67% do valor nominal da tensão), o torque de partida ficou em torno de 45% do valor a plena tensão, assumindo algo em torno de 90% do torque nominal da máquina. Dessa forma, podemos concluir que esse motor não poderia partir com carga nominal acoplada ao eixo caso a redução de tensão fosse conforme a descrita.

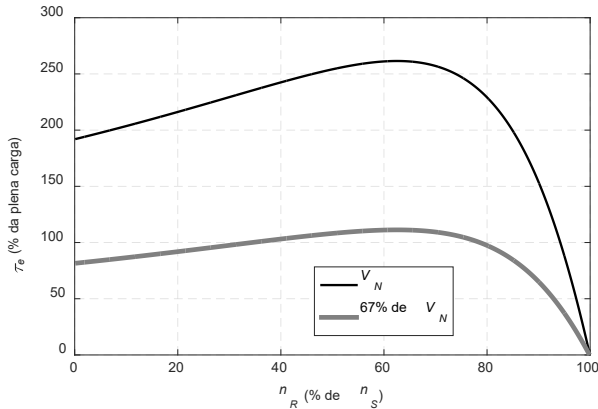


Figura 1.20 – Influência da redução da tensão de alimentação na característica torque *versus* velocidade.

Fonte: elaboração própria.

## 15. CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT

O circuito equivalente por fase do MIT está representado na Figura 1.21. A tensão de alimentação  $\dot{V}_1$  é a tensão de fase em termos fasoriais, a qual assumimos com ângulo  $0^\circ$  (referência). O parâmetro  $R_1$  é obtido por meio da medição direta da resistência dos enrolamentos do estator (uso de um miliohmímetro);  $X_1$ ,  $R_2$  e  $X_2$  são obtidos por meio do ensaio de rotor travado;  $R_p$  e  $X_m$  são obtidos por meio do ensaio a vazio; e  $s$  é o escorregamento.

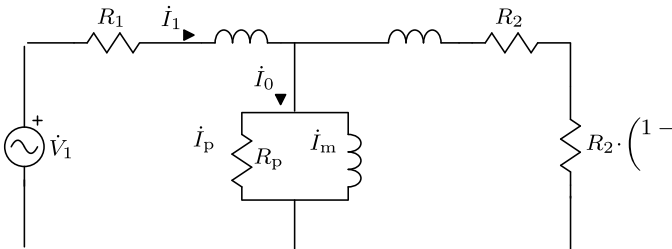


Figura 1.21 – Circuito equivalente por fase do MIT.

Fonte: elaboração própria.

Resumindo, os elementos do circuito equivalente são:

$R_1$ : resistência do enrolamento do estator;

$X_1$ : reatância de dispersão do enrolamento do estator;

$R_p$ : resistência que representa as perdas no núcleo (ferromagnéticas);

$X_m$ : reatância de magnetização da máquina;

$R_2$ : resistência do enrolamento (ou barras) do rotor, referida ao estator;

$X_2$ : reatância de dispersão do enrolamento (ou barras) do rotor, referida ao estator;

$R_2 \cdot [(1-s)/s]$ : resistência de carga (representa a carga mecânica acoplada ao eixo).

O passo-a-passo para a resolução do circuito equivalente será apresentado por meio do exemplo a seguir.

**Exemplo:** Um MIT de 4 polos, 60 Hz, 380 V, ligado em Y, opera a uma velocidade de 1750 rpm, com o circuito equivalente dado na Figura 1.22. Sabendo que suas perdas mecânicas (perdas por atrito e ventilação) totalizam 20 W, determine:

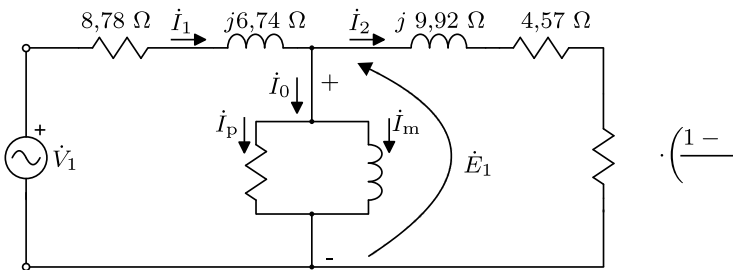


Figura 1.22 – Circuito equivalente do MIT para o exemplo a ser resolvido.

Fonte: elaboração própria.

### a) O escorregamento ( $s$ )

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{n_s - n_R}{n_s} = \frac{1800 - 1750}{1800} = 0,0278 \text{ (2,78\%)}$$

**b) A impedância equivalente**

Para o ramo série referente ao rotor temos:

$$\dot{Z}_2 = 4,57 + j9,92 + 4,57 \cdot \left( \frac{1 - 0,0278}{0,0278} \right) = (164,39 + j9,92) \Omega$$

Para o ramo de magnetização referente ao núcleo temos:

$$\dot{Z}_0 = 2703 // j272 = \left( \frac{2703 \cdot j272}{2703 + j272} \right) = (27,10 + j269,27) \Omega$$

Para o ramo série referente ao estator temos:

$$\dot{Z}_1 = (8,78 + j6,74) \Omega$$

A impedância equivalente é dada por:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{eq}} &= \dot{Z}_1 + (\dot{Z}_0 // \dot{Z}_2) \\ \dot{Z}_{\text{eq}} &= (8,78 + j6,74) + \left[ \frac{(27,10 + j269,27) \cdot (164,39 + j9,92)}{(27,10 + j269,27) + (164,39 + j9,92)} \right] \\ \dot{Z}_{\text{eq}} &= (120,24 + j76,80) \Omega \end{aligned}$$

**c) A tensão de fase de entrada**

Como o motor está ligado em Y e  $V_L = 380$  V, temos:

$$\dot{V}_1 = \frac{380}{\sqrt{3}} \boxed{0^\circ} = 219,393 \angle 0^\circ \text{ V}$$

**d) A corrente de fase e o módulo da corrente de linha**

Lembrando que o circuito equivalente é por fase, portanto, todas as variáveis obtidas por meio do mesmo são valores de fase.

A corrente de fase será dada por:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}_{eq}} = \frac{219,393 \angle 0^\circ}{120,24 + j76,80} = 1,538 \angle -32,57^\circ \text{ A}$$

Como a ligação é Y, temos que  $I_L = I_F$ , logo o módulo da corrente de linha será 1,538 A.

### e) O fator de potência

O fator de potência (FP) é dado pelo cosseno entre os fatores  $\dot{V}_1$  e  $\dot{I}_1$ , logo:

$$\begin{aligned} \text{FP} &= \cos[\angle(\dot{V}_1, \dot{I}_1)] = \cos(32,57^\circ) \\ \text{FP} &= 0,843 \text{ (atrasado)} \end{aligned}$$

### f) A força eletromotriz induzida no enrolamento do estator

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{I}_1 \cdot (\dot{Z}_0 // \dot{Z}_2) \\ \dot{E}_1 &= 1,538 \angle -32,57^\circ \cdot \left[ \frac{(27,10 + j269,27) \cdot (164,39 + j9,92)}{(27,10 + j269,27) + (164,39 + j9,92)} \right] \\ \dot{E}_1 &= 202,477 \angle -0,418^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Ou ainda:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{V}_1 - \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_1 \\ \dot{E}_1 &= 219,393 \angle 0^\circ - (1,538 \angle -32,57^\circ) \cdot (8,78 + j6,74) \\ \dot{E}_1 &= 202,438 \angle -0,415^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

### g) A corrente de excitação

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_0} = \frac{202,477 \angle -0,418^\circ}{27,10 + j269,27} = 0,748 \angle -84,67^\circ \text{ A}$$

