

CLOVIS BAUER

**ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA
PELO MÉTODO “FORWARD SHORT CIRCUIT” EM
MOTORES DE INDUÇÃO**

**FLORIANÓPOLIS
2008**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA
PELO MÉTODO “FORWARD SHORT CIRCUIT” EM
MOTORES DE INDUÇÃO**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

CLOVIS BAUER

Florianópolis, Julho de 2008.

ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PELO MÉTODO “FORWARD SHORT CIRCUIT” EM MOTORES DE INDUÇÃO

Clovis Bauer

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



João Pedro Assumpção Bastos, Dr. Etat
Orientador



Kátia Campos de Almeida, Ph.D.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



João Pedro Assumpção Bastos, Dr. Etat
Presidente



Patrick Kuo-Peng, Dr.



Sebastião Lauro Nau, Dr.



Nelson Sadowski, Dr.



Nelson Jhoé Batistela, Dr.

Para minha filha Luiza.

Agradecimentos

Agradeço à minha esposa, Odília pela paciência e apoio durante a elaboração deste trabalho.

À minha família, meu pai Vitor, minha mãe Waltraud e minha irmã Greice, por sempre me apoiarem e incentivarem nos estudos.

Ao meu orientador, Prof. João Pedro Assumpção Bastos, pela sua orientação segura e sugestões que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também por sua paciência em me atender tanto em Florianópolis como em Jaraguá do Sul.

À empresa WEG pela oportunidade e incentivo em participar do Mestrado Profissionalizante da UFSC.

Aos professores da UFSC pela dedicação e empenho durante a fase de disciplinas do mestrado.

Aos colegas de trabalho na WEG pelo incentivo e apoio.

Ao Engenheiro Alcides Teixeira Tavares Jr., gerente da qualidade da WEG Energia, pelo incentivo e apoio durante o mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PELO MÉTODO “FORWARD SHORT CIRCUIT” EM MOTORES DE INDUÇÃO

Clovis Bauer

Julho/2008

Orientador: João Pedro Assumpção Bastos, Dr.

Co-Orientador: Patrick Kuo-Peng, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: Motor de indução, Carga equivalente, Elevação de temperatura.

Número de Páginas: 63.

RESUMO: O presente trabalho aborda o estudo de um método alternativo de carga equivalente para determinação da elevação de temperatura em motor de indução chamado “*forward short circuit*”. O estudo apresenta a fundamentação teórica do ensaio, o procedimento para realizar o ensaio, as características das máquinas utilizadas no ensaio e o cálculo da elevação de temperatura. É realizado um estudo sobre o comportamento das perdas do motor durante o ensaio de “*forward short circuit*”, principalmente as perdas do rotor. Com o estudo das perdas do rotor são apresentados fatores que influenciam no aumento da temperatura do rotor causado pelo aumento do escorregamento. Alguns parâmetros do circuito equivalente do motor de indução são determinados a partir de dados do ensaio. São apresentados modelos de estrutura de laboratório para a execução do ensaio de temperatura pelo método “*forward short circuit*”. Também é avaliada a eficácia do método “*forward short circuit*” para determinação da elevação de temperatura em motores de indução comparando com o método dinamométrico. São apresentados resultados de ensaios em diversos motores que foram submetidos ao método “*forward short circuit*” e dinamométrico. Os motores utilizados nos experimentos são divididos em duas categorias: motor de indução com rotor de gaiola e motor de indução com rotor bobinado.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

TEMPERATURE RISE TESTING BY THE “FORWARD SHORT CIRCUIT” METHOD IN INDUCTION MOTORS

Clovis Bauer

July /2008

Advisor: João Pedro Assumpção Bastos, Dr.

Co-Advisor: Patrick Kuo-Peng, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: Induction machine, Equivalent loading, Temperature rise.

Number of Pages: 63.

