

ILDO BORGES DE CAMPOS BÓLICO FERREIRA

**ANÁLISE DOS CICLOS OPERACIONAIS PARA ESPECIFICAÇÃO DE
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Guaratinguetá - SP
2015

ILDO BORGES DE CAMPOS BÓLICO FERREIRA

**ANÁLISE DOS CICLOS OPERACIONAIS PARA ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli

Guaratinguetá
2015

F383a Ferreira, Ildo Borges de Campos Bólico
Análise dos ciclos operacionais para especificação de motores de indução trifásicos / Ildo Borges de Campos Bólico Ferreira – Guaratinguetá, 2015.
54 f : il.
Bibliografia: f. 53

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.
Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli

1. Motores elétricos de indução 2. Análise térmica 3. Fator de potência I. Título

CDU 621.313.333

**ANÁLISE DOS CICLOS OPERACIONAIS PARA ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

ILDO BORGES DE CAMPOS BÓLICO FERREIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. DURVAL LUIZ SILVA RICCIULLI
Orientador/UNESP-FEG


Profa. Dra. PALOMA MARIA SILVA ROCHA RIZOL
UNESP-FEG


Profa. MARIA FERNANDA TRUJILLO LEON
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

de modo especial, à minha família, que mesmo quando nem eu mesmo tinha esperanças ou confiança em meu sucesso, me deram suporte, confiança e incentivo para que eu continuasse no curso e lograsse êxito.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli* que me “adotou” como seu orientado em um momento que parecia insolúvel. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

à minha mãe *Greetchen*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivou meus estudos.

aos meus avós *Antonio e Neuza* que foram os responsáveis pela criação minha e de meus irmãos,

aos meus irmãos *Juan Carlos e Jamile* que às suas maneiras, sempre estiveram ao meu lado para dar suporte e companhia,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos membros da banca, que aceitaram fazer parte deste momento de conclusão de um ciclo.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida.”

Goethe

FERREIRA, I. B. C. B. **Análise dos ciclos operacionais para especificação de motores de indução trifásicos.** 2015. 54 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Neste trabalho aborda-se o motor de indução trifásico por meio de uma análise térmica de seu funcionamento, sob o olhar das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas que versam sobre os regimes de trabalho (ciclos operacionais) definidos através de ensaios para especificação de cada utilização do motor base deste estudo, dando ênfase ao fato de os três primeiros ciclos possuem maiores possibilidades de serem utilizados no dimensionamento de um motor de indução trifásico para uso nos principais processos industriais. Também é feita uma análise sobre os motivos que levam aos motores de indução trifásicos a apresentarem uma perda de potência em altitudes superiores a 1000 m acima do mar e uma amostra de como proceder para especificar um motor de indução trifásico para operar em um dos três primeiros regimes operacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Motores de indução trifásicos. Regimes de trabalho de motores de indução trifásicos.

FERREIRA, I. B. C. B. **Analysis of the operating cycles to specification of three-phase induction motors**. 2015. 54 f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

This paper addresses the three-phase induction motor by a thermal analysis of its operation, under the gaze of the standards of the Brazilian Association of Technical Standards that deal with working arrangements (operating cycles) defined by appropriate tests and for each use of the motor basis of this study, emphasizing especially the fact of the first three cycles are the cycles with greater possibilities of use for scaling a three-phase induction motor for the main industrial processes, will also be made an analysis of the reasons why the three-phase induction motors have a loss of power at altitudes above 1000 m above sea level and some methods of how to define how a three phase induction motor can be used in one of the first three working arrangements.

KEYWORDS: Three-phase induction motors. Working arrangements of three-phase induction motors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma simplificado de potências no motor elétrico	16
Figura 2 – Partes componentes de um MIT	17
Figura 3 – Exemplo de estator de um MIT	17
Figura 4 – Exemplo de rotores: (a) gaiola de esquilo; (b) rotor bobinado	18
Figura 5 – Exemplos de estatores com respectivamente um e dois pares de pólos	19
Figura 6 – Regime tipo S1 – Regime contínuo	30
Figura 7 – Regime tipo S2 – Regime de tempo limitado	32
Figura 8 – Regime tipo S3 – Regime intermitente periódico	34
Figura 9 – Regime tipo S4 – Regime intermitente periódico com partida	35
Figura 10 – Regime tipo S5 – Regime intermitente periódico com frenagem elétrica	36
Figura 11 – Regime tipo S6 – Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente.....	38
Figura 12 – Regime tipo S7 – Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica	39
Figura 13 – Regime tipo S8 – Regime de funcionamento contínuo periódico com mudanças correspondentes de carga e rotação	40
Figura 14 – Regime tipo S9 – Regime com variações não periódicas de carga e de rotação	42
Figura 15 – Regime tipo S10 – Regime com cargas constantes distintas	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre número de par de polos e velocidade rotórica (rpm)	20
Tabela 2 – Classes de isolamento e seus limites	22
Tabela 3 – Composição das temperaturas das classes se isolamento térmico	24
Tabela 4 – Composição das temperaturas das classes de isolamento térmico	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FDC	fator de duração do ciclo
fem	força eletro-motriz
MIT	Motor(es) de Indução Trifásico(s)
NBR	Norma Brasileira Registrada
rpm	rotações por minuto

LISTA DE SÍMBOLOS

α	parâmetro que indica o quociente entre as perdas a vazio e joule do MIT
A	fator de transmissão de calor
A	fator de correção de altitude
B	campo magnético
C	capacidade térmica do enrolamento do estator
C_{\max}	conjugado máximo do MIT
C_n	conjugado nominal do MIT
ΔP	perdas totais no MIT
ΔP_j	perdas por efeito joule do MIT
ΔP_v	perdas a vazio do MIT
Δt_D	tempo de aceleração/partida
Δt_F	tempo de frenagem elétrica
Δt_p	tempo de funcionamento à carga constante
Δt_R	tempo desenergizado em repouso
Δt_s	tempo de funcionamento em sobrecarga
Δt_V	tempo de funcionamento em vazio
$\Delta \theta$	variação da temperatura do enrolamento
$\Delta \theta_i$	diferença entre a elevação de temperatura do enrolamento para cada variação de carga dentro de um ciclo e a elevação de temperatura baseada no regime tipo S1 com carga
de	referência
$\Delta \theta_S$	limite de elevação da temperatura aplicável ao local de funcionamento
$\Delta \theta_T$	limite de elevação aplicável ao local de ensaio
$d\Phi$	diferencial do fluxo magnético
dt	diferencial do tempo
ε	fem induzida
E_{\max}	tensão induzida de pico
Φ	fluxo magnético
F	força
γ	densidade de um líquido
h	pressão contra a qual um ventilador opera
H	altura manométrica
H_S	altitude do local de funcionamento
H_T	altitude do local do ensaio
J_{ext}	momento de inércia da carga
J_m	momento de inércia do motor
K	diferença entre a temperatura máxima da classe de isolamento térmico do MIT e a elevação de temperatura para a condição nominal de operação do MIT na temperatura ambiente normalizada
λ	fator de sobrecarga momentânea
η	rendimento
n	rotação
n_r	velocidade rotórica
n_s	velocidade rotórica síncrona
N	número de espiras
P	carga
P_i	carga constante de um período de carga dentro de um ciclo de cargas
P_n	carga nominal
P_p	par de polos

Pref	carga de referência baseado no regime tipo S1
P_M	fator de sobrecarga mecânica
P_T	fator de sobrecarga térmica
P_V	perdas elétricas
Q	calor gerado pelas perdas
Q	vazão da bomba hidráulica
Q_a	calor absorvido pelo motor para elevar sua temperatura acima da temperatura ambiente
Q_d	calor dissipado para o meio ambiente
R_1	resistência do enrolamento antes do ensaio
R_2	resistência do enrolamento após o final do ensaio
s	escorregamento
S_i	regime de trabalho i (com i variando de 1 a 10)
θ	temperatura
θ_1	temperatura do enrolamento antes do ensaio
θ_2	temperatura dos enrolamentos no final do ensaio
θ_a	temperatura do meio refrigerante no final do ensaio
θ_i	temperatura do isolamento em graus Celsius
θ_o	temperatura inicial
$\theta_{m\acute{a}x}$	temperatura máxima atingida durante o ciclo
θ_{ref}	temperatura na carga de referência baseado no regime tipo S1
Θ	elevação da temperatura do enrolamento quando o motor trabalha em regime contínuo
Θ_o	elevação da temperatura do enrolamento em $t = 0$
t	tempo
t_i	tempo de uma carga constante dentro de um ciclo
T_A	constante de tempo térmica de aquecimento
T_R	constante de tempo térmica de resfriamento
T	temperatura do ponto mais quente do enrolamento
T_o	temperatura ambiente
T_c	duração de um ciclo
TL	expectativa de vida térmica relativa, expressa em %, da expectativa de vida térmica no caso de regime tipo S1 à potência nominal
v	velocidade
V	vazão de ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	UMA VISÃO GERAL SOBRE O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	16
3	ANÁLISE TÉRMICA DO MIT	21
3.1	CLASSES DE ISOLAMENTO TÉRMICO	21
3.2	AFERIÇÃO DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO	23
3.3	PROCESSO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO MIT	25
4	CICLOS DE OPERAÇÃO	29
4.1	REGIME CONTÍNUO TIPO S1	29
4.2	REGIME DE TEMPO LIMITADO TIPO S2	32
4.3	REGIME INTERMITENTE PERIÓDICO TIPO S3	33
4.4	OUTROS REGIMES	35
5	EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO DE MIT BASEADO NOS TRÊS PRINCIPAIS CICLOS DE OPERAÇÃO	45
5.1	DIMENSIONANDO UM MIT PARA OPERAR NO REGIME S1	45
5.2	DIMENSIONANDO UM MIT PARA OPERAR NO REGIME S2	46
5.3	DIMENSIONANDO UM MIT PARA OPERAR NO REGIME S3	48
6	INFLUÊNCIA DA ALTITUDE NO DESEMPENHO DO MIT	50
7	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	54

1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos são amplamente utilizados nos mais variados segmentos industriais, e os motores de indução trifásicos, por serem motores de corrente alternada, são os mais usados, uma vez que a rede elétrica brasileira é composta por tensão alternada em 60 Hz, vindo a facilitar a utilização de tais motores.

O mais intrigante, é que apesar de haver normas ABNT para especificação de tais motores, na prática, não se leva em consideração a análise térmica dos motores, levando-se apenas características como torque no eixo, rendimento e potência do motor, sendo que muitas vezes os motores podem estar mal dimensionados, uma vez que dependendo do seu tipo de uso, possui um diferente comportamento térmico, que altera significativamente suas características, o que seria muito mais vantajoso se as características térmicas fossem levadas em conta.

Neste trabalho, é abordada a análise térmica do MIT (motor de indução trifásico), uma análise dos regimes de trabalho (ciclos operacionais) presentes na norma NBR - 17094 - 1/2013, que nos fornece os regimes de trabalho caracterizados em diagramas de carga, representados pela letra S seguida de um número, de S1 a S10, em comparação com o diagrama de comportamento térmico do respectivo regime e o comportamento do MIT em altitudes acima de 1000 m.

O objetivo deste trabalho é mostrar que conhecendo o regime de trabalho do MIT, baseado em seu comportamento térmico e altitude da área de operação, torna-se possível de se atingir uma economia no momento da aquisição do MIT, na sua manutenção, e no ponto de vista do consumo de energia elétrica.

A motivação que leva a este trabalho, é o fato de como citado anteriormente, praticamente nunca ser levado em conta os regimes de trabalho dos MIT e seu comportamento térmico para a correta especificação dos mesmos.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

O capítulo 2, “Uma visão geral sobre o motor de indução trifásico”, aborda de maneira sucinta as características e o princípio de operação do MIT.

O capítulo 3, “Análise térmica do MIT”, há uma abordagem com equacionamento térmico do MIT, seu processo de elevação de temperatura, maneiras de aferir a temperatura e as classes de isolamento térmico do MIT.