### h) A corrente de perdas no núcleo

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{E}_1}{R_p} = \frac{202,477 \angle -0,418^\circ}{2703} = 0,075 \angle -0,418^\circ \text{ A}$$

**i) A corrente de magnetização**

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_1}{jX_m} = \frac{202,477\angle -0,418^\circ}{j272} = 0,744\angle -90,418^\circ \text{ A}$$

**j) A corrente do rotor referida ao estator**

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_2} = \frac{202,477\angle -0,418^\circ}{164,39 + j9,92} = 1,229\angle -3,87^\circ \text{ A}$$

Ou ainda:

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \dot{I}_1 - \dot{I}_0 = 1,538\angle -32,57^\circ - 0,748\angle -84,67^\circ \\ \dot{I}_2 &= 1,229\angle -3,88^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

**k) As potências ativa e reativa absorvidas da rede**

$$\begin{aligned} \dot{S}_{3\phi} &= 3 \cdot \dot{V}_1 \cdot \dot{I}_1^* = 3 \cdot (219,393\angle 0^\circ) \cdot (1,538\angle 32,57^\circ) \\ \dot{S}_{3\phi} &= (853,08 + j544,94) \text{ VA} \end{aligned}$$

Portanto, a potência ativa é da ordem de 853,08 W e a reativa da ordem de 544,94 VAR.

**l) A perda Joule no enrolamento do estator**

$$P_{J,e} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 8,78 \cdot 1,538^2 = 62,31 \text{ W}$$

**m) A perda Joule no enrolamento do rotor**

$$P_{J,r} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 3 \cdot 4,57 \cdot 1,229^2 = 20,71 \text{ W}$$

**n) A perda no núcleo do motor**

$$P_{fe} = 3 \cdot R_p \cdot I_p^2 = 3 \cdot 2703 \cdot 0,075^2 = 45,61 \text{ W}$$

**o) A potência entregue ao rotor**

$$P_{ef} = P_{entrada} - (P_{J,e} + P_{fe})$$

$$P_{ef} = 853,08 - (62,31 + 45,61) = 745,16 \text{ W}$$

**p) A potência disponível no eixo**

$$P_{conv} = P_{ef} - P_{J,r} = 745,16 - 20,71 = 724,45 \text{ W}$$

**q) A potência de saída**

$$P_{saída} = P_{conv} - P_{a,v} = 724,45 - 20 = 704,45 \text{ W } (\cong 0,96 \text{ CV})$$

**r) O torque no eixo do motor**

$$\tau_e = \frac{P_{conv}}{\omega_R} = \frac{724,45}{\left[1750 \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right)\right]} = 3,95 \text{ N.m}$$

**s) O rendimento**

$$\eta_{\%} = 100 \cdot \left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}\right) = 100 \cdot \left(\frac{704,45}{853,08}\right) = 82,58 \%$$

**16. MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS**

Os motores de indução monofásicos são os mais utilizados em aplicações domésticas, sendo normalmente utilizados para potências de até 10 CV.

Quando comparados com motores trifásicos de mesma potência, apresentam menor torque de partida, menor rendimento e menor fator de potência. Também são mais caros e ruidosos e alcançam apenas de 60% a 70% da potência nominal de motores trifásicos de mesmo porte. Por esses motivos, sempre é preferível utilizar um motor trifásico em detrimento de um monofásico quando há disponibilidade de rede trifásica de alimentação.

Os motores monofásicos apresentam dois enrolamentos perpendiculares: principal e auxiliar (para a partida). O enrolamento principal produz um campo pulsante em uma direção. Matematicamente o campo pulsante pode ser decomposto em dois campos girantes de sentidos opostos (horário e anti-horário – ver Figura 1.23). A interação entre esses dois campos e as correntes induzidas no rotor produzem torques opostos e, portanto, nas condições de circuito monofásico, o motor não arrancará. Então, como proceder para que a partida ocorra? Uma possibilidade, pouco prática, seria acionar o motor a partir de determinada velocidade, de modo que o motor arranque no sentido da velocidade inicial. No entanto, dessa forma, o motor não seria capaz de arrancar por si só. O que realmente ocorre na prática é que o motor é projetado com um enrolamento auxiliar disposto de  $90^\circ$  no espaço em relação ao principal, como já mencionado anteriormente, e que é alimentado por uma corrente também defasada em relação à corrente do enrolamento principal. Assim, temos a formação de um campo girante semelhante ao descrito no item 3 deste Capítulo para o caso bifásico (ver Figura 1.6). Por outro lado, a rede monofásica pode ser interpretada com uma única fonte de tensão, por si só incapaz de produzir tensões defasadas de  $90^\circ$  no tempo como em um sistema bifásico. E a pergunta que surge é: como produzir correntes defasadas nos enrolamentos? A pergunta será respondida pela descrição dos diferentes tipos de motores de indução monofásicos disponíveis comercialmente e a seguir apresentados.

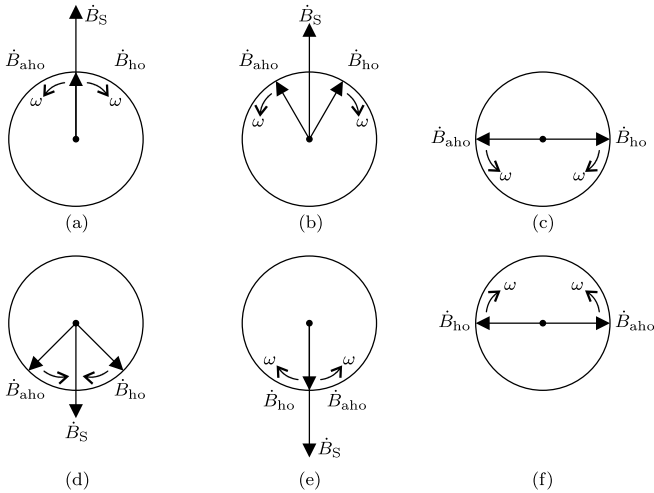


Figura 1.23 – Decomposição de um campo magnético pulsante em dois campos girantes com sentidos opostos (horário e anti-horário).

Fonte: elaboração própria (adaptada de CHAPMAN, 2013).

## Motor de fase dividida

Nesse tipo de motor a defasagem entre as correntes dos enrolamentos, principal e auxiliar (ver Figura 1.24), é obtida por meio das diferenças nas impedâncias dos próprios enrolamentos.

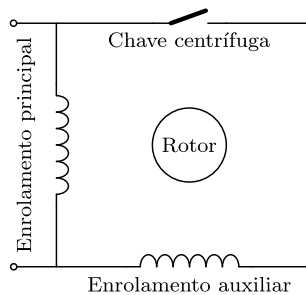


Figura 1.24 – Representação do motor de fase dividida.

Fonte: elaboração própria.

O enrolamento auxiliar é projetado de forma a possuir poucas espiras de condutor com reduzida seção transversal, fazendo com que o enrolamento tenha uma alta resistência e baixa reatância. Já o enrolamento principal é projetado de forma a possuir um maior número de espiras de condutor com maior seção, fazendo com que o enrolamento tenha uma baixa resistência e alta reatância. Essas considerações podem ser concluídas a partir das equações que determinam a resistência e indutância de uma bobina:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.16)$$

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (1.17)$$

Onde:  $R$  é a resistência da bobina em  $\Omega$ ;  $\rho$  é a resistividade do condutor em  $\Omega \cdot m$ ;  $l$  é o comprimento do condutor em m;  $S$  é a seção transversal do condutor em  $m^2$ ;  $L$  é a indutância da bobina em H;  $N$  é o número de espiras da bobina; e  $\mathfrak{R}$  é a relutância do caminho magnético em A/Wb.