ABSTRACT: The present work tackles the study of an alternative equivalent loading method for determination of the temperature rise in induction motor called “*forward short circuit*”. The theory fundamentals of the test, the procedure to carry through the test, the characteristics of the machines used in the test and the calculation of the temperature rise have been studied. A study on the behavior of the losses of the motor during the test of “*forward short circuit*” is carried through, mainly the losses of the rotor. With the study of the losses of the rotor factors are presented that influence in the increase of the temperature of the rotor caused by the increase of the slipping. Some parameters of the equivalent circuit of the induction motor are determined from the testing data. Models of structure of laboratory for the execution of the temperature test by “*forward short circuit*” are presented. Also the effectiveness of the “*forward short circuit*” method for determination of the temperature rise in induction motors is evaluated and compared with the dynamometric method. Test results for different motors that had been submitted to the “*forward short circuit*” and dynamometric methods are presented. The motors used in the experiments are divided in two categories: squirrel cage and wound rotor induction motors.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVO GERAL.....	2
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4	METODOLOGIA	3
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	ASPECTOS TÉRMICOS	5
2.1	INTRODUÇÃO	5
2.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	5
2.3	CONDUÇÃO.....	6
2.4	CONVECÇÃO.....	7
2.5	RADIAÇÃO.....	9
2.6	TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO MOTOR DE INDUÇÃO	10
3	DESCRIÇÃO DO MÉTODO FORWARD SHORT CIRCUIT	12
3.1	INTRODUÇÃO	12
3.2	MÉTODOS PARA DETERMINAR A ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA.....	12
3.3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO ENSAIO	14
3.4	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	16
3.5	DETERMINAÇÃO DO GRUPO GERADOR (G E DM-2)	17
3.6	DETERMINAÇÃO DO MOTOR ACIONANTE (DM-1).....	18
3.7	CARACTERÍSTICAS DO MOTOR TM.....	19
3.8	MEDIDAS E CÁLCULOS DO ENSAIO	19
3.9	ANÁLISE DO ENSAIO	21
4	PERDAS EM FORWARD SHORT CIRCUIT	23
4.1	DETERMINAÇÃO DAS PERDAS.....	23
4.2	PERDA MECÂNICA	23
4.3	PERDA NO FERRO.....	24
4.4	PERDA JOULE NO ESTATOR	25
4.5	PERDA JOULE NO ROTOR.....	25
4.5.1	<i>Rotores de Gaiola e Rotores Bobinados</i>	<i>25</i>
4.5.2	<i>Escorregamento do Motor.....</i>	<i>27</i>
4.5.3	<i>Perdas no Rotor</i>	<i>28</i>
4.6	PERDA SUPLEMENTAR.....	30
5	PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE	32
5.1	CIRCUITO EQUIVALENTE.....	32
5.2	PARÂMETROS DO ESTATOR	32
5.3	PARÂMETROS DO ENTREFERRO	33
5.4	PARÂMETROS DO ROTOR.....	34
6	ESTRUTURA PARA TESTE DE MOTORES EM FORWARD SHORT CIRCUIT	36
6.1	INTRODUÇÃO	36
6.2	ESTRUTURA PARA MÉTODO DINAMOMÉTRICO	36
6.3	ESTRUTURA PARA FORWARD SHORT CIRCUIT.....	38

7	COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO DINAMOMÉTRICO E FORWARD SHORT CIRCUIT	41
7.1	INTRODUÇÃO	41
7.2	RESULTADOS DE ENSAIOS EM MOTORES COM ROTOR DE GAIOLA.....	41
7.3	RESULTADOS DE ENSAIOS EM MOTORES COM ROTOR BOBINADO.....	48
7.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	56
8	CONCLUSÕES.....	58
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