O capítulo 4, “Ciclos de operação”, são mostrados os primeiros regimes de trabalho, enfatizando os três primeiros, que são os mais utilizados e com maior importância.

O capítulo 5, “Exemplos de dimensionamento de MIT baseados nos três principais ciclos de operação”, são apresentados maneiras de dimensionar um MIT para operar nos três ciclos mais usuais.

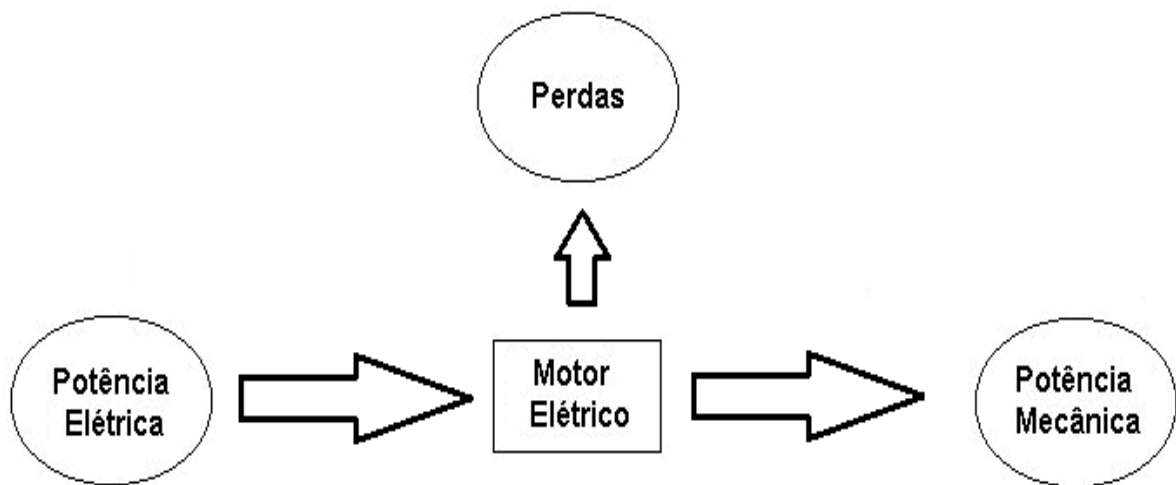
O capítulo 6, “Influência da altitude no desempenho do MIT”, mostra como a altitude afeta a operação do MIT, no que tange à sua potência e comportamento térmico.

O capítulo 7, “Conclusão”, mostra as conclusões obtidas após este estudo.

2. UMA VISÃO GERAL SOBRE O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Inicialmente, deve-se definir o que é um motor elétrico. Um motor elétrico, nada mais é, do que um dispositivo, ou uma máquina, que possui por característica, poder realizar a conversão de energia elétrica em mecânica, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma simplificado de potências no motor elétrico



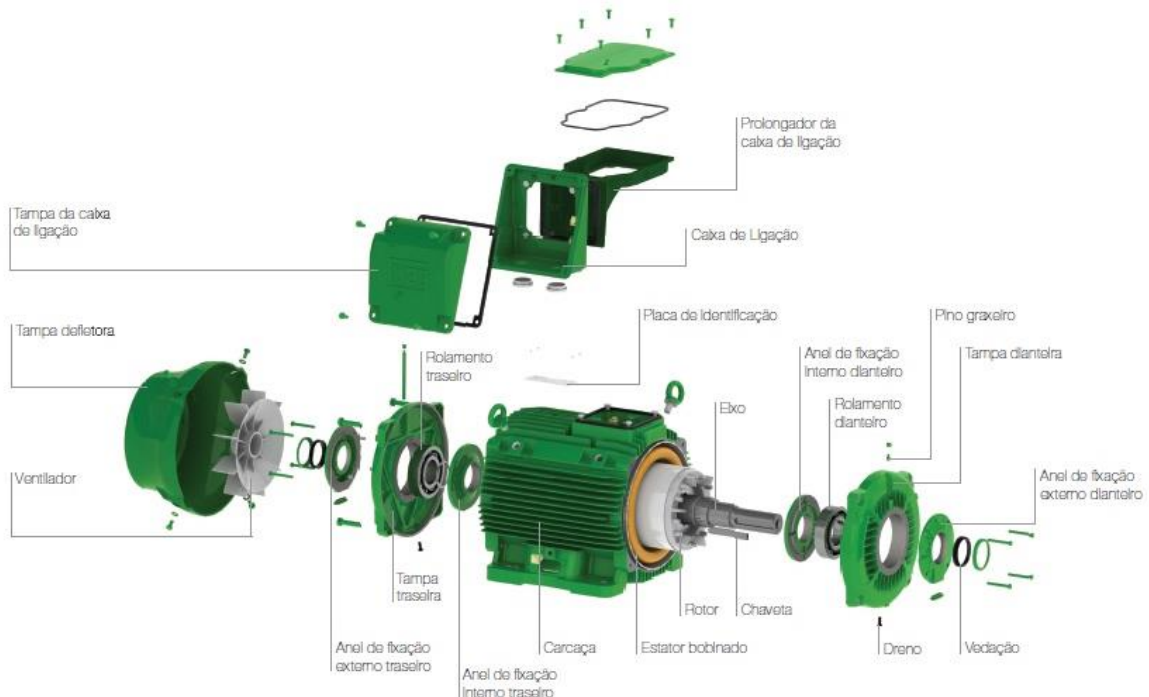
Fonte: Adaptado pelo autor.

Observa-se na Figura 1, a representação simplificada do fluxo de potências em um MIT, onde se observa que há entrada de potência elétrica, o motor sofre perdas durante a transformação e a parcela restante é entregue ao eixo na forma de potência mecânica.

Já um motor de indução, que pode ser observado na Figura 2, pode ser monofásico ou trifásico, possui a capacidade operativa de apesar de uma pequena variação de sua velocidade rotórica devido à carga acoplada a ele, conseguir manter sua velocidade rotórica constante, e por ser um equipamento relativamente simples, com um reduzido custo e elevada robustez, torna-se o responsável por cerca de 95% dos motores utilizados nos setores rural, industrial e comercial, perfazendo cerca de 75% do total da potência instalada dos motores em geral.

O motor de indução trifásico, que é o objeto deste estudo, é uma máquina composta por duas partes principais: o estator (parte estática) e o rotor (parte dinâmica), e é apresentado em duas configurações, tipo gaiola de esquilo (*squirrel cage*) e tipo rotor bobinado.

Figura 2 – Partes componentes de um MIT.



Fonte: WEG,2015.

Observa-se na Figura 2, uma visão explodida de um MIT, onde é possível observar todas as partes componentes dessa máquina elétrica.

O estator, vide Figura 3, que é a parte imóvel do motor, é composto basicamente de finas chapas de material ferromagnético, que recebem um tratamento térmico a fim de reduzir as perdas por correntes parasitas histerese-Foucault, sendo que tais chapas possuem a forma de anéis com ranhuras na parte interna, de forma que seja possível alocar enrolamentos de modo a gerar um campo magnético. Caso se fizesse uma analogia com um transformador, seria o primário do transformador.

Figura 3 – Exemplo de estator de um MIT.

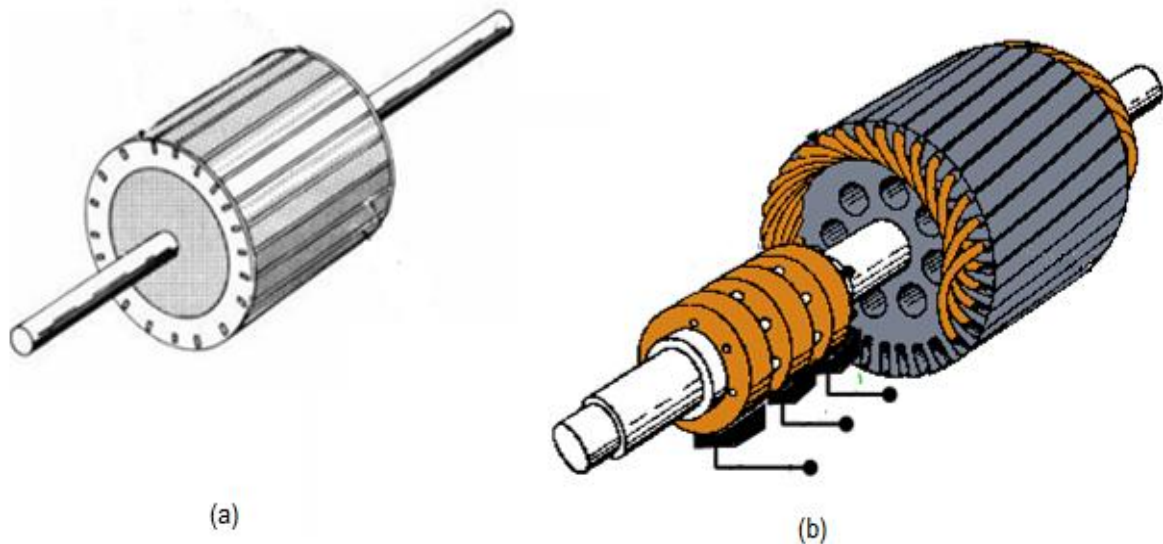


Fonte: WEG, 2015.

Observa-se na Figura 3, o estator de um MIT, com seus enrolamentos de cobre alocados nas ranhuras do estator.

O rotor, vide Figura 4, que é a parte móvel do motor, é responsável pela transferência da potência mecânica para a carga, é composto também por chapas finas de material ferromagnético, que também recebem um tratamento térmico para o mesmo fim do recebido pelo estator, também possui forma de anéis, sendo seus enrolamentos alocados de maneira longitudinal, também possui ranhuras, e o número de ranhuras no rotor e no estator devem ser relacionadas de forma a reduzir o surgimento de ruídos durante a operação do motor, e ao fazer também uma analogia com um transformador, seria o secundário do mesmo, justificando a proporção no número de ranhuras como a relação entre o número de espiras no primário e secundário de um transformador.

Figura 4 – Exemplo de rotores: (a) gaiola de esquilo; (b) rotor bobinado.



Fonte: Adaptado pelo autor.

Observa-se na Figura 4, (a) um rotor gaiola de esquilo, sendo possível observar tal formato, e (b) um rotor bobinado, sendo possível observar no eixo as três coroas dos enrolamentos das fases, característica que vem a denominá-lo.

O princípio de operação de um MIT obedece às leis de Faraday (que diz que “a fem induzida num circuito é igual (exceto por uma troca de sinal) à taxa pela qual o fluxo magnético através do circuito está variando com o tempo” (HALLIDAY, 1994)) e Lenz (que diz “a fem induzida, e a corrente induzida, têm uma direção que se opõe à variação que as provocou” (TIPLER, 1995)), sendo representada pela equação (1), considerando que no enrolamento tem-se N espiras:

$$\varepsilon(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

A equação (1) diz que uma fem (força eletromotriz) é induzida (representado por $\varepsilon(t)$) quando se tem uma variação do fluxo magnético (Φ) em função do tempo.