Considerando o descrito anteriormente, ao alimentarmos os enrolamentos principal e auxiliar a partir da rede monofásica (estarão submetidos à mesma tensão), as correntes percorrem os enrolamentos com defasagens definidas pelas impedâncias dos mesmos.

Outro fato importante a mencionar é que esse tipo de motor apresenta uma chave centrífuga, que tem a função de desligar o enrolamento auxiliar após a partida, pois esse é projetado para operar apenas por um curto intervalo de tempo. Caso o enrolamento permanecesse energizado, aqueceria ao ponto de perder sua isolamento causando danos à máquina. A chave centrífuga normalmente atua quando o motor atinge em torno de 80% da velocidade nominal.

### **Motor com capacitor de partida**

Nesse tipo de motor a defasagem entre as correntes dos enrolamentos, principal e auxiliar, é obtida pela inserção de um capacitor no circuito auxiliar.

A escolha apropriada do capacitor possibilita uma melhor defasagem entre os campos (podendo atingir  $90^\circ$  no caso ideal) e, conseqüentemente, melhor torque de partida.

Novamente temos a presença da chave centrífuga com a função de desconectar o enrolamento auxiliar após a partida.

A Figura 1.25 ilustra a placa de um motor com capacitor de partida e a Figura 1.26 as possíveis ligações que podem ser efetuadas para o motor em questão. Uma vez que o motor apresentado possui o enrolamento auxiliar dividido em duas bobinas, as mesmas podem ser conectadas em série ou paralelo para adequar à tensão de alimentação.

~ 1	kW (HP-cv) 0,37 (1/2)	
RPM 1720	REG S1	
110/220 V	60 HZ	FS 1,25
8,40/4,60 A	ISOL	AMB $40^\circ$ C
IFS 9,20/4,60 A	IP 21	
REND	IP/IN 5,3	
CAP. 1X216-259 $\mu$ F 110 V		
MENOR TENSÃO		MAIOR TENSÃO
PARA INVERTER A ROTAÇÃO TROCAR 5 PELO 8		
1 - AZUL	2 - BRANCO	3 - LARANJA
4 - AMARELO	5 - PRETO	8 - VERMELHO

Figura 1.25 – Placa de um motor monofásico de 6 terminais. A inversão do sentido de rotação é realizada invertendo a ligação do enrolamento auxiliar (5 – 8).

Fonte: elaboração própria.

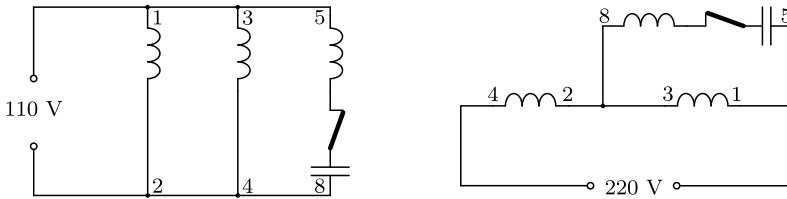


Figura 1.26 – Ligações possíveis para o motor com placa conforme Figura 1.25.  
 Fonte: elaboração própria.

### Motor com capacitor permanente

Nesse tipo de motor a defasagem entre as correntes dos enrolamentos, principal e auxiliar, é também obtida por conta da inserção de um capacitor no circuito auxiliar, porém, diferente do motor descrito anteriormente, o enrolamento auxiliar permanece energizado durante todo o período de funcionamento do motor e não somente na partida, descartando, assim, a presença da chave centrífuga (ver Figura 1.27).

A permanência do capacitor faz com que o torque seja mais regular durante o funcionamento. Já em termos de torque de partida, o motor com capacitor permanente encontra-se entre os dois tipos de motores apresentados anteriormente.

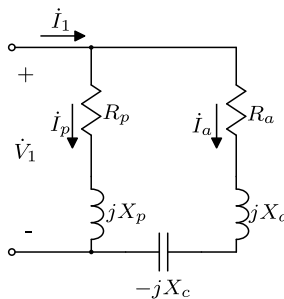


Figura 1.27 – Representação do motor com capacitor permanente.  
 Fonte: elaboração própria.

## Motor com duplo capacitor

Entre todos os tipos de motores monofásicos aqui descritos, esse último apresenta as melhores características, aliando alto torque de partida com torque de operação mais regular, além da melhora no fator de potência. A principal desvantagem está relacionada ao custo.

A Figura 1.28 ilustra a representação do motor com duplo capacitor. Observe na figura a presença da chave centrífuga com a função de desacoplar o capacitor de partida do circuito auxiliar após a partida do motor.

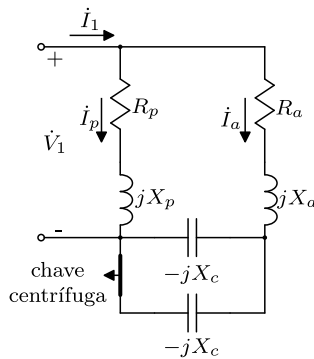


Figura 1.28 – Representação do motor com duplo capacitor.

Fonte: elaboração própria.

## EXERCÍCIOS

1. Cite pelo menos três características do MIT que justifiquem o porquê do MIT ser o motor elétrico mais utilizado nas instalações elétricas industriais.
2. Comente sobre os principais componentes do MIT.
3. Se no momento da partida apenas um dos enrolamentos do estator de um MIT for energizado, haverá campo girante? Justifique sua resposta.
4. Explique de forma sucinta o princípio de funcionamento do MIT.
5. Comente a respeito das perdas presentes no funcionamento de um MIT.
6. Por que o MIT é também conhecido como motor assíncrono?
7. Qual a velocidade do campo girante (em rpm e em rad/s) para um MIT de 8 polos conectado a uma rede CA com frequência de 60 Hz.
8. Operando em regime permanente, explique o que acontece com o torque eletromagnético produzido pelo MIT caso ocorra um aumento do torque resistente.
9. Um MIT deve acionar uma carga mecânica cujo torque resistente é igual a 30 N.m. Sabe-se que o motor possui as seguintes características: torque de partida igual a 50 N.m, torque máximo igual a 80 N.m e torque nominal igual a 45 N.m. Para que a corrente no processo de partida não seja muito elevada, optou-se por alimentar o motor com 75% da tensão nominal. Essa redução na tensão de alimentação é adequada? Justifique sua resposta.
10. Um MIT de 4 polos, 60 Hz, opera com 50 % da carga nominal e gira a uma velocidade de 1780 rpm. Calcular o escorregamento percentual para essa situação.

**11.** Calcular a frequência das tensões induzidas no rotor de um MIT de 4 polos, 60 Hz, girando com as seguintes velocidades:

- a) 1800 rpm;
- b) 1700 rpm;
- c) 0 rpm (partida).

**12.** Um motor de indução está funcionando nas condições nominais. Se a carga no eixo for aumentada, como serão alteradas as seguintes grandezas:

- a) velocidade mecânica;
- b) escorregamento;
- c) tensão induzida no rotor;
- d) corrente no rotor;
- e) frequência do rotor;
- f) perdas no cobre;
- g) velocidade síncrona.

**13.** Um MIT de 20 CV, 4 polos, 60 Hz, opera com 50 % da plena carga a uma velocidade de 1770 rpm. Dessa forma, determine qual o torque no eixo do motor.

**14.** Complete a Figura 1.29, indicando o sentido das correntes para cada instante de tempo, bem como o vetor indução magnética no centro da máquina. Ainda, qual o sentido (horário ou anti-horário) do campo girante?