Listas de Figuras

Figura 2.1-Motor de indução aletado.	8
Figura 2.2-Motor de indução com trocador de calor.	9
Figura 3.1-Motor acoplado num dinamômetro de 600kW.	13
Figura 3.2-Circuito equivalente do motor.	14
Figura 3.3-Circuito equivalente do motor a vazio.	15
Figura 3.4-Circuito equivalente do motor com rotor bloqueado.	15
Figura 3.5-Circuito equivalente para “ <i>forward short circuit</i> ”.	16
Figura 3.6-Modelo para teste em “ <i>forward short circuit</i> ”.	16
Figura 4.1- Exemplo de curva a vazio de motor de indução.	24
Figura 4.2-Rotor de gaiola com barra de cobre.	26
Figura 4.3-Rotor de gaiola com alumínio injetado.	26
Figura 4.4-Rotor bobinado.	27
Figura 5.1 - Circuito equivalente para “ <i>forward short circuit</i> ”.	32
Figura 6.1-Diagrama de laboratório de 600kW.	36
Figura 6.2-Diagrama de laboratório dinamométrico.	37
Figura 6.3-Capacidade de teste em função da rotação do motor para teste.	38
Figura 6.4 -Diagrama de laboratório para “ <i>forward short circuit</i> ”.	39
Figura 6.5 - Estrutura de teste usando motor CC.	40
Figura 7.1 - Elevação de temperatura motor número 1.	43
Figura 7.2 - Elevação de temperatura no PT-100 do motor 2.	44
Figura 7.3 - Elevação de temperatura no PT-100 do motor 3.	46
Figura 7.4-Motor rotor de gaiola em “ <i>forward short circuit</i> ”.	48
Figura 7.5 - Elevação de temperatura no PT-100 do motor 05.	50
Figura 7.6 - Forma de onda da corrente do rotor no método dinamométrico.	51
Figura 7.7 - Forma de onda da corrente do rotor para “ <i>forward short circuit</i> ” com 80% da frequência.	52
Figura 7.8 - Forma de onda da corrente do rotor para “ <i>forward short circuit</i> ” com 120% da frequência.	52
Figura 7.9 - Forma de onda da corrente do rotor para método dinamométrico.	54
Figura 7.10 - Forma de onda da corrente do rotor para “ <i>forward short circuit</i> ” com 120% da frequência.	54
Figura 7.11 - Forma de onda da corrente do rotor para “ <i>forward short circuit</i> ” com 80% da frequência.	55

Listas de Tabelas

Tabela 3.1-Temperatura limite.....	21
Tabela 4.1 - Valores de perda para motor 168 kW.	31
Tabela 5.1 - Parâmetros circuito equivalente.	35
Tabela 7.1 - Valores para determinar a elevação de temperatura em “ <i>forward short circuit</i> ”.	42
Tabela 7.2 - Resultados da elevação de temperatura do motor n° 1.	42
Tabela 7.3 - Valores para determinar temperatura para o motor 02.	43
Tabela 7.4 - Resultados de elevação de temperatura do motor 02.....	44
Tabela 7.5 - Valores para determinar temperatura para o motor 3.	45
Tabela 7.6 - Resultados de elevação de temperatura do motor n°3 45	45
Tabela 7.7 - Resultados de elevação de temperatura do motor 4 para 50 Hz..... 46	46
Tabela 7.8 - Resultados de elevação de temperatura do motor 4 em 65 Hz..... 47	47
Tabela 7.9 - Valores para determinar a elevação de temperatura. 49	49
Tabela 7.10 - Resultados de elevação de temperatura do motor 05. 49	49
Tabela 7.11 - Resultados de elevação de temperatura do motor 06. 50	50
Tabela 7.12 - Valores de corrente e frequência no rotor. 53	53
Tabela 7.13 - Resultados de elevação de temperatura do motor 07. 53	53
Tabela 7.14 - Valores de corrente e frequência no rotor. 55	55
Tabela 7.15 - Elevação de temperatura no rotor para motor com rotor bobinado. 56	56
Tabela 7.16 - Elevação de temperatura no estator. 56	56