Desenvolvendo a equação (1), chega-se na equação (2):

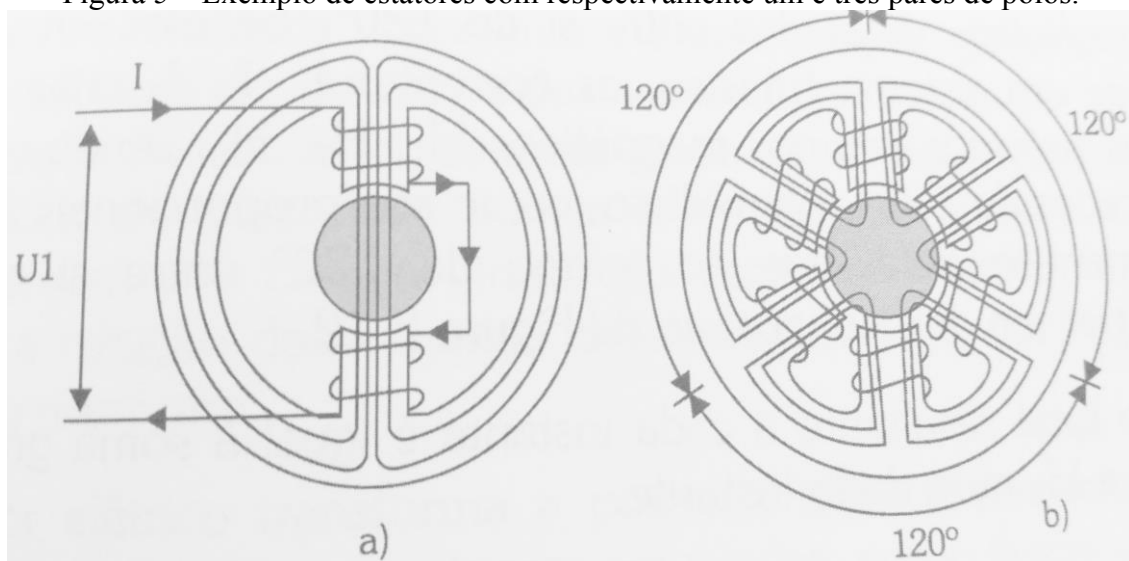
$$\varepsilon(t) = E_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

Onde $\omega = 2\pi f$, com f = frequência, $E_{\text{máx}}$ = tensão induzida de pico.

Donde se conclui pela equação (2) que para cada volta completa do rotor, tem-se um ciclo de tensão gerado.

O estator possui pares de pólos norte e sul, que geram o fluxo magnético já citado, e o número de pares de pólos (P_p) está diretamente relacionado com a velocidade rotórica síncrona (n_s).

Figura 5 – Exemplo de estatores com respectivamente um e três pares de pólos.



Fonte: FRANCHI, 2014.

No Brasil, a frequência da rede elétrica alternada é de 60 Hz, logo a velocidade rotórica do MIT, em rpm (rotações por minuto), será dada pela equação (3):

$$n_s = \frac{3600}{P_p} \quad (3)$$

Onde n_s é a velocidade síncrona do rotor em rpm, P_p é o número de pares de pólos e na Tabela 1 tem-se a correspondência entre o número de pares de pólos e frequência rotórica síncrona:

Tabela 1 – Relação entre número de pares de polos e velocidade rotórica síncrona

NÚMERO DE PARES DE PÓLOS	VELOCIDADE ROTÓRICA (rpm)
1	3600
2	1800
3	1200
4	900
5	720
6	600

Fonte: Adaptado pelo autor.

A rotação do eixo do MIT, gerado por indução magnética, entrega então a uma carga acoplada a ele um torque que aí é usado para várias finalidades, havendo uma perda chamada de escorregamento, e representada por s , logo a velocidade entregue à carga é diferente da velocidade síncrona, então temos que o escorregamento será dado pela equação (4):

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (4)$$

Onde n_r é a velocidade rotórica.

Após uma breve explanação sobre o MIT, no próximo tópico é visto a análise térmica do MIT.

3. ANÁLISE TÉRMICA DO MIT

Quando se observa a placa de identificação de um MIT, a potência nominal gravada nessa placa indica a potência mecânica útil que é entregue ao eixo, todavia, tal valor encontra-se atrelado a outros dois fatores: a condição de que o meio refrigerante não pode exceder 40 °C e a altitude do local de operação não ser maior que 1000 m em relação ao nível do mar (ambas as condições estabelecidas pela norma NBR – 17094-1/2013).

As condições mencionadas, não afetam as características eletromagnéticas que resultam no conjugado do MIT, uma vez que sua capacidade de entregar o conjugado e potência nominais, não são afetadas desde que conectado à rede elétrica com sua frequência e tensão nominais, contudo, caso as duas condições anteriores não forem contempladas, o MIT fica incapacitado de entregar sua potência nominal, uma vez que as perdas resultam em um grande calor, que acaba sendo de difícil dissipação para o meio refrigerante, resultando em uma elevação da temperatura do MIT de maneira que causa uma redução significativa da vida útil do mesmo ou até a destruição de seu enrolamento.

A expectativa de vida de um MIT é considerada como sendo igual à expectativa de vida de seu enrolamento, ou seja, sua expectativa de vida se extingue quando há problemas na sua isolamento, haja vista que os custos para reparar tal problema, custam algo em torno de 50% do valor do MIT, tornando-se algo inviável do ponto de vista econômico, considerando o desgaste deste MIT a ser consertado e um novo MIT.

3.1 CLASSES DE ISOLAMENTO TÉRMICO

Devem ser levados em consideração pelo menos dois aspectos primordiais quando se realiza a especificação de um MIT:

- a. o conjugado do MIT deve ser tal que atenda às solicitações das cargas nominais, assim como sobrecargas momentâneas que ocorreram, de maneira que a sua velocidade não seja reduzida de forma a prejudicar a operação.
- b. a máxima temperatura estatórica não deve ser excedida além da prevista para a classe de isolamento térmico a que foi dimensionado, em especial atenção à resina ou verniz que envolve os condutores que resultam nas bobinas.

O primeiro aspecto é obedecido pela grandeza chamada de conjugado máximo do motor (C_{MAX}), ou seja, a carga deve possuir conjugados resistentes de tal maneira que não excedam C_{MAX} , inclusive os resultantes de momentâneas sobrecargas decorrentes da operação do MIT.

O valor do C_{MAX} é um valor considerado sempre percentualmente ou em valores por unidade em relação ao conjugado nominal (C_n) e tal relação vem a ser denominada fator de sobrecarga, e é representada por λ , conforme a equação (5):

$$\lambda = \frac{C_{MAX}}{C_n} \quad (5)$$

O segundo aspecto, é obedecido quando se faz a escolha de uma classe de isolamento térmico que seja adequado às características operativas que são buscadas. A fim de obedecer às normalizações, os materiais que compõe os sistemas de isolamento térmico do MIT, são agrupados em classes, divididas pelo máximo valor que os componentes podem suportar sem dano ou redução da vida útil do MIT. A temperatura em questão, não é referente ao enrolamento como um todo, mas sim qualquer ponto do enrolamento, haja vista que a distribuição térmica em um enrolamento não se dá de maneira uniforme, uma vez que, por exemplo, os lados das bobinas que se encontram nas ranhuras, o calor é maior que nas coroas, que se encontram nas partes laterais do motor, e por convecção, a parte superior possui temperaturas mais elevadas que a parte inferior, ou seja, nenhum dos pontos do motor deve exceder a máxima temperatura definida para a classe de isolamento térmico a que ele foi dimensionado.

As classes de isolamento térmico normalizadas são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 - Classes de isolamento térmico e seus limites

CLASSE DE ISOLAMENTO TÉRMICO	TEMPERATURA MÁXIMA DOS ENROLAMENTOS (°C)
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Fonte: Adaptado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta as classes de isolamento térmico padronizadas para os componentes do MIT e as máximas temperaturas admissíveis dos seus enrolamentos.

Durante a operação do MIT, a temperatura do enrolamento durante a sua operação, vem a ser a soma da temperatura ambiente (normalizada em 40 °C) e a elevação de temperatura resultante das perdas no MIT, ou seja, um MIT classe A com limite de 105 °C, conforme a Tabela 1 tem-se então uma elevação de temperatura máxima de 65 °C, ou seja, se estiver operando no limite de sua classe, estará operando no limite de sua capacidade térmica, o que quer dizer que assim que o motor atingir seu regime permanente e seu equilíbrio térmico, a resultante da soma da temperatura ambiente e da elevação da temperatura, não deve exceder o valor máximo admitido pela classe de isolamento térmico definida para esse MIT.

A norma ABNT/NBR-17094-1/2013, define como temperatura ambiente padronizada a de 40 °C, logo se pode definir as máximas elevações de temperatura de cada classe, mas, como citado anteriormente, cada ponto dos enrolamentos tem uma temperatura diferente, logo, deve-se considerar o ponto mais quente dos enrolamentos como o ponto a ser considerado para determinação da temperatura dos enrolamentos.

3.2 AFERIÇÃO DA TEMPERATURA DOS ENROLAMENTOS

A norma NBR-17094-1/2013, define quatro métodos para aferição da temperatura do enrolamento do MIT:

- a. Método da Variação da Resistência;
- b. Método dos Detectores de Temperatura Embutidos;
- c. Método Termométrico;
- d. Método da Superposição.

O *método da variação da resistência*, é mais usado para aferir a temperatura de MIT, tomando como base na variação ôhmica de em relação à temperatura (R_1 e R_2) e segue a equação (6):

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_a = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} \times (235 + \theta_1) + (\theta_1 - \theta_a) \quad (6)$$

Onde $\Delta\theta$ é a variação de temperatura do enrolamento, θ_2 é temperatura dos enrolamentos no final do ensaio, θ_1 é a temperatura do enrolamento antes do ensaio, θ_a é a

temperatura do meio refrigerante no final do ensaio, R_2 é a resistência do enrolamento após o final do ensaio, R_1 é a resistência do enrolamento antes do ensaio e 235 é a aproximação de 234,6 que vem a ser a temperatura negativa do cobre onde sua resistência seria nula (teoricamente).

A equação (6) fornece um valor médio para a temperatura θ_2 , uma vez que R_1 e R_2 fornecem valores de resistência para a totalidade da fase, não apenas no ponto mais quente do estator, ou seja, a temperatura θ_2 obtida é inferior à temperatura do ponto mais quente do estator, então a diferença $\Delta\theta$ também representa um valor médio, e a elevação de temperatura deve sofrer um ajuste, uma vez que independente do regime, a máxima temperatura da classe não deve ser excedida, então seguindo as normas brasileiras, obtêm-se a Tabela 3 e a equação (7):

Tabela 3 - Composição das temperaturas das classes de isolamento térmico

CLASSE DE ISOLAMENTO TÉRMICO	TEMPERATURA DE REFERÊNCIA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA DA CLASSE DE ISOLAMENTO TÉRMICO (°C)	ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)	CONSTANTE K(°C)
A	40	105	60	5
E	40	120	75	5
B	40	130	80	10
F	40	155	105	10
H	40	180	125	15

Fonte: Adaptado pelo autor.

A Tabela 3 traz a relação entre a classe de isolamento térmico do MIT, a temperatura do meio refrigerante normalizada, a máxima temperatura admissível para cada classe de isolamento térmico, a elevação de temperatura e a constante K, que é a diferença entre a temperatura máxima da classe de isolamento térmico do MIT e a elevação de temperatura para a condição nominal de operação do MIT na temperatura ambiente normalizada.

Pode-se então concluir que a temperatura mais próxima da real, ou seja, do ponto mais quente do enrolamento, após o equilíbrio térmico, é dado pela equação (7):

$$T = T_o + \Theta + K \quad (7)$$

Onde T é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, T_0 é a temperatura ambiente e Θ é a elevação da temperatura do enrolamento quando o motor trabalha em regime contínuo.

O segundo método, o *método dos detectores de temperatura embutidos*, é caracterizado por aferir a temperatura através de termômetros de resistência, termistores ou termopares que são colocados durante o processo de fabricação do MIT dentro das ranhuras do estator, tendo a desvantagem de não ser possível o acesso direto a tais elementos sem destruir o enrolamento, e os terminais dos elementos de aferição de temperatura são levados à caixa de terminais do MIT e na sequência, para os instrumentos que fazem a medida.

O terceiro método, o *método termométrico*, a temperatura é aferida através de termômetros de bulbo que são colocados nas partes acessíveis do MIT, sendo um método um tanto quanto impreciso, já que o termômetro é colocado em algum ponto da carcaça, que está a uma temperatura inferior à temperatura das ranhuras, sendo então um método indicativo e não confiável.

O quarto método, o *método da superposição*, através da superposição de uma corrente contínua de baixa intensidade (corrente de medição) com a corrente de carga, realiza-se a medição dos elementos de corrente alternada por medidas de resistências e assim, a elevação da temperatura dos enrolamentos é aferida sem interrupção do motor.