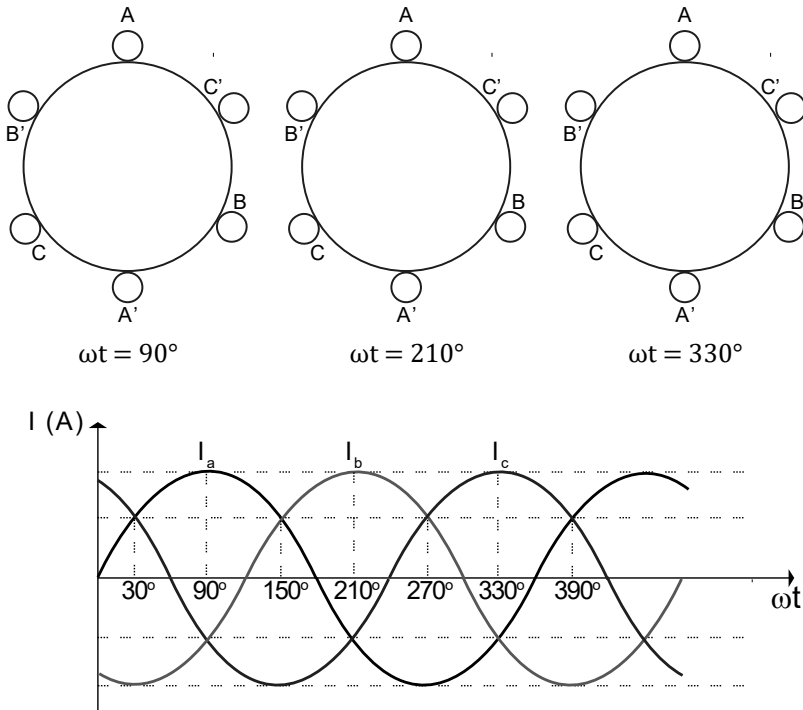


Figura 1.29 – Representação do motor trifásico e correntes trifásicas instantâneas.

Fonte: elaboração própria.

**15.** Qual a função da chave centrífuga em motores de indução monofásicos.

**16.** Comente de forma sucinta sobre os tipos de motores de indução monofásicos.

**17.** Um motor de indução monofásico com 4 polos, 60 Hz, opera com uma velocidade de 1730 rpm e tem o circuito representado na Figura 1.30. Dessa forma, determine:

- a) a velocidade do campo girante;
- b) o escorregamento;
- c) desconsiderando a presença do capacitor no circuito, a defasagem entre as correntes do enrolamento principal e auxiliar;

d) o valor do capacitor de partida para que a defasagem entre as correntes seja de  $90^\circ$  (caso ideal).

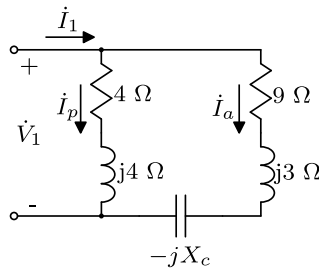


Figura 1.30 - Circuito referente a um motor monofásico.

Fonte: elaboração própria.

**18.** Um motor de indução de 220 V, 4 polos, 60 Hz, ligado em Y e de rotor bobinado tem potência nominal de 50 CV. Os componentes do seu circuito equivalente são:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,100\Omega & R_2 &= 0,070\Omega & R_p &= 86,4\Omega \\ X_1 &= 0,210\Omega & X_2 &= 0,210\Omega & X_m &= 10,0\Omega \\ & & & & P_{a,v} &= 500W \end{aligned}$$

Para um escorregamento de 0,05, encontre:

- a corrente de linha  $I_L$ ;
- o rendimento da máquina.

# Capítulo 2

## Motores de Indução: Prática

### 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais ensaios possíveis de ser realizadas em laboratório. Evidentemente, além das atividades aqui apresentadas, outras são possíveis. Dito isso, nosso enfoque será apresentar práticas que visam obter os parâmetros do circuito equivalente apresentado no capítulo anterior para o MIT e também a prática que estabelece o funcionamento do MIT com carga acoplada ao eixo. Ao final do capítulo, também são propostos alguns exercícios.

### 2. IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS DE PLACA

A primeira atividade prática a ser realizada é a identificação e interpretação dos dados de placa de um MIT. Para isso, iremos considerar a placa ilustrada na Figura 2.1 e a partir dela detalhar as informações relevantes apresentadas pela placa em questão.

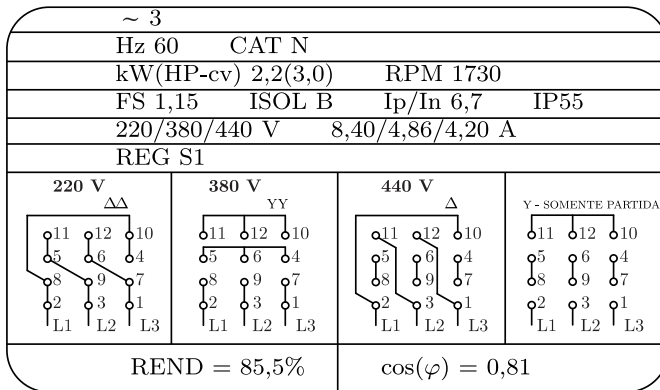


Figura 2.1 – Placa de um MIT comercial.

Fonte: elaboração própria.

**Hz:** indica a frequência nominal do motor. Para a placa analisada, temos 60 Hz.

**CAT:** indica a categoria do motor em relação à característica torque *versus* velocidade. Para a placa analisada, temos categoria N.

**kW (HP-cv):** é o valor da potência de saída do motor em duas unidades. Para a placa analisada, temos 2,2 kW e 3,0 HP (ou cv).

**RPM:** indica o número de rotações por minuto desenvolvido pelo eixo do motor para a situação de carga nominal. Para a placa analisada, temos 1730 rpm.

**FS:** o FS (Fator de Serviço) indica o acréscimo de potência que pode ser aplicada ao motor sem que ocorram danos ao mesmo. Para a placa analisada, temos um FS de 1,15.

**ISOL:** indica a classe de isolamento do motor, a qual define a temperatura máxima suportada pelas bobinas. Para a placa analisada, temos uma classe B (temperatura limite de 130°).

**Ip/In:** indica o número de vezes que a corrente de partida é superior à corrente nominal. Para a placa analisada, por exemplo, a corrente nominal do motor é de 8,40 A em 220 V e, nesse caso, a corrente de partida é igual a 56,28 A, pois  $I_p/I_n$  é igual a 6,7.

**IP:** o IP (Índice de Proteção) indica a proteção do equipamento contra agentes externos, tais como resíduos sólidos, poeira e água. O primeiro algarismo indica a proteção contra sólidos e o segundo contra água. Para a placa analisada, temos um IP de 55 (protegido contra poeira e jato de água).

**Tensão nominal:** indica as tensões de trabalho do motor. Para a placa analisada, temos 220/380/440 V. Observe que o motor apresenta 12 terminais possibilitando quatro configurações diferentes de ligação ( $\Delta\Delta$ , YY,  $\Delta$  e Y). A última ligação estaria associada a uma tensão de 760 V, no entanto, a máquina não foi projetada para esse nível de tensão, de modo que essa

ligação só pode ser efetuada na partida ao ser alimentada em 440 V (redução da tensão de alimentação) e posterior conexão para a ligação  $\Delta$  (chave estrela-triângulo).

**Corrente nominal:** indica as correntes de trabalho de acordo com a tensão de alimentação do motor (que depende da forma de ligação). Para a placa analisada, temos 8,40/4,86/4,20 A.

**REG:** indica o regime de operação do motor. Para a placa analisada, temos regime S1 (contínuo, sob carga constante).

**REND. %:** indica o rendimento do motor nas condições de carga nominal. Para a placa analisada, temos 85,5%.

**cos $\phi$ :** indica o fator de potência do motor nas condições de carga nominal. Para a placa analisada, temos 0,81.

### 3. MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA POR FASE DO ESTATOR

Os objetivos desse ensaio são:

- a) testar a continuidade dos enrolamentos;
- b) medir a resistência por fase dos enrolamentos.