Simbologia

Símbolo	Significado	Unidade
λ	Condutividade térmica do material	W/m.°C
ϵ	Emissividade da superfície cinzenta	-
ΔT	Elevação de temperatura	K
c	Calor específico	J/kg.°C
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	W/m ² .°C
I_1	Corrente de fase do estator	A
I_2	Corrente na barra da gaiola do rotor	A
m	Densidade específica de massa	kg/m ³
m	Número de fases do enrolamento	-
n	Direção normal à superfície S	-
N_2	Número de barras da gaiola do rotor	-
N_r	Velocidade angular do rotor	rpm
N_s	Velocidade angular do campo magnético	rpm
P_{fe}	Perda no ferro	W
P_g	Potência entregue pelo gerador G, ao motor em teste TM	W
P_{j1}	Perda Joule no estator	W
P_{j2}	Perda Joule no rotor	W
P_{jo}	Perda Joule a vazio na tensão nominal	W
P_{mec}	Perda mecânica	W
P_o	Perda a vazio na tensão nominal	W
P_s	Perda Suplementar	W
q	Taxa de calor gerado por unidade de volume	J/m ³

Q_b	Potência reativa de bloqueado	kVAr
q_s	Taxa de transferência de calor da superfície S	W
R_1	Resistência de fase do estator	Ω
R_2	Resistência de fase da gaiola do rotor	Ω
R_c	Resistência de perdas no ferro	Ω
$R_f(75^\circ\text{C})$	Resistência de fase do estator para temperatura de 75°C	Ω
R_f	Resistência a frio do enrolamento (estator ou rotor)	Ω
R_q	Resistência a quente do enrolamento (estator ou rotor)	Ω
S	Área da qual ocorre à transferência de calor	m^2
s	Escorregamento	%
T	Temperatura	$^\circ\text{C}$
T_{ab}	Temperatura absoluta	$^\circ\text{C}$
T_{ar}	Temperatura do fluido	$^\circ\text{C}$
T_f	Temperatura ambiente no momento da medição de R_f	$^\circ\text{C}$
T_q	Temperatura ambiente no momento da medição de R_q	$^\circ\text{C}$
U_n	Tensão nominal	V
U_o	Tensão em vazio	V
X	Reatância de dispersão global	Ω
X_1	Reatância de dispersão do estator	Ω
X_2	Reatância de dispersão do rotor	Ω
X_m	Reatância de magnetização	Ω

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A WEG Indústrias S.A., fundada em 1961 pelos senhores Werner, Eggon e Geraldo, é uma empresa do ramo eletromecânico. No princípio era apenas uma fábrica de motores elétricos do interior do Brasil, hoje é considerada como um grande fabricante de motores em nível mundial. Produz desde motores fracionários, linha branca até motores de grande porte. Para se tornar uma empresa multinacional brasileira, a WEG investe cada vez mais em seus laboratórios de ensaios elétricos, de tal forma que possa ser dado suporte e atestar os padrões de qualidade que o mercado exige.

Para o cliente, a determinação da elevação de temperatura de uma máquina de grande porte é fator decisivo. Máquinas que trabalham com uma elevação de temperatura acima do especificado terão seu tempo de vida útil diminuído. Construir novos laboratórios com potência maior e equipamentos de simulação de carga também maiores gera grandes investimentos tanto em máquinas como em circuitos de potência robustos, painéis eletrônicos, programas de informática e outros. Atualmente, na WEG, é possível testar motores em plena carga até 10 Megawatts de potência. No entanto, a potência nominal dos motores produzidos na empresa tem aumentado consideravelmente. Com isso surge a necessidade de testar os motores com os laboratórios existentes na fábrica. Para tanto, métodos simulando carga equivalente são empregados para determinação da elevação de temperatura dos motores que excedem a potência nominal instalada nos laboratórios da empresa.