3.3 PROCESSO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO MIT

As perdas resultantes da transformação eletromecânica efetuada pelo MIT durante sua operação (principalmente por atrito entre as partes móveis e as partes fixas), resulta na elevação da temperatura, e como dito anteriormente, as partes que tendem a ser as mais quentes são as seções internas do enrolamento, dentro das ranhuras, e naturalmente, tem-se um fluxo de calor das partes mais quentes para as mais frias, logo, da região interna para o meio externo, tendo a carcaça como superfície de separação.

Considerando que à medida que o MIT opera, a quantidade de calor tende a aumentar, logo a temperatura tem a tendência de se elevar indefinidamente, caso não haja a dissipação desse calor para o meio externo, logo, diz-se que existe um ponto onde é estabelecido um equilíbrio térmico, e a temperatura do MIT tende a ser estável (constante).

Analisando os estudos de Sá (1989), Ruppert Filho (1990) e Zhu (1990), pode-se tomar uma forma de análise térmica do MIT, como visto a seguir.

A fim de compreender e equacionar a relação da variação de temperatura do MIT em função do tempo deve-se primeiro fazer três considerações: primeiro, o ar que envolve o motor, também chamado de meio refrigerante, não sofre alterações em sua temperatura após absorver o calor gerado pelo MIT, ou seja, tem uma capacidade térmica que tende ao infinito, segundo, a condutividade térmica do MIT tende ao infinito, ou seja, todas as suas partes tem a mesma temperatura, e terceiro, considerar um regime de trabalho contínuo, ou seja, está em equilíbrio térmico e não é considerado o calor gerado durante o processo de aceleração do MIT.

Posto isso, tem-se a equação fundamental do calor, indicado na equação (8) abaixo:

$$Q = Q_a + Q_d \quad (8)$$

A equação (8) diz que o calor gerado pelas perdas (Q) será igual à soma do calor absorvido pelo MIT para elevar sua temperatura acima da temperatura ambiente (Q_a) e do calor dissipado para o meio ambiente (Q_d).

Reescrevendo a equação (8) na sua forma diferencial, obtém-se a equação (9):

$$Qdt = Cd\Theta + A\Theta dt \quad (9)$$

Onde C é a capacidade térmica do MIT e A é o fator de transmissão de calor.

Integrando em termos de t, obtém-se a equação (10):

$$t = -\frac{C}{A} \ln(Q - A\Theta) + \beta \quad (10)$$

Onde β representa a constante de integração, e que considerando o instante $t=0$, com uma elevação de temperatura inicial de Θ_0 tem-se a equação (11):

$$\beta = \frac{C}{A} \ln(Q - A\Theta_0) \quad (11)$$

Finalmente, substituindo (11) em (10) e rearranjando, obtém-se a equação (12):

$$\Theta = \frac{Q}{A} \left[\begin{array}{c} -\frac{A}{C}t \\ 1 - e \end{array} \right] + \Theta_0 e^{-\frac{A}{C}t} \quad (12)$$

Logo, pode-se observar que a curva de aquecimento é a soma de duas curvas, uma quando o motor produz a máxima elevação de temperatura (Q/A), e uma de resfriamento, quando ele é desligado. Como a condição mais comum é onde $\Theta_0=0$, pode-se reescrever a equação (12) da maneira a se tornar a equação (13):

$$\Theta = \frac{Q}{A} \left[\begin{array}{c} -\frac{A}{C}t \\ 1 - e \end{array} \right] \quad (13)$$

Então, pode-se deduzir que para um t tendendo ao infinito, chega-se na equação (14):

$$\Theta = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

Ou seja, o motor está no equilíbrio térmico, e o calor gerado pelas perdas é dissipado para o meio externo, e também se pode dizer que Q/A é a máxima elevação de temperatura que o MIT atinge.

Analisando o caso para quando $t=C/A$, chega-se à equação (15):

$$\Theta = \frac{Q}{A} \left[\begin{array}{c} -1 \\ 1 - e \end{array} \right] = 0,632 \frac{Q}{A} \quad (15)$$

Como a relação C/A é constante, e inata a cada MIT, vem a ser denominada de constante de tempo térmica de aquecimento, indicada por T_A , e indica o tempo decorrido para que o MIT atinja 63,2% de sua elevação de temperatura final em seu estado de equilíbrio térmico,

Substituindo T_A na equação (13), obtém-se a equação (16):

$$\Theta = \frac{Q}{A} \left[\begin{array}{c} -\frac{t}{T_A} \\ 1 - e \end{array} \right] \quad (16)$$

Para o processo de resfriamento, pode-se chegar à equação (17), baseado nas equações anteriores, com a ressalva de que o motor se encontra em equilíbrio térmico, e $Q=0$, e ao ser desligado, não mais produz calor, então se obtém a equação (17):

$$\Theta = \Theta_0 \left[1 - e^{-\frac{t}{T_R}} \right] \quad (17)$$

Onde, nesse caso, $\Theta_0 = Q/A$, até Θ se igualar à temperatura ambiente.

Quando se tem MIT autoventilados, que é a esmagadora maioria, tem-se uma dissipação térmica mais demorada, uma vez que quando ele é desligado, a sua ventilação também se desliga, aumentando assim seu tempo de resfriamento.

4. CICLOS DE OPERAÇÃO

Existem vários tipos de MIT que possuem um regime de trabalho caracterizado por curtos períodos de operação e longos períodos de repouso. Sejam por exemplo bombas de sistemas de reservatórios de água, já que outros alternam os períodos de trabalho e repouso, por exemplo elevadores, mas o que comumente é encontrado, são os que possuem uma operação contínua, como por exemplo, ventiladores industriais.

A norma ABNT/NBR – 17094-1/2013 estabelece 10 (dez) ciclos operacionais (ou regimes de trabalho), denominados de S1 a S10, cada qual com suas características e peculiaridades, quanto à duração de seus períodos de atividade e repouso, considerando a parte térmica do MIT para cada situação, sendo uma representação gráfica da potência solicitada no eixo em função do tempo de operação, sendo que os com um maior número de usos são os regimes S1, S2 e S3, uma vez que os outros são casos muito específicos que apenas são produzidos sob encomenda, após detalhadas especificações do cliente.

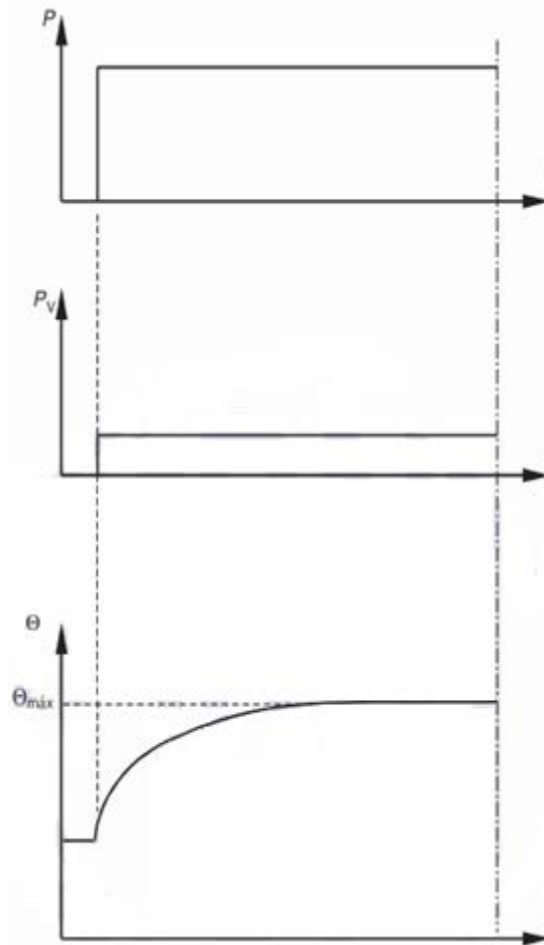
Vale salientar, que quando se diz que um regime é periódico, significa que o equilíbrio térmico não é atingido durante sua operação com carga.

4.1 REGIME CONTÍNUO TIPO S1

No **regime S1**, chamado *regime contínuo*, o MIT aciona uma carga constante de forma que o tempo seja o necessário para que atinja a temperatura de equilíbrio térmico, conforme observado na Figura 6:

O primeiro gráfico da Figura 6 representa uma carga (P) constante acoplada por tempo indeterminado, mas grande o suficiente para que a temperatura de equilíbrio térmico (θ_m) seja atingida, o segundo, as perdas elétricas (P_v) decorrentes dessa operação, e o terceiro, o comportamento térmico do MIT, onde se observa que ele possui uma temperatura inicial diferente de zero, e normalmente muito próxima à temperatura do meio refrigerante (muitas vezes o ambiente externo ao MIT) e se eleva até chegar a uma temperatura de equilíbrio, que não pode exceder a máxima temperatura da classe de isolamento térmico definida para o mesmo.

Figura 6 – Regime tipo S1 – Regime contínuo



Fonte: Norma NBR – 17094-1/2013

Motores de indução trifásicos definidos para tal regime espera-se que o comum seja o seu funcionamento prolongado, seja por horas, dias ou meses, não havendo desligamentos.

Pode-se citar como exemplos de aplicações, exaustores/ventiladores industriais, bombas de alimentação em caldeiras a vapor, bombas de movimentação de produtos em refinarias, dentre outros vários.

Segundo a norma NBR – 17094-1/2013, “quando o comprador não declarar o tipo de regime, o fabricante deve considerar que o tipo de regime S1 (regime contínuo) seja aplicado”, devido a isso, a maioria dos MIT em serviço, são especificados de tal modo, sendo o regime predominante.

Para que um MIT seja especificado para esse tipo de regime, basta que opere continuamente e com carga constante, conhecendo-se a potência que será requerida pela máquina, logo, ao fazer-se a escolha através de um catálogo de fabricante, deve ser certificado de que a potência é a imediatamente superior à requerida, excetuando-se o caso de o MIT ter fator de serviço (fator que permite ao MIT operar em sobrecarga) maior que 1,00, pois nesse

caso, o MIT opera com uma elevação de temperatura que é menor do que um motor convencional, logo, mesmo submetido a sobrecarga, não excede a temperatura limite de sua classe de isolamento térmico.

A norma NBR – 17094-1/2013 diz:

“No caso de motores monofásicos ou polifásicos, abertos ou totalmente fechados com ventilação externa, de potência nominal igual ou inferior a 150 kW (200 cv), com classificação térmica 130(B) ou 155(F), o comprador pode optar pela escolha de um motor com fator de serviço. Fator de serviço é um multiplicador que, quando aplicado à potência nominal do motor, indica a carga que pode ser acionada continuamente sob tensão e frequência nominais e com limite de elevação de temperatura do enrolamento, determinado pelo método da variação de resistência, 10 K acima do limite indicado na Tabela 10. Os valores de rendimento, fator de potência e rotação podem diferir dos valores nominais, porém o conjugado e a corrente com rotor bloqueado e o conjugado máximo permanecem inalterados. A utilização do fator de serviço implica uma vida útil inferior àquela do motor com carga nominal.”