Este ensaio pode ser realizado com o uso de um miliohmímetro ou pelo método do Volt-Ampère (uso de fonte CC variável).

Após a medição da resistência nas três fases, calcula-se o valor médio obtido para a temperatura ambiente e corrige-se o valor para uma temperatura de referência (na qual o motor irá operar na prática), conforme segue:

$$R_{\text{ref}} = R_{\text{amb}} \cdot \left( \frac{k+T_{\text{ref}}}{k+T_{\text{amb}}} \right) \quad (2.1)$$

Onde:  $R_{\text{ref}}$  é a resistência na temperatura de referência em  $\Omega$ ;  $R_{\text{amb}}$  é a resistência na temperatura ambiente em  $\Omega$ ;  $T_{\text{ref}}$  é a temperatura de referência em  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{amb}}$  é a temperatura ambiente em  $^{\circ}\text{C}$ ; e  $k$  é a constante referente ao material na qual a bobina é feita (para o cobre temos  $k = 234,5$ ).

#### 4. ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO

No ensaio com rotor bloqueado, também denominado ensaio de curto-circuito, assumimos que o escorregamento é igual a 1 ( $n_R = 0$ ). Dessa forma, a resistência que representa a carga acoplada ao eixo do motor assume valor zero no circuito equivalente, ou seja, é considerada um curto-circuito, conforme pode ser observado na Figura 2.2.

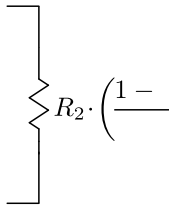


Figura 2.2 – Análise da resistência que representa a carga mecânica acoplada ao eixo do MIT para o caso do rotor bloqueado.

Fonte: elaboração própria.

Sendo assim, assumimos uma simplificação para o circuito equivalente do MIT, conforme mostra a Figura 2.3. Na figura o ramo em paralelo do circuito equivalente é representado em aberto, de modo que as perdas ferromagnéticas são desprezadas. Observe também que apenas as resistências do estator e rotor, juntamente com as reatâncias de dispersão serão responsáveis por limitar a corrente. Devido a esse fato, é esperado que uma tensão bem abaixo da tensão nominal já seja suficiente para fazer circular corrente nominal pelos enrolamentos do estator. A tensão reduzida também facilita o bloqueio do rotor, visto que o torque de partida existente é drasticamente reduzido (depende do quadrado da tensão como vimos no capítulo anterior).

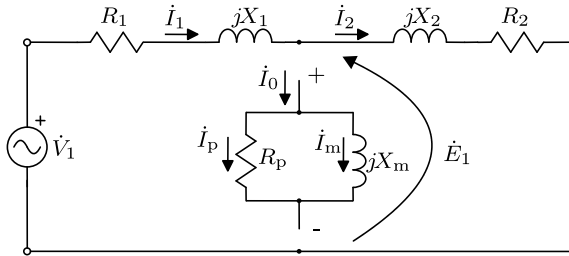


Figura 2.3 – Circuito equivalente referente ao ensaio com rotor bloqueado.

Fonte: elaboração própria.

Os objetivos desse ensaio são:

- determinar as perdas no cobre;
- determinar o fator de potência com rotor bloqueado;
- determinar os parâmetros  $R_2$ ,  $X_1$  e  $X_2$  do circuito equivalente.

O esquema de ligação para esse ensaio, a partir do método dos dois wattímetros para determinação da potência ativa, é apresentado na Figura 2.4.

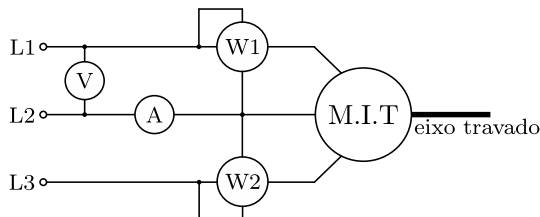


Figura 2.4 – Esquema de ligação para o ensaio com rotor travado.

Fonte: elaboração própria.

Os procedimentos para a realização desse ensaio são:

- com o rotor travado, aumentar gradativamente a tensão aplicada aos enrolamentos do estator até circular corrente nominal (corrente de linha);
- medir a tensão aplicada, a corrente e a potência ativa total absorvida da rede;
- com os valores medidos, determinar:  $P_{\text{cobre}}$ , FP,  $R_2$ ,  $X_1$  e  $X_2$ .

A seguir é apresentado o formulário referente ao ensaio. O mesmo é resultado direto da análise do circuito apresentado na Figura 2.3, lembrando que  $V_1$  e  $I_1$  são valores de fase.

$$P_{1\phi} = \frac{W_1 + W_2}{3} \quad (2.2)$$

$$P_{1\phi} = I_1^2 \cdot R_{\text{eq}} = I_1^2 \cdot (R_1 + R_2) \quad (2.3)$$

$$R_2 = \frac{P_{1\phi}}{I_1^2} - R_1 \quad (2.4)$$

$$\text{FP} = \frac{P_{1\phi}}{V_1 \cdot I_1} \quad (2.5)$$

$$Z_{\text{eq}} = \frac{V_1}{I_1} \quad (2.6)$$

$$X_{\text{eq}} = \sqrt{Z_{\text{eq}}^2 - R_{\text{eq}}^2} \quad (2.7)$$

$$X_{\text{eq}} = X_1 + X_2 \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} \text{categoria N: } X_1 = 0,68 \cdot X_2 \\ \text{categoria H: } X_1 = 0,58 \cdot X_2 \\ \text{categoria D: } X_1 = 0,78 \cdot X_2 \end{cases} \quad (2.9)$$

## 5. ENSAIO COM ROTOR LIVRE

No ensaio com rotor livre, também denominado ensaio a vazio, assumimos que o escorregamento é igual a 0 ( $n_R = n_S$ ). Dessa forma, a resistência que representa a carga acoplada ao eixo do motor assume valor infinito no circuito equivalente, ou seja, é considerada um circuito aberto, conforme pode ser observado na Figura 2.5.

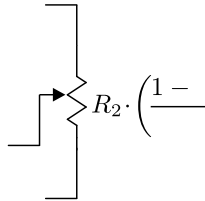


Figura 2.5 – Análise da resistência que representa a carga mecânica acoplada ao eixo do MIT para o caso do rotor livre.

Sendo assim, assumimos uma simplificação para o circuito equivalente do MIT, conforme mostra a Figura 2.6. Na figura, o ramo em série referente ao rotor do circuito equivalente é representado em aberto, de modo que  $I_2 = 0$ .

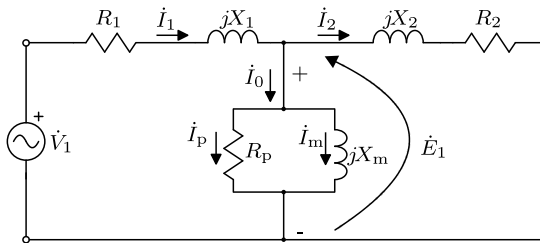


Figura 2.6 – Circuito equivalente referencial ao ensaio com rotor livre.  
Fonte: elaboração própria.

Os objetivos desse ensaio são:

- determinar a corrente de magnetização;
- determinar as perdas ferromagnéticas e mecânicas;
- determinar o fator de potência a vazio;
- determinar os parâmetros  $R_p$  e  $X_m$  do circuito equivalente.

O esquema de ligação para esse ensaio, a partir do método dos dois wattímetros para determinação da potência ativa, é igual ao apresentado na Figura 2.4, porém com o rotor livre ao invés de travado.