O método dinamométrico é utilizado para testar grande parte dos motores elétricos produzidos, com potência menor ou igual à potência do dinamômetro. Tê-lo disponível na empresa representa uma grande vantagem por reproduzir as condições nominais que a máquina estará sujeita em campo. O método é bastante simples: o motor em teste é acoplado mecanicamente a um dinamômetro que simulará a carga. A máquina é acionada de tal forma que as condições nominais como tensão, corrente, frequência, torque e rotação sejam atendidos. Uma vez que a máquina opera em suas condições nominais, determina-se a elevação de temperatura pela variação da resistência do estator ou por detectores de

temperatura embutidos nos enrolamentos do estator. Para determinar a elevação de temperatura pela variação da resistência faz-se necessário medir a resistência e temperatura ambiente antes do início do ensaio com a máquina a frio e medir a resistência e temperatura ambiente no final do ensaio de temperatura. Com estes dados podemos calcular a elevação de temperatura em motores elétricos. Após um ensaio de elevação de temperatura, com duração dependendo das características construtivas da máquina, é possível verificar se a máquina atende à elevação de temperatura conforme esperado no contrato entre o fabricante e o cliente.

A principal desvantagem deste método é a limitação do equipamento de simulação de carga, bem como também os custos elevados para aquisição de máquinas e equipamentos de maneira a efetuar o teste.

O método de *“forward short circuit”* consiste em aumentar o escorregamento da máquina em teste mecanicamente, e acioná-la eletricamente até circular a corrente nominal nos enrolamentos do estator. Nesta situação tem-se uma nova distribuição de perdas da máquina em função do aumento do escorregamento, diminuição da tensão de acionamento e alteração da frequência de alimentação da máquina. Com isso, as perdas Joule do estator e as perdas mecânicas serão iguais às de um motor testado no método dinamométrico. Enquanto as perdas Joule do rotor serão maiores, as perdas no ferro irão diminuir para as máquinas testadas pelo método do *“forward short circuit”*.

O termo *“forward short circuit”* é apresentado em [1], mas a sua origem vem do ensaio de *“forward stall”* apresentado em [2], onde o autor afirma que a máquina, nesta condição de teste, opera como um gerador de indução com alto escorregamento.

Sua principal vantagem está em conseguir acionar a máquina em teste com corrente nominal sem o torque nominal. A desvantagem está no aquecimento do rotor em função do aumento do escorregamento da máquina. O propósito deste trabalho é estudar o método, comparar com o método dinamométrico, verificar o aquecimento do estator e do rotor e as perdas para motores ensaiados pelo método *“forward short circuit”*.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar e avaliar a eficácia da metodologia de ensaio de *“forward short circuit”* para determinação da elevação de temperatura do

estator e rotor de máquinas de médio e grande porte. Tal determinação, baseada na comparação dos resultados obtidos em motores testados pelos métodos dinamométrico e “*forward short circuit*”, tem como intuito identificar os efeitos causados ao rotor durante o ensaio, considerando a relação entre o aumento na temperatura do rotor com o aumento do escorregamento durante o ensaio.

1.3 Objetivos Específicos

São objetivos específicos:

- Estudar a teoria envolvida no método de “*forward short circuit*”;
- Identificar e estimar as perdas da máquina durante o ensaio com o método de “*forward short circuit*”, bem como verificar a possibilidade de determinar os parâmetros do circuito equivalente;
- Determinar a estrutura necessária para realizar o ensaio;
- Realizar experimentos em máquinas de várias potências, comparando os dois métodos;
- Analisar os resultados obtidos, identificando os fatores que influenciam na temperatura do rotor.

1.4 Metodologia

Neste trabalho de pesquisa existe a necessidade de comparar os resultados obtidos pelo método “*forward short circuit*” com o método dinamométrico. O objetivo é de ampliar os conhecimentos sobre o método, testar diversos motores nos dois métodos, comparar e analisar principalmente o