A Tabela 4 indica os fatores de serviço de acordo com a norma:

Tabela 4 - Composição das temperaturas das classes de isolamento térmico

POTÊNCIA NOMINAL		FATOR DE SERVIÇO			
kW	cv	ROTAÇÃO SÍNCRONA (rpm)			
		3600	1800	1200	900
0,037	1/20	1,4	1,4	1,4	1,4
0,06	1/12	1,4	1,4	1,4	1,4
0,09	1/8	1,4	1,4	1,4	1,4
0,12	1/6	1,35	1,35	1,35	1,35
0,18	1/4	1,35	1,35	1,35	1,35
0,25	1/3	1,35	1,35	1,35	1,35
0,37	1/2	1,25	1,25	1,25	1,15 ^a
0,55	3/4	1,25	1,25	1,15 ^a	1,15 ^a
0,75	1,0	1,25	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a
1,1 a 150	1,5 a 200	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a	1,15 ^a

^a No caso de motores de gaiola, estes fatores de serviço se aplicam somente às categorias N e H

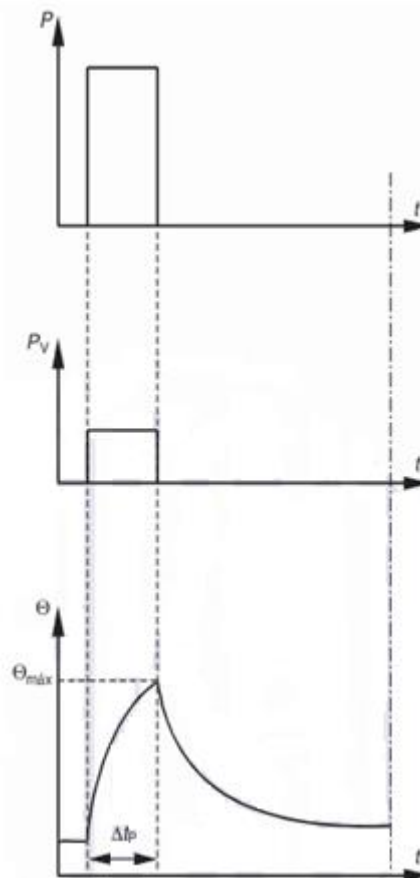
Fonte: Norma NBR – 17094-1/2013

A Tabela 4 relaciona as potências nominais dos MIT, com os respectivos fatores de serviço, em diferentes rotações síncronas.

4.2 REGIME DE TEMPO LIMITADO TIPO S2

No **regime S2**, chamado *regime de tempo limitado*, o MIT aciona uma carga constante, com curta duração, de tal forma que há um tempo de repouso que se faz grande o suficiente para que a temperatura do MIT volte a ser a do meio refrigerante, conforme podemos observar na Figura 7:

Figura 7 – Regime tipo S2 – Regime de tempo limitado



Fonte: Norma NBR 17094 – 1/2013.

O primeiro gráfico da Figura 7 indica uma carga constante atuando em um curto período de tempo, o segundo, as perdas elétricas decorrentes dessa operação, e o terceiro, o comportamento térmico, onde observamos que o MIT não chega ao seu equilíbrio térmico, mas possui um tempo de resfriamento grande o suficiente para que retorne à temperatura inicial, próxima à temperatura do meio refrigerante (dentro de +2 K acima do meio refrigerante, que por indicar uma variação de temperatura, equivale a dizer dentro de +2 °C).

Pode-se então imaginar, que um motor que tenha sido produzido para operar no regime S1, mas opera no regime S2, pode acionar uma carga maior do que a acionada no primeiro regime, sendo que as perdas admissíveis de S2 e as nominais de S1 devem se comportar de tal maneira que sua elevação de temperatura não exceda o limite de sua classe de isolamento térmico.

Alguns exemplos de aplicações para MIT nesse regime são sistemas de abertura/fechamento de válvulas, portões elétricos e sistemas basculantes.

MIT especificados para trabalharem nesse regime, possuem indicado em suas placas a potência desenvolvida na condição de trabalho indicado pelo tempo de operação, os valores normalizados são 10 minutos, 30 minutos, 60 minutos e 90 minutos, e a abreviação apropriada para indicar que um MIT opera nesse regime, é S2 seguido pela indicação de tempo do regime, com, por exemplo, S2 30 min.

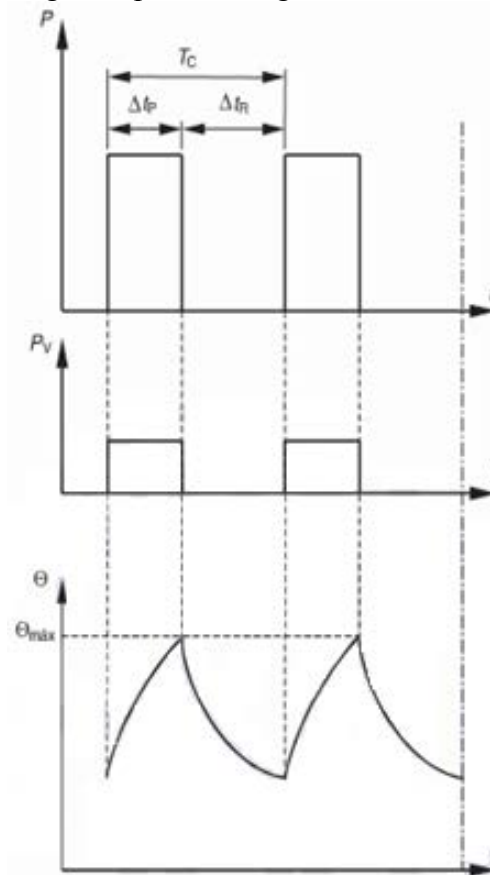
Para que seja escolhido um motor para operar no regime S2, deve-se ter em mente a condição de um MIT que tenha sido projetado para operar em regime S1, de modo que seja capaz de operar uma carga maior que sua potência de placa, sem exceder sua capacidade térmica.

4.3 REGIME INTERMITENTE PERIÓDICO TIPO S3

No **regime S3**, chamado *intermitente periódico*, o MIT aciona uma carga que repete uma sequência de ciclos idênticos, compostos por um período de carga constante e na sequência um período de repouso, de uma maneira tal que a temperatura dos enrolamentos oscila entre o máximo valor da classe de isolamento térmico a qual o MIT foi dimensionado e um valor próximo à temperatura do meio refrigerante, conforme a Figura 4.3:

No primeiro gráfico da Figura 8, observa-se a carga constante em períodos intermitentes, com um período de funcionamento à carga constante (Δt_p) seguido de um tempo desenergizado em repouso (Δt_R), perfazendo a duração de um ciclo ($T_c = \Delta t_p + \Delta t_R$), no segundo, as perdas elétricas que surgem apenas quando a máquina se encontra em operação, e no terceiro, o comportamento térmico do MIT, onde observa-se a oscilação térmica durante os períodos de acionamento e resfriamento intermitentes, o ciclo é tal que a corrente de partida não afeta de forma significativa a elevação de temperatura.

Figura 8– Regime tipo S3 – Regime intermitente periódico



Fonte: Norma NBR 17094-1/2013.

Do gráfico, pode-se definir a grandeza fator de duração do ciclo, que é apresentada na equação (18):

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{\Delta t_p}{T_c} = \frac{\Delta t_p}{\Delta t_p + \Delta t_R} \quad (18)$$

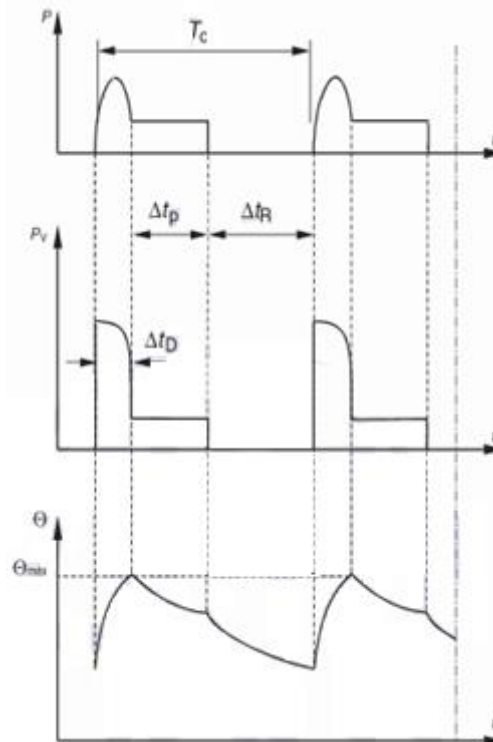
O fator de duração do ciclo, é de tal importância que a correta representação de um MIT operando nesse regime, seria S3 seguido pelo fator de duração do ciclo, como por exemplo, S3 40%.

Assim como no regime anterior, como existem acionamentos e desligamentos e as temperaturas se elevam de maneira a não se atingir o equilíbrio térmico, e desligamentos que quase levam ao resfriamento máximo (temperatura do meio refrigerante), também se pode operar um motor com potência nominal menor que a da carga, uma vez que sua capacidade térmica também não é utilizada em sua totalidade.

4.4 OUTROS REGIMES

No **regime S4**, chamado de regime *intermitente periódico com partidas*, o MIT opera em uma sequência de ciclos, idênticos entre si, semelhante ao S3, porém, não se pode desprezar a influência do calor produzido pela corrente de partida, o que faz concluir, então, que dentro de um intervalo de tempo padronizado pela norma (uma hora), há um elevado número de partidas do MIT, quando comparado ao regime S3, pois deve ter a capacidade de suportar 150, 300 ou até 600 partidas no período de uma hora. A Figura 9 representa o comportamento de um MIT em regime S4:

Figura 9 – Regime tipo S4 – Regime intermitente periódico



Fonte: Norma NBR 17094-1/2013.

Como pode ser observado, no primeiro gráfico da Figura 9, a carga sofre uma oscilação, um *overshoot* durante as partidas, vindo a se tornar constante após um tempo de acomodação, o segundo gráfico, mostra um comportamento semelhante ao da carga, pois ambos sofrem esse *overshoot* durante os intervalos de tempo de aceleração/partida (Δt_D), já o terceiro gráfico, mostra como o calor resultante da corrente de partida influencia a temperatura do MIT, sendo que após várias operações, a temperatura dos enrolamentos

oscilará entre dois valores, de tal maneira que o superior não excede a máxima temperatura da classe de isolamento térmico e o inferior é maior que a temperatura do meio refrigerante.

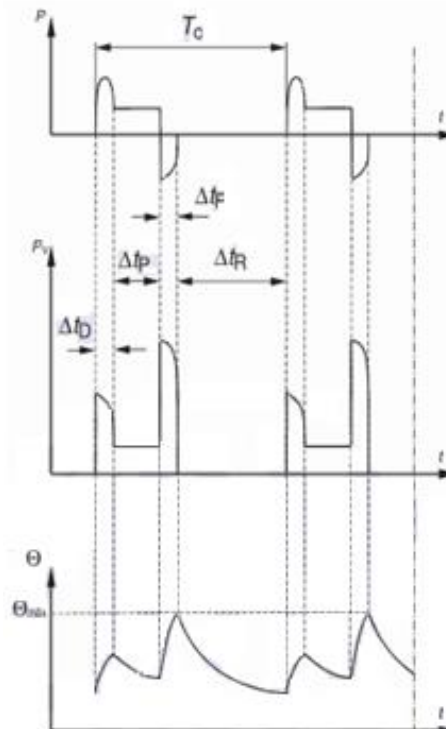
Esse ciclo possui um fator de duração do ciclo diferente do anterior, e é apresentado na equação (19):

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{(\Delta t_D + \Delta t_p)}{T_c} = \frac{(\Delta t_D + \Delta t_p)}{\Delta t_p + \Delta t_R + \Delta t_D} \quad (19)$$

A correta abreviação é S4 seguido pelo fator de duração do ciclo, pelo momento de inércia do motor (J_M) e pelo momento de inércia da carga (J_{ext}), ambos referidos ao eixo do motor, como por exemplo, S4 30% $J_M=0,20 \text{ kg.m}^2$ $J_{ext}=0,9 \text{ kg.m}^2$.

No **regime S5**, chamado de **regime intermitente periódico com frenagem elétrica**, o MIT opera em uma sequência de ciclos, idênticos entre si, de tal forma que sua composição ocorre por um período de partida, um de operação com carga constante, um de frenagem elétrica rápida e um desenergizado e em repouso. O comportamento é mostrado na Figura 10:

Figura 10 – Regime tipo S5 – Regime intermitente periódico com frenagem elétrica



Fonte: Norma NBR 17094-1/2013.

No primeiro gráfico da Figura 10, observa-se que durante a partida a carga sofre um *overshoot*, assim como no regime anterior, e que após um tempo em regime permanente sofre

uma rápida frenagem elétrica com duração Δt_F , até que vai para o período de repouso, no segundo, mostra o comportamento das perdas elétricas, que neste caso sofre dois *overshoots*, um na partida e um maior ainda na frenagem elétrica, uma vez que durante uma frenagem há uma grande dissipação, principalmente na forma de calor, e no terceiro, observa-se o comportamento da temperatura dos enrolamentos, que passa por um aquecimento devido à aceleração/partida (Δt_D), passa por um momento de busca pelo equilíbrio térmico durante a operação à carga constante (Δt_p), sofre um pico de temperatura durante a frenagem elétrica (Δt_F) e busca em seguida, sem sucesso, retornar à temperatura inicial durante o período de repouso (Δt_R) até que outro ciclo recomeça.