Os procedimentos para a realização desse ensaio são:

- com o motor a vazio (sem carga no eixo), aplicar tensão nominal ao enrolamento do estator;
- reduzir gradativamente a tensão de alimentação até o ponto que corrente requerida pelo motor comece a aumentar ao invés de diminuir (isso ocorre, pois, a permeabilidade do material ferromagnético é menor no início da curva  $B(H)$ );
- traçar o gráfico das perdas ferromagnéticas ( $P_{fe}$ ) mais perdas mecânicas ( $P_{a,v}$ ), soma das potências dos dois wattímetros, em função da tensão de alimentação, extrapolando o gráfico até o eixo das coordenadas, obtendo as perdas mecânicas do motor (ver Figura 2.7).

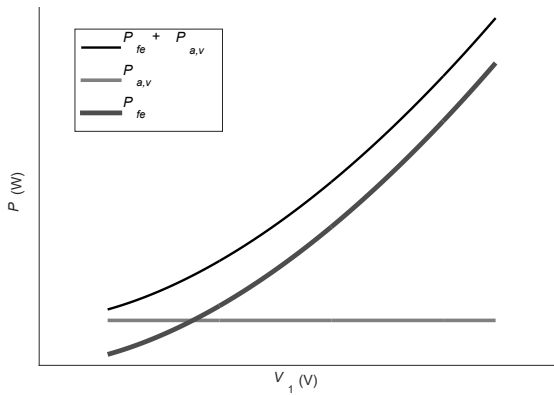


Figura 2.7 – Determinação das perdas mecânicas via análise gráfica.

Fonte: elaboração própria.

A seguir é apresentado o formulário referente ao ensaio. O mesmo é resultado direto da análise do circuito apresentado na Figura 2.6, lembrando que  $V_1$  e  $I_1$  são valores de fase. Para o fasor  $\check{V}_1$  assume o ângulo  $0^\circ$  (referência).

$$P_{1\phi} = \frac{W_1 + W_2}{3} \quad (2.10)$$

$$FP = \frac{P_{1\phi}}{V_1 \cdot I_1} \quad (2.11)$$

$$\dot{I}_1 = I_1 \angle \arccos(FP) \quad (2.12)$$

$$\dot{E}_1 = \dot{V}_1 - \dot{I}_1 \cdot (R_1 + jX_1) \quad (2.13)$$

$$P_{R_p} = P_{1\phi} - I_1^2 \cdot R_1 - \frac{P_{av}}{3} \quad (2.14)$$

$$R_p = \frac{E_1^2}{P_{R_p}} \quad (2.15)$$

$$I_m = \sqrt{I_1^2 - \left(\frac{E_1}{R_p}\right)^2} \quad (2.16)$$

$$X_m = \frac{E_1}{I_m} \quad (2.17)$$

## 6. ENSAIO COM CARGA

No ensaio com carga o escorregamento varia conforme a carga acoplada ao eixo do motor. Em laboratório normalmente a carga mecânica acoplada ao eixo é simulada por meio de um freio de Foucault ou acoplando o eixo do MIT ao eixo de um gerador de corrente contínua que alimenta cargas resistivas. De ambas as formas é possível impor torques resistentes

variáveis o que possibilita avaliar o desempenho do MIT em condições diversas de carregamento.

Os objetivos desse ensaio são:

- a) determinar a variação da velocidade, do torque eletromagnético, do rendimento percentual e do fator de potência do motor, em função da variação da carga mecânica acoplada ao eixo.

O esquema de ligação para esse ensaio, a partir do método dos dois wattímetros para determinação da potência ativa, é igual ao apresentado na Figura 2.4, porém com carga mecânica acoplada ao rotor ao invés do mesmo estar travado.

Os procedimentos para a realização desse ensaio são:

- a) aplicar tensão nominal ao enrolamento do estator;
- b) variar a carga mecânica acoplada ao eixo do motor, medindo a tensão aplicada (manter constante), a corrente, a potência absorvida da rede e a velocidade do rotor (uso de um tacômetro).

A seguir é apresentado o formulário referente ao ensaio. No formulário as grandezas  $V_{1L}$  e  $I_{1L}$  indicam valores de linha.

$$P_{3\phi} = W_1 + W_2 = P_{entrada} \quad (2.18)$$

$$FP = \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{1L} \cdot I_{1L}} \quad (2.19)$$

$$Perdas = P_{entrada} - P_{saída} \quad (2.20)$$

Além dessas equações, podemos calcular o escorregamento pela equação (1.9), a potência de saída pela equação (1.12) e o rendimento pela equação (1.15). Em alguns casos também precisamos calcular o torque de carga pelo produto da força medida pelo braço de alavanca (distância em relação ao eixo do motor).

## EXERCÍCIOS

1. Descreva como pode ser obtida a resistência por fase dos enrolamentos do estator de um MIT.

2. Em relação ao ensaio de rotor bloqueado do MIT, pede-se:

- quais os objetivos;
- quais os procedimentos;
- desenhe o esquema de ligação;
- desenhe o circuito equivalente referente ao ensaio.

3. Em relação ao ensaio de rotor livre do MIT, pede-se:

- quais os objetivos;
- quais os procedimentos;
- desenhe o esquema de ligação;
- desenhe o circuito equivalente referente ao ensaio.

4. Em relação ao ensaio com carga do MIT, pede-se:

- quais os objetivos;
- quais os procedimentos;
- desenhe o esquema de ligação;
- desenhe o circuito equivalente referente ao ensaio.

5. Calcule os parâmetros do circuito equivalente de um MIT de 3 CV, 380 V, ligado em Y, categoria N, que foi submetido aos ensaios de rotor bloqueado e livre, nas quais obteve-se os seguintes resultados:

Rotor bloqueado:  $V_L = 70 \text{ V}$ ,  $I_L = 5 \text{ A}$ , potência total de 300 W.

Rotor livre:  $V_L = 380 \text{ V}$ ,  $I_L = 3 \text{ A}$ , potência total de 320 W.

Ainda, assuma  $R_1 = 2,5 \Omega$  e  $P_{a,v} = 10 \text{ W}$ .

6. Considerando a placa de um MIT representada na Figura 2.8, pede-se:

- o número de terminais que possui o motor;
- a corrente suportada pela bobina 1 - 4;
- a tensão suportada pela bobina 1 - 4;
- a corrente de partida;

- e) represente a ligação das bobinas para a ligação em 380 V;
- f) a potência aparente total de entrada para a situação de plena carga;
- g) a perda total a plena carga;
- h) a rotação da máquina a plena carga;
- i) o torque nominal a plena carga.

~ 3	Hz 60	CAT N	FS 1.00	ISOL F	IP 55	REG S1	REND = 92,5%
kW(HP-cv) 75(100)							
RPM 1775							
220/380/440 V							
245/142/123 A							
$\cos(\varphi) = 0,87$							
$I_p/I_n 8,8$							

Figura 2.8 – Placa de um MIT.  
 Fonte: elaboração própria.

# Capítulo 3

---

## Geradores de Indução

### 1. INTRODUÇÃO

Como descrito na introdução do Capítulo 1, a máquina de indução tem sua maior aplicabilidade como motor, embora possa também operar como gerador. Por esse motivo, este capítulo visa a apresentar de forma sucinta aspectos relacionados à máquina de indução operando como gerador para que o leitor, ao menos, tenha ciência dessa possibilidade.

A vantagem principal de um gerador de indução é sua simplicidade. Um gerador de indução não necessita de um circuito de campo alimentado separadamente e não precisa ser acionado continuamente com velocidade fixa. Por outro lado, uma máquina de indução tem diversas limitações quando operando como gerador. Como lhe falta um circuito de campo separado, um gerador de indução não pode produzir potência reativa e nem controlar sua própria tensão de saída.

Na sequência veremos as duas possibilidades de uso de um gerador de indução: conectado à rede elétrica ou isolado da rede (gerador autônomo)

### 2. GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À REDE

Quando conectado à rede, o gerador de indução passa a entregar energia à mesma quando seu rotor opera a uma velocidade superior à velocidade síncrona (ver Figura 3.1). Para que isso seja possível, uma máquina primária deve entregar torque mecânico ao gerador de modo que ocorra a conversão de energia mecânica em energia elétrica.

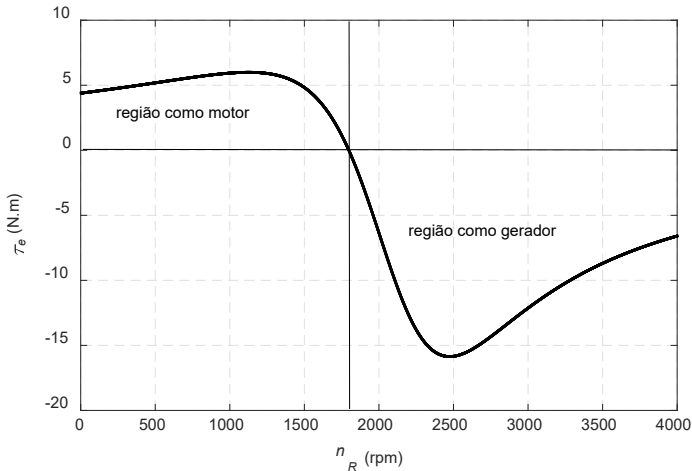


Figura 3.1 – Torque *versus* velocidade de uma máquina de indução, mostrando a região de funcionamento como gerador.

Fonte: elaboração própria.

### 3. GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE

Quando operando de forma isolada, um gerador de indução necessita de um banco de capacitores acoplado ao mesmo para fornecer a potência reativa requerida pelo gerador e por quaisquer cargas acopladas. Em uma configuração trifásica, conforme Figura 3.2, a tensão a vazio do gerador de indução é dada pela intersecção da curva de magnetização do gerador com a reta de carga do capacitor (ver Figura 3.3). Para determinarmos a reta de carga de um capacitor, basta multiplicarmos o valor da reatância capacitiva por dois valores de corrente, encontrando assim, dois valores de tensão. Com os dois pontos (corrente, tensão) é então traçada a reta de carga.

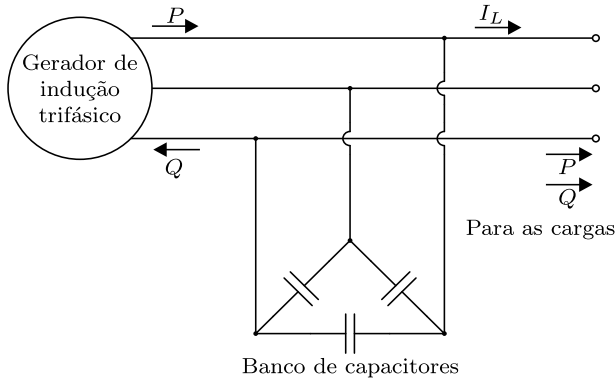


Figura 3.2 – Gerador de indução isolado da rede conectado a um banco de capacitores.  
Fonte: elaboração própria (adaptado de CHAPMAN, 2013).

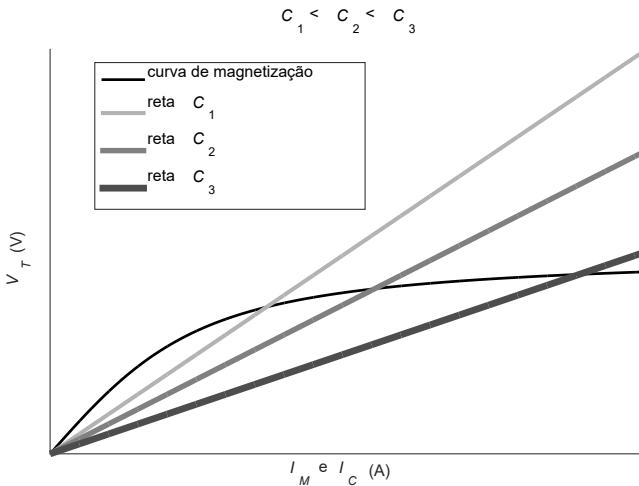


Figura 3.3 – A interseção da curva de magnetização do gerador com a reta característica do capacitor fornece a tensão de operação a vazio do gerador.  
Fonte: elaboração própria.

Particularmente para a operação isolada da rede, podemos elencar as seguintes vantagens: custo e tamanhos reduzidos, robustez, ausência de escovas, ausência de fonte de corrente contínua para excitação, facilidade de manutenção, autoproteção contra sobrecargas e curtos-circuitos, boa resposta dinâmica e capacidade de gerar energia a velocidade variável. Por

outro lado, as principais desvantagens são: consumo de energia reativa (e o conseqüente baixo fator de potência) e insatisfatória regulação de tensão e de frequência (essas grandezas variam muito de acordo com a carga acoplada aos terminais do gerador).

Uma máquina de indução trifásica também pode ser utilizada como gerador para alimentar cargas monofásicas, necessitando, nesse caso, um número reduzido de capacitores quando comparado com a alimentação de cargas trifásicas. Existem algumas topologias monofásicas, merecendo destaque as do tipo Steinmetz que são ilustradas na Figura 3.4.

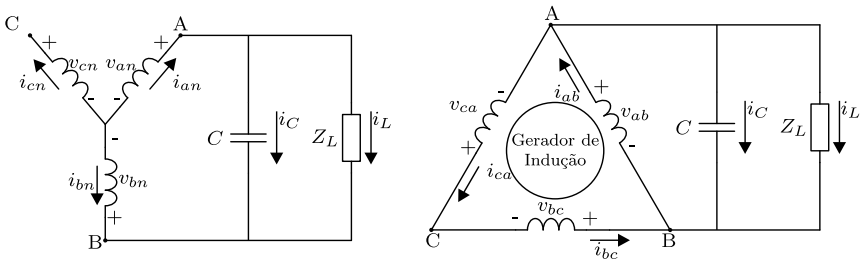


Figura 3.4 – Configurações monofásicas com ligações do tipo Steinmetz.

Fonte: elaboração própria.

## EXERCÍCIOS

1. A partir da curva torque *versus* velocidade apresentada na Figura 3.5 para um MIT operando como gerador e conectado à rede, trace de forma aproximada a curva potência gerada *versus* velocidade.

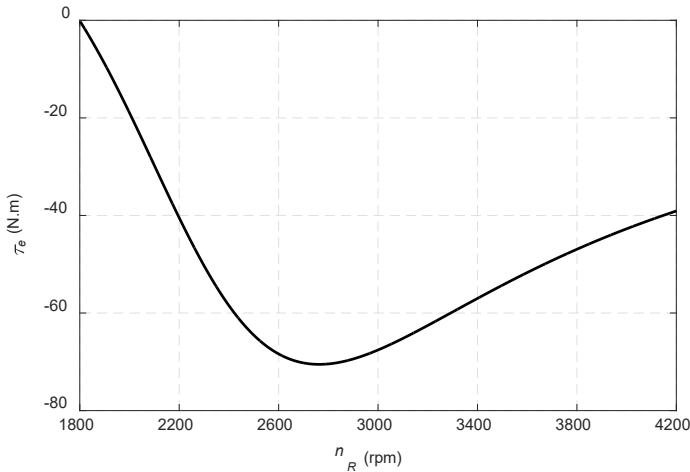


Figura 3.5 – Curva torque *versus* velocidade de um MIT.