A frenagem pode acontecer tanto com a aplicação de uma corrente contínua, como com a utilização de um plugueamento, e interessante observar que o número de operações no período padronizado de uma hora, chega a ser da ordem de grandeza do regime S4.

O fator de duração do ciclo para este regime é dado pela equação (20):

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{(\Delta t_D + \Delta t_p + \Delta t_F)}{T_c} = \frac{(\Delta t_D + \Delta t_p + \Delta t_F)}{\Delta t_p + \Delta t_R + \Delta t_D + \Delta t_F} \quad (20)$$

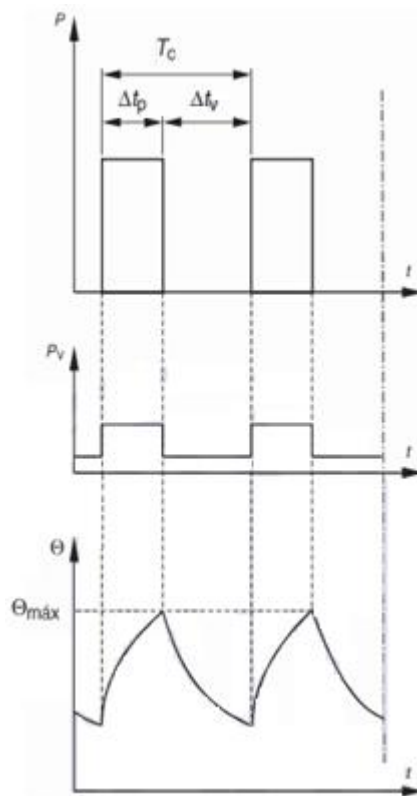
A correta abreviação para este ciclo se assemelha à do ciclo anterior: S5 35% $J_M=0,18$ kg.m² $J_{ext}=0,85$ kg.m²

No **regime S6**, chamado de *regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente*, o MIT irá operar em uma sequência de ciclos, idênticos entre si, sendo que sua composição é caracterizada por cada ciclo possuir um período de carga constante, tendo na sequência um período de operação a vazio, não havendo período de repouso (desenergizado). Um exemplo de carga para um MIT desses seriam compressores de ar para recipientes que devem ser mantidos com uma pressão interna constante, uma vez que a pressão interna diminui, o ciclo é reiniciado, permanecendo operando em vazio quando a pressão se mantém dentro da estabelecida. O comportamento é mostrado na Figura 11.

No primeiro gráfico da Figura 11, observa-se o comportamento da carga, que possui um estágio de funcionamento em carga constante (Δt_p) seguido de um estágio de funcionamento à vazio (Δt_v), no segundo gráfico, fica claro a inexistência de repouso, uma vez que está claramente indicado as perdas durante o repouso da carga, indicando que a máquina se encontra ativa, já o terceiro gráfico, mostra que a temperatura durante a operação em carga constante não atinge o equilíbrio térmico, e durante a operação em vazio, tende a se

aproximar da temperatura inicial, mas permanece acima da mesmo, uma vez que não há repouso.

Figura 11 – Regime tipo S6 – Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente



Fonte: Norma NBR 17094-1/2013.

O fator de duração deste ciclo é dado pela equação (21):

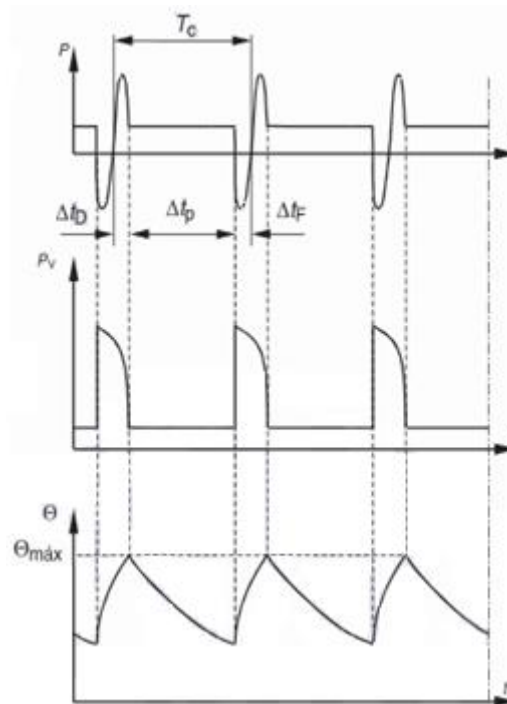
$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{\Delta t_p}{T_c} = \frac{\Delta t_p}{\Delta t_p + \Delta t_v} \quad (21)$$

Donde se observa que as equações (21) e (18) se assemelham, não fosse o fato de no ciclo S6 não haver tempo desenergizado, mas sim tempo a vazio.

A correta abreviação para este ciclo se assemelha à do ciclo anterior: S6 20% $J_M=0,17 \text{ kg.m}^2$ $J_{ext}=0,8 \text{ kg.m}^2$

No **regime S7**, chamado de **regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica**, o MIT opera em uma sequência de dois ciclos, idênticos entre si, sendo um período de partida, um de funcionamento em carga constante e um de frenagem elétrica, não existindo também tempo desenergizado ou em repouso. O comportamento é mostrado na Figura 12:

Figura 12 – Regime tipo S7 – Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica



Fonte: Norma NBR 17094-1/2013.

O primeiro gráfico da Figura 12 mostra o comportamento da carga, submetido a uma frenagem rápida, seguido de uma partida também rápida, com uma sequência de funcionamento à carga constante, repetindo na sequência os ciclos citados indefinidamente. O segundo gráfico, mostra o comportamento das perdas, que indicam o quanto as frenagens e partidas se somam em dissipação de energia. Já o terceiro, mostra o comportamento térmico do motor, que tem um pico de temperatura, acima do limite da classe de isolamento térmico, durante as frenagens e partidas, uma tentativa de resfriar até atingir o equilíbrio na temperatura limite do isolamento térmico que é interrompido no momento das novas frenagens e partidas, recomeçando os ciclos.

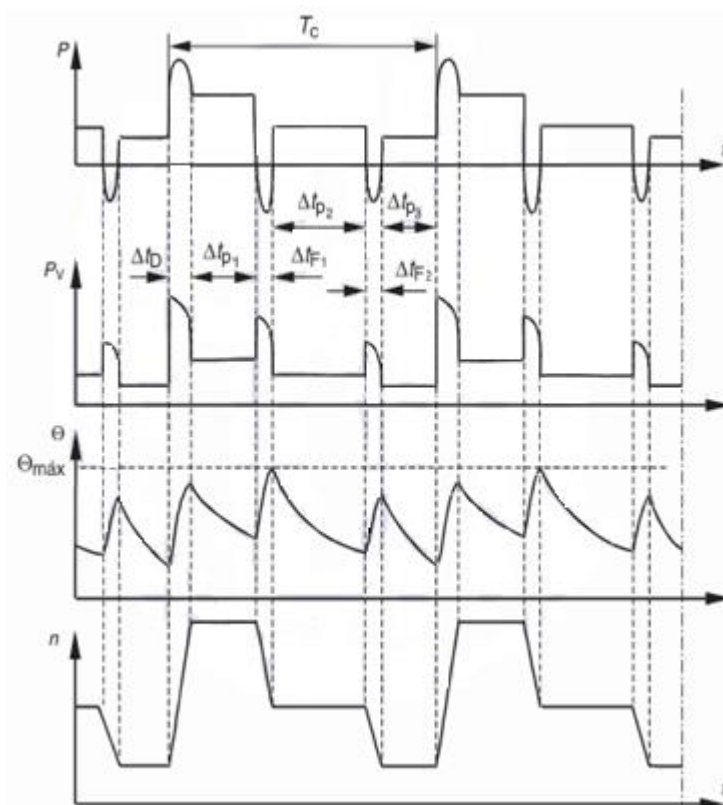
Como se pode observar, o fator de duração do ciclo é igual a 1 (um), uma vez que não existe nem repouso nem momento de funcionamento a vazio.

Um exemplo de utilização é uma ponte rolante que funciona durante todos os turnos de uma indústria efetuando o transporte de peças pesadas durante o dia inteiro e todos os dias, e que durante esse período de atividade, sofra inversões na sequência das fases.

A correta abreviação para este ciclo é S7, acompanhada do momento de inércia do motor e do momento de inércia da carga, ambos referidos ao eixo do motor, como por exemplo, S7 $J_M = 0,5 \text{ kg.m}^2$ $J_{\text{ext}} = 8 \text{ kg.m}^2$.

No regime S8, chamado de *regime de funcionamento contínuo periódico com mudanças correspondentes de carga e de rotação*, o MIT opera em uma sequência de ciclos, idênticos entre si, cada um deles sendo composto por um período de partida e um de operação a carga constante, que corresponde a uma determinada velocidade rotórica, tendo na sequência um ou mais tempos de funcionamento a outras cargas constantes correspondentes a diferentes rotações, inexistindo também tempo de repouso ou desenergizado. O comportamento é apresentado na Figura 13:

Figura 13 – Regime tipo S8 – Regime de funcionamento contínuo periódico com mudanças correspondentes de carga e rotação



Fonte: Norma NBR 17094-1/2013.

O primeiro gráfico da Figura 13, mostra o comportamento na carga, que possui um primeiro ciclo de partida, seguido de um ciclo de regime permanente, seguido de um regime de frenagem, sequência que se repete mas com velocidades rotóricas diferentes, uma vez que as curvas de carga possuem patamares diferentes, sendo claro no quarto gráfico, que mostra como a velocidade está variando. O segundo gráfico mostra o comportamento das perdas, que indicam o esperado, ou seja, que para diferentes velocidades, têm-se diferentes valores de

perdas. O terceiro gráfico mostra o comportamento térmico, indicando que não há equilíbrio térmico nem extrapolação da temperatura máxima da classe de isolamento.

O fator de duração do ciclo é calculado para cada uma das cargas constantes, conforme a equação (22):

$$\text{Fator de duração do ciclo} = \frac{(\Delta t_{p1} + \Delta t_D)}{T_c} ; \frac{(\Delta t_{p2} + \Delta t_D)}{T_c} ; \frac{(\Delta t_{p3} + \Delta t_D)}{T_c} \quad (22)$$

$$\text{Onde } T_c = \Delta t_{p1} + \Delta t_{p2} + \Delta t_{p3} + \Delta t_D + \Delta t_{F1} + \Delta t_{F2}$$