Fonte: elaboração própria.

2. Complete a tabela a seguir. Após, trace a curva de magnetização da máquina de indução e as retas características dos capacitores em um mesmo gráfico. Ainda, considerando a operação da máquina como gerador trifásico isolado da rede e ligado em  $\Delta$ , determine quais das capacitâncias é apropriada para formar um banco de capacitores também ligado em  $\Delta$  a ser conectado junto ao gerador para que a auto-excitação possa ocorrer de forma adequada. Justifique sua resposta. Assuma que a frequência será de 60 Hz.

---

dados para o traçado da curva de magnetização (ensaio realizado com a máquina de indução ligada em $\Delta$ )			capacitores: $C_1 = 15 \mu\text{F}$ $C_2 = 30 \mu\text{F}$	
$I_L$ (A)	$I_F$ (A)	$V_F$ (V)	$V_{C1}$ (V)	$V_{C2}$ (V)
0,10		12		
0,50		60		
0,90		110		
1,30		155		
1,70		186		
2,10		214		
2,50		232		
2,90		245		
3,30		257		
3,50		264		

---

## Exercícios de Revisão

---

Assinale V (verdadeiro) ou F (falso) para as seguintes sentenças relacionadas à máquina de indução.

( ) Em um sistema bifásico, o campo girante de um motor de indução pode ser gerado por meio de bobinas defasadas em  $90^\circ$  no espaço e alimentadas com tensões defasadas em  $90^\circ$  no tempo.

( ) O campo girante produzido no MIT está diretamente relacionado à posição das bobinas no espaço e não depende da defasagem temporal das tensões de alimentação.

( ) A velocidade do campo girante é inversamente proporcional à frequência da rede.

( ) Para mudar a direção do campo girante é necessário mudar a frequência da rede ou o número de polos do motor.

( ) Nas ranhuras do estator estão alojadas as bobinas estatóricas e o espaço entre duas ranhuras é denominado dente do estator.

( ) A interação entre o campo girante produzido pelo estator e as correntes induzidas no rotor produz forças perpendiculares às barras/bobinas do rotor.

( ) Em um motor de indução a corrente induzida no rotor é máxima na partida e mínima no sincronismo.

( ) Quanto menor a resistência elétrica do circuito do rotor, maior será o torque de partida do motor.

( ) Se após entrar em regime, o torque de carga for diminuído, as correntes no rotor diminuem até ser atingido um novo equilíbrio (torque eletromagnético é igual ao torque resistente).

- Se após entrar em regime, o torque de carga for aumentado, o motor de indução desacelera, aumentando o torque eletromagnético.
- Para motores de indução de igual potência, aquele que apresenta maior número de polos também apresenta maior torque nominal.
- Em um rotor do tipo bobinado, as ranhuras do rotor são preenchidas por bobinas, normalmente ligadas em Y. Esse tipo de rotor também apresenta anéis coletores e escovas, possibilitando a inserção de resistências elétricas externas ao conjunto de bobinas.
- De maneira geral, motores de indução de maiores potências apresentam rendimentos e fatores de potência maiores que motores de menores potências.
- Quando operando com carga nominal, a potência solicitada da rede é igual a potência especificada na placa do motor de indução.
- O escorregamento aumenta com o aumento da carga acoplada ao eixo do motor.
- Se a tensão de alimentação for reduzida pela metade em relação à nominal, o torque de partida do motor de indução também será reduzido pela metade.
- As resistências dos enrolamentos do estator podem ser determinadas por meio do método do Volt-Ampère, fazendo o uso de uma fonte de tensão contínua variável.
- Um motor com fator de serviço igual a 1 pode operar sem danos ao motor com 15% acima da potência nominal de placa.
- Um motor de indução trifásico com 12 terminais, 220/380/440/760 V, deve ser conectado em estrela série para 440 V.

- Um motor de indução trifásico de 5 CV ( $1 \text{ CV} = 736 \text{ W}$ ) operando com carga nominal e 8 horas por dia, consumirá ao final de um mês (30 dias) 883,2 kWh.
- O nível de carregamento (carga acoplada ao eixo) não interfere no rendimento e no fator de potência do motor de indução.
- O ensaio sem carga do motor é também conhecido como ensaio de curto-circuito.
- Um dos objetivos do ensaio de curto-circuito é determinar as perdas no cobre.
- A corrente de magnetização do motor de indução é maior que a de um transformador de mesma potência principalmente devido à presença de entreferro no circuito magnético do motor.
- As perdas mecânicas são determinadas a partir do ensaio a vazio.
- No ensaio com rotor travado, consideramos o escorregamento do motor igual a 0, de modo que a resistência que representa a carga mecânica acoplada ao eixo do motor é igual a 0 no circuito equivalente.
- No ensaio a vazio, o motor gira muito próximo da velocidade síncrona, de modo que podemos assumir que o escorregamento do motor é igual a 1 para a análise do ensaio.
- Os objetivos do ensaio com carga do motor de indução são: determinar a variação da velocidade, do torque eletromagnético, do rendimento percentual e do fator de potência, em função da variação da carga.
- Quando comparado com um MIT de mesma potência, observa-se que o motor monofásico apresenta maior torque de partida, maior rendimento e maior fator de potência.

- O funcionamento de motores de indução monofásicos está diretamente relacionado ao fato de que um campo pulsante pode ser decomposto em dois campos girantes que giram em sentidos opostos.
- Todos os diferentes tipos de motores de indução monofásico apresentam capacitor de partida.
- Quando o enrolamento auxiliar de um motor monofásico é projetado para operar apenas durante a partida, o motor deve apresentar uma chave centrífuga.
- Quando conectada à rede, a máquina de indução opera como gerador caso o rotor apresente velocidade superior à velocidade síncrona.
- Quando isolada da rede, a máquina de indução necessita de um banco de capacitores conectado a mesma para que possa operar como gerador.

# Referências

---

- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McGraw-Hill, 1995.
- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Porto Alegre: Globo, 2000.
- DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1994.
- MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- KRAUSE. P. C.; WASYNCZUK. O.; SUDHOFF, S. D. **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. 2nd edition, IEEE Press and Wiley Interscience, 2002.
- VUKOSAVIC, S. N. **Electrical Machines**. London: Springer, 2013.
- IDA, N. **Engineering Electromagnetics**. 3rd edition, London: Springer, 2015.
- SILVEIRA, J.; LÚCIO, J. C. M.; ANTUNES, O. J.; ALVES, R. L. **Motor de Indução**. Apostila de aula. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – IFSC, Campus Florianópolis – Centro.
- WEG Equipamentos Elétricos. **Motor de Indução Trifásico: Rotor Bobinado com Sistema Motorizado de Levantamento das Escovas**. Catálogo do fabricante. Jaraguá do Sul.
- Grupo WEG – Unidade Motores. **W22 Motor Elétrico Trifásico**. Catálogo do fabricante. Jaraguá do Sul, 2018.
- WEG Motores. **Guia de Especificação – Motores Elétricos**. Catálogo do fabricante. Jaraguá do Sul, 2018.
- BARADKAR, M. **Slip ring Induction Motor, How it works?**. LESICS: The Physics Behind Engineering, 04 abr. 2019. Disponível em: <https://www.lesics.com/slip-ring-induction-motor-how-it-works.html>. Acesso em: 04 out. 2022.
- ELECTRIC-MAGNETIC WORLD. **AC motor construction**. 2017. Disponível em: <https://electromagneticworld.blogspot.com/2017/11/ac-motor-construction.html>. Acesso em: 04 out. 2022.