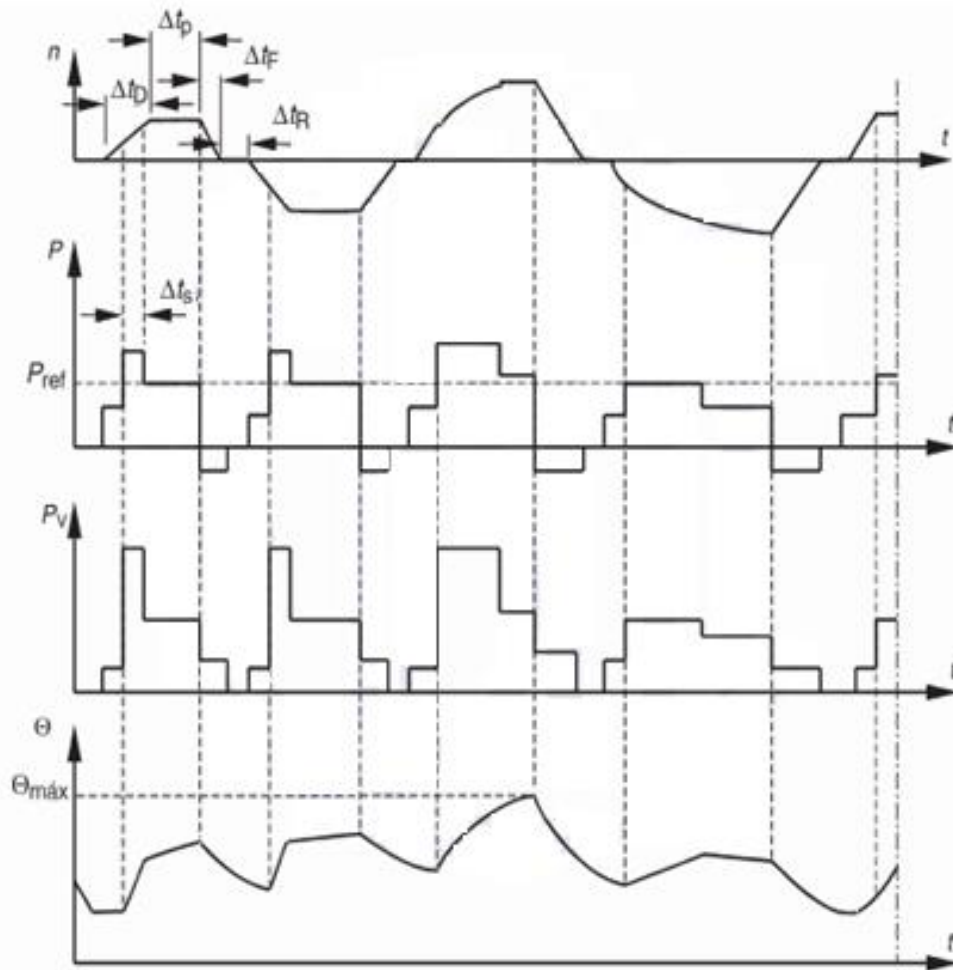
A correta abreviação para este ciclo é S8, acompanhada do momento de inércia do motor (J_M) e do momento de inércia da carga (J_{est}), ambos referidos ao eixo do motor, acrescido da carga, rotação e fator de duração do ciclo, estes últimos, para uma ou mais rotações, como por exemplo, para três rotações diferentes, com potências diferentes e fatores de duração do ciclo diferentes:

S8	$J_M = 0,4 \text{ kg.m}^2$	$J_{ext} = 7 \text{ kg.m}^2$	17 kW	740 rpm	30%
			40 kW	1460 rpm	30%
			26 kW	980 rpm	40%

No **regime S9**, chamado de *regime com variações não periódicas de carga e de rotação*, o MIT opera em uma sequência não periódica, mas dentro de uma faixa de funcionamento que seja admissível, sendo que tal regime também pode ter incluso sobrecargas que sejam muito superiores à carga de referência. Seu comportamento é mostrado na Figura 14:

No primeiro gráfico da Figura 14, observa-se o comportamento da variação da velocidade rotórica, com trechos de aceleração/partida, funcionamento com sobrecarga, funcionamento à carga constante, frenagem e repouso, e na sequência uma inversão de sentido com as mesmas categorias seguido de um novo ciclo com velocidade rotórica diferente (no caso, maior). No segundo, observa-se o comportamento da carga, em relação à carga de referência, já citada, sendo de fácil visualização os instantes de sobrecarga e regimes de frenagem elétrica, aceleração, carga constante e repouso. O terceiro gráfico mostra o comportamento das perdas elétricas, que tem um pico nos momentos de sobrecarga (comportamento já esperado). Já o quarto e último gráfico apresenta o comportamento térmico do MIT nesse regime, onde se percebe que a temperatura cresce a uma taxa maior durante as sobrecargas e quanto maior a velocidade rotórica, maior a temperatura (comportamento também já esperado).

Figura 14 – Regime tipo S9 – Regime com variações não periódicas de carga e rotação



Fonte: Norma NBR 17094-1/2013.

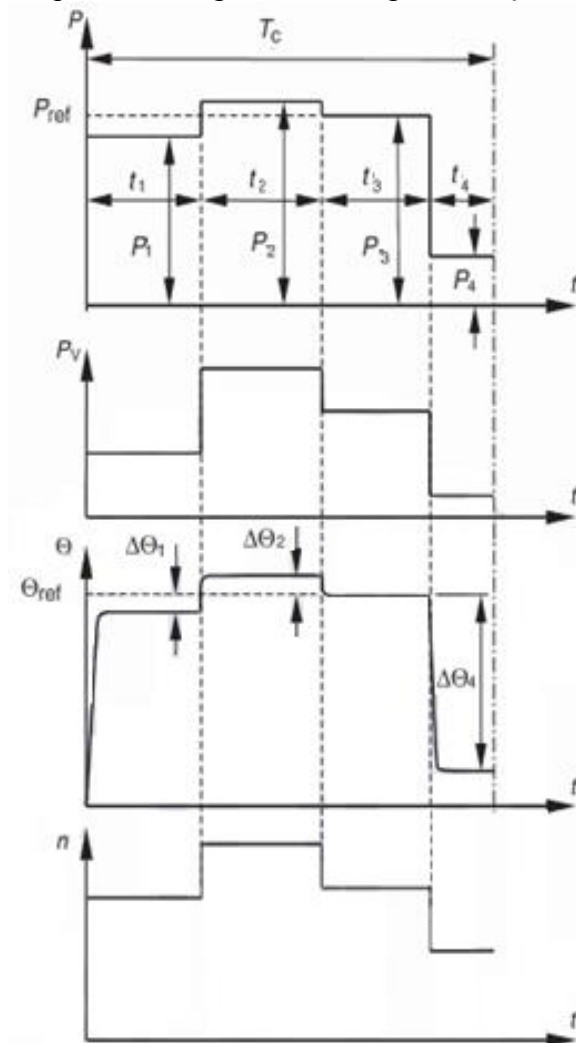
Neste regime, uma carga constante, escolhida de forma adequada sendo baseada no regime S1, é tomada como carga de referência (P_{ref}) para fins de avaliação da sobrecarga.

Como se trata de um regime não periódico, não faz sentido falar em fator de duração do ciclo.

A abreviação correta seria apenas S9.

No **regime S10**, chamado de *regime com cargas e rotações distintas*, o MIT opera uma quantidade específica de cargas de valores distintos, e caso possível, também uma variedade específica de valores da velocidade rotórica, sendo que para cada combinação carga/rotação seja mantida por um tempo que venha a ser o suficiente para que o equilíbrio térmico do MIT seja alcançado, sendo que a carga mínima durante um ciclo pode assumir valor zero (no caso de repouso ou operação a vazio). A Figura 15 indica a operação deste regime:

Figura 15 – Regime tipo S10 – Regime com cargas e rotações constantes distintas



Fonte: Norma ABNT/NBR 17094-1/2013.

No primeiro gráfico da Figura 15, observa-se o comportamento de, neste caso, 4 (quatro) cargas constantes de um período de carga dentro de um ciclo de cargas (P_i , neste caso com i variando de 1 a 4), cada uma com uma duração de tempo de carga constante dentro de um ciclo (t_i , neste caso com i variando de 1 a 4), em comparação com uma carga constante de referência (P_{ref}), que é baseada no regime tipo S1, sendo que os valores de P_{ref} e de T_c (duração de um ciclo) são tomados como base para a obtenção dos valores em pu (por unidade). No segundo gráfico, tem-se o comportamento das perdas elétricas para cada uma das cargas já citadas. No terceiro gráfico, tem-se o comportamento térmico do MIT para cada uma das cargas do ensaio, indicando sobrecarga, sobcarga, carregamento nominal, de forma que cada combinação de carga/rotação dure tempo suficiente para que o equilíbrio térmico seja alcançado. Já o quarto gráfico, apresenta a variação das velocidades rotóricas para cada caso.

A correta abreviação é S10 acompanhado pelo valor por unidade (pu) $P/\Delta t$ para a carga, com sua duração e também o valor em pu da “expectativa de vida térmica relativa, expressa em %, da expectativa de vida térmica no caso de regime tipo S1 à potência nominal”(ABNT/NBR 17094-1/2013), ou seja, TL, e caso seja um período de repouso, $P/\Delta t$ fica sendo $r/\Delta t$, ou seja, troca-se a carga por “r” de repouso, por exemplo, S10 $p/\Delta t = 1,1/0,4; 1/0,3; 0,9/0,2; r/0,1$ TL=0,6.

De acordo com o anexo B da norma NBR 17094-1/2013, o valor de TL deve ser arredondado para um valor múltiplo de 0,05.

Por se tratar de um regime muito específico, não é tratado neste trabalho a forma de especificação de TL.

5. EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO DE MIT BASEADO NOS TRÊS PRINCIPAIS CICLOS DE OPERAÇÃO

Como já citado neste trabalho, os regimes S1, S2 e S3 são os mais utilizados e com uma maior gama de aplicações, logo vale ressaltar alguns métodos de dimensionamento de MIT especificamente para cada um desses regimes.

5.1. DIMENSIONANDO UM MIT PARA OPERAR NO REGIME S1

Caso se tenha máquinas a serem acionadas por um MIT que possuam suas características mecânicas constantes, torna-se um trabalho fácil o dimensionamento no regime S1.

Por exemplo, caso se tenha um guindaste que é acionado por um MIT, e sabe-se a força (F) exercida pela massa a ser erguida e a máxima velocidade (v) suportada sem que cause perigo na operação, pode-se dizer o que mostra a equação (23):

$$P = F \times v \quad (23)$$

E caso a força F seja dada em Newton, e a velocidade v em metros/segundo, a potência P já é obtida em watts.

Mas caso seja um ventilador, é necessário saber a vazão de ar (V) em [m³/s], a pressão contra qual o ventilador opera (h) em [N/s²] e o rendimento do ventilador (η), então a potência é dada pela equação (24):

$$P = \frac{V \times h \times 0,001}{\eta} \quad (24)$$

E caso seja uma bomba hidráulica, faz-se necessário conhecer a densidade do líquido bombeado (γ) em [N/m³], a vazão da bomba (Q) em [m³/s], o rendimento da bomba (η), a altura manométrica total (H) em [m] e dessa forma obtém-se a equação (25):

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H \times 0,001}{\eta} \quad (25)$$

Ou seja, para se especificar um MIT para operar no regime S1, basta determinar a potência necessária e respeitar o nível de isolamento térmico da classe a que ele foi dimensionado.

5.2. DIMENSIONANDO UM MIT PARA OPERAR NO REGIME S2

Primeiramente, devem-se definir alguns parâmetros: fator de sobrecarga térmica (P_T) e fator de sobrecarga mecânica (P_m).

Reescrevendo a equação (17), obtém-se a equação (26) que é a do fator de sobrecarga térmica (P_T):

$$\frac{\Theta_0}{\Theta} = \left(\frac{-t}{T_A} \right)^{-1} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{nom}} = P_T \quad (26)$$

Onde ΔP são as perdas totais do MIT, ΔP_{nom} são as perdas nominais, T_A é a constante de tempo térmica de aquecimento

Conhecido o fator de sobrecarga mecânica, e rearranjando a equação (26), chega-se à equação (27):

$$t = T_A \ln \frac{P_T}{P_T - 1} \quad (27)$$

O fator de sobrecarga mecânica (P_m) é definido segundo equação (28):

$$P_m = \frac{P}{P_{nom}} \quad (28)$$

Onde P é a máxima potência que o MIT fornece em um regime diferente de S1 e P_{nom} é a potência nominal definida para o regime S1.

Considerando que as relações entre as perdas totais, perdas joule, perdas a vazio e o fator de sobrecarga mecânica são dadas pela equação (29):

$$\Delta P = \Delta P_v + \Delta P_j \times (P_m)^2 \quad (29)$$

Onde ΔP_v são as perdas a vazio e ΔP_j são as perdas joule, pode-se definir um parâmetro α definido pela equação (30):

$$\alpha = \frac{\Delta P_v}{\Delta P_j} \quad (30)$$

Então, pode-se reescrever P_m em função de α e P_T , como apresentado na equação (31):

$$P_m = [(\alpha + 1) \times P_T - \alpha]^{1/2} \quad (31)$$

Dessa maneira, a máxima potência que um MIT pode fornecer ao seu eixo quando operar em regime S2 pode ser determinado utilizando a equação (28).

Então, para exemplificar, pode-se considerar um MIT com potência nominal de 5,5 kW, 60 Hz, 220 V, relação entre os conjugados máximo e nominal igual a 2,8, classe B (temperatura máxima admissível de 130 °C). Obtém-se que a relação entre as perdas a vazio e joule o valor de 33% na condição normal de operação. Neste caso qual seria a máxima potência que ele poderia fornecer durante 5 minutos em regime S2, usando toda sua capacidade térmica? E quanto tempo suportaria acionar uma carga de 8 kW?

RESOLUÇÃO:

Inicialmente, com a relação entre os conjugados fornecida, faz obtém-se o fator de sobrecarga momentânea definido pela equação (5), obtendo-se, $\lambda = 2,8$.

Em posse desse valor, utiliza-se a equação (26), e obtém-se o fator de sobrecarga térmica, $P_T = 4,12$.

Para determinar a potência mecânica que pode ser fornecida, tem-se que utilizar a equação (31) e primeiro encontrar o fator de sobrecarga mecânica, o que nesse caso, nos

fornece o valor de $P_m = 2,27$, e como $P_m < \lambda$, o MIT possui condições de suportar a sobrecarga.

Finalizando, utilizando a equação (28), chega-se ao valor de 12,48 kW, ou seja, para uma operação de 5 minutos nas condições citadas, um MIT de 5,5 kW pode fazer a função que um MIT com um pouco mais que o dobro de sua potência faria, economizando no custo de aquisição do motor, de manutenção e nos gastos com eletricidade.

A segunda parte, e quanto operaria uma carga de 8 kW?

Primeiramente, calcula-se um novo P_m com a equação (28), obtendo o valor de 1,45, sendo $P_m < \lambda$ (novo $P_m = 1,45$ e $\lambda = 2,8$), o que comprova a viabilidade da utilização. Na sequência, com o novo valor de P_m calcula-se um novo valor de P_T pela equação (31), encontrando $P_T = 1,83$.

A última etapa é com o novo valor de P_T encontrar o tempo usando a equação (27), donde se encontra 14,2 minutos, mostrando a viabilidade de uso de um motor mais fraco para operar uma carga mais forte sem comprometer sua vida útil.

5.3. DIMENSIONANDO UM MIT PARA OPERAR NO REGIME S3

Para dimensionar um MIT para operar no regime S3, faz-se uso de alguns parâmetros mencionados no tópico anterior: P_m (fator de sobrecarga mecânica) e P_T (fator de sobrecarga térmica).

Como esse regime possui uma grandeza que os outros não possuem, o fator duração do ciclo (FDC), apresentado na equação (18), tem-se algumas mudanças na grandeza P_T (fator de sobrecarga térmica).

O Fator de sobrecarga térmica é dado pela equação (32):

$$P_T = \frac{\left[\frac{-t \times 1}{t_R \text{ FDC}} \right]}{\left[\frac{-t}{T_A} \right]} \quad (32)$$

O fator de sobrecarga mecânica permanece inalterado, conforme a equação (31).

Como exemplo, tem-se um MIT, que deve operar com um tempo de funcionamento à carga constante (Δt_p) de 5 minutos, com uma potência de 25 kW, um tempo de repouso (Δt_R) de 7,5 minutos, com o ciclo se repetindo durante todo o dia. Se a relação entre as perdas a vazio e elétricas é igual a 0,333, e a constante térmica de aquecimento (T_A) é igual a 25 minutos e a constante térmica de resfriamento igual a 50 minutos, qual deve ser a potência nominal do MIT a ser usado nessa situação?

RESOLUÇÃO:

Primeiramente, deve-se encontrar o fator de duração do ciclo, conforme a equação (18), o que resulta em 0,4 ou 40 %.

Como as constantes de tempo térmicas T_A e T_R foram dadas, utilizando a equação (32), resulta um fator de sobrecarga térmica (P_T) de 1,22.

Com o valor de P_T , utilizando a equação (31), resulta em um fator de sobrecarga mecânica (P_m) igual a 1,137.

Com o valor de P_m em mãos, substituindo na equação (28), obtém-se uma potência nominal (P_{nom}) igual a 22 kW.

Ou seja, um MIT de 22 kW é capaz de desempenhar um ciclo contínuo, com intervalos de operação e repouso que possui uma carga de 25 kW, sem danificar ou desobedecer o limite do isolamento térmico a que ele é dimensionado.

6. INFLUÊNCIA DA ALTITUDE NO DESEMPENHO DO MIT

Como dito anteriormente, a temperatura do meio refrigerante influencia diretamente na elevação de temperatura do MIT, e a esmagadora maioria dos MIT utilizam o ar como meio refrigerante, exceção feita a motores especiais e de grande potência que fazem uso de outros gases, como por exemplo o nitrogênio como meio refrigerante, ou os que fazem uso de trocadores de calor ar-água, transformando assim a água em um meio refrigerante indireto.

Portanto, tem-se um binômio: para que um MIT tenha um bom desempenho, a sua elevação de temperatura não pode exceder os valores máximos da classe de isolamento térmico, logo o sistema de refrigeração deve ser o mais eficiente possível, e nos MIT de carcaça fechada, refrigerados a ar, tem-se a dependência de alguns fatores para que haja uma boa dissipação de calor: o primordial, é um sistema de ventilação eficiente, seguido com a superfície externa que está em contato com o ambiente, superfície esta aumentada pelas aletas da carcaça e a diferença entre a temperatura ambiente e da carcaça do MIT, já que quanto maior tal diferença, melhor, pois há mais transferência de calor.

Conforme estabelecido pela norma ABNT/NBR 17094-1/2013, os MIT são produzidos visando atender duas condições do ambiente operativo: altitude não acima de 1000 m e temperatura ambiente não superior a 40 °C, pois quando obedecidos tais limites, tem-se as condições de trabalho que são chamadas de normais.

Caso as condições normais não são atendidas, não há garantia da potência nominal do MIT.

Quando temos altitudes acima de 1000 m, o ar acaba por ser mais rarefeito, logo há uma refrigeração deficiente, haja vista que a vazão de ar entregue pelo ventilador é reduzida, e devem ser tomadas providências, conforme diz a norma NBR - 17094-1/2013:

“9.4.4.1.1 Correção para diferença de altitude

Esta correção se aplica quando ambos os locais, de funcionamento e de ensaio, estão em altitude não superior a 4000 m; se pelo menos um dos locais estiver em uma altitude superior a 4000 m, uma correção deve ser aplicada mediante acordo entre fabricante e comprador. Para cada parte do motor, uma correção "A" deve ser calculada pela equação:

$A = 0,0001(H_T - H_S)\Delta\theta_S$. H_T ou H_S inferiores a 1000 m, devem ser considerados iguais a 1000m, isto é, nenhuma correção é aplicável se ambos os locais estiverem em uma altitude inferior 1000 m. Se

somente um local estiver em uma altitude superior a 1000 m, a correção é proporcional ao excesso acima de 1000 m e não à diferença entre as duas altitudes.

Então:

$$\Delta\theta_T = \Delta\theta_S + A$$

Nota: “A” é negativo se o local de funcionamento for mais elevado que o local de ensaio.

Sendo H_T a altitude no local do ensaio, H_S a altitude no local de funcionamento, $\Delta\theta_S$ o limite de elevação da temperatura aplicável ao local de funcionamento e $\Delta\theta_T$ o limite de elevação de temperatura aplicável ao local de ensaio.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma análise térmica de motores de indução trifásicos, à sombra das normas de especificação dos mesmos, visando uma escolha e operação mais eficiente, assim com também os efeitos causados pela operação acima de 1000 m do nível do mar.

Dada a circunstância de que os MIT são os mais usados tanto no âmbito industrial e comercial, saber como dimensioná-los corretamente de acordo com o seu uso e regimes de trabalho, atentando para seu comportamento térmico, mostra-se como algo muito vantajoso do ponto de vista econômico no que tange ao aumento da vida útil do motor, como a aquisição de um com características que possibilitem que opere com cargas de potências maiores que a sua nominal mas que não acarretem danos, uma vez que em alguns casos não se faz necessário um motor que opere indefinidamente sem descanso; salientando também a importância de se saber especificar adequadamente as correções inerentes à operação em altitudes acima de 1000 m, uma vez que foi mostrado que devido ao ar rarefeito, há um déficit no arrefecimento do motor, sendo necessárias ressalvas quanto a sua potência e temperatura para não haver uma sobrecarga desnecessária e danos ao MIT.

Portanto, a conclusão que este trabalho chega, é que a importância de saber para qual fim o MIT é destinado, aliado ao binômio de sua classe de isolamento térmico, e ciclos operativos, podem sim fazer diferença monetariamente tanto beneficiando como prejudicando, como mostrado nas situações hipotéticas para os três primeiros regimes operativos, e também, por exemplo, se um MIT sofrer dano em seus enrolamentos devido a superaquecimento por uso em um regime indevido, a manutenção se torna desvantajosa, sendo necessário a substituição do mesmo. Assim, deve-se mudar a forma como é solicitado um MIT, e levar em consideração os aspectos apresentados neste trabalho.

Pode-se dizer que faz-se necessário uma mudança na filosofia para especificação e dimensionamento de MIT, uma vez que ainda hoje não se faz o apresentado neste trabalho, e dado o aqui exposto, é muito importante ter em mente que na atualidade, a economia energética é algo de suma importância, logo, havendo a possibilidade de adquirir um motor de menor potência, e conseqüentemente de menor gasto de energia elétrica, vem a baratear a conta de energia elétrica e as manutenções, já que estão bem dimensionados e menos suscetíveis a danos por má operação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094**: 2013: máquinas elétricas girantes: motor de indução trifásico. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 77 p.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. São Paulo: Érica, 2014. 250p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos da física – eletromagnetismo**. v. 3. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 334p.

RUPPERT FILHO, E.; ARANGO, H.; SÁ, J. S. *Analysis of squirrel-cage induction motor rotor bars thermal behavior*. Proc. of International Conference on Electrical Machines, p. 245-250, Massachusetts, USA, 1990

SÁ, J. S. **Contribuição à análise do comportamento térmico de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola**. Dissertação (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.

TIPLER, P. **Física para cientistas e engenheiros – eletricidade e magnetismo**. v. 3. Rio de Janeiro: LTC, 1995. 335p.

WEG (Jaraguá do Sul). **Catálogos diversos**. Disponível em: <<http://www.weg.net>>. Acesso em: 17 Out. 2015.

ZHU, D. S.; CHAMPENOIS, G.; ROYE, D. *Coupling of Electrical and Thermal Models of an Induction Motor for Performance Predictions*. Proc. of International Conference on Electrical Machines, p. 281-286, Massachusetts, USA, 1990.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5383**: 2002: parte 1: motor de indução trifásico - ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 62 p.

AVÓLIO, E. **Uma contribuição ao estudo do comportamento térmico e do desempenho elétrico de motores de indução com rotor em gaiola**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 550 p.

FERNANDES FILHO, G. E. F.; DIAS, R. A. **Comandos elétricos – componentes discretos, elementos de manobra e aplicações**. São Paulo: Érica, 2014. 184 p.

FITZGERALD, A. E. **Máquinas elétricas**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. São Paulo: Érica, 2014. 250 p.

KLINGSHIRM, E. A.; JORDAN, H. A. *Polyphase induction motor performance and losses on nonsinusoidal voltage sources*. *IEEE Trans.* on PAS, v. 87, n. 3, USA, 1968

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. São Paulo: Globo, 2005. 667 p.

KOSTENKO, M.; PIOTROVSKY, L. **Electrical Machines**. MOSCOU: MIR, 1969.

LOBOSCO, O. S.; DIAS, J. L. P. C. **Seleção e aplicação de motores elétricos**, v. I e 2. São Paulo: McGraw Hill, 1988.

MCPHERSON, G.; LARAMORE, R. D. **An introduction to electrical machines and transformers**. 2. ed. Nova Iorque: Wiley, 1990. 592 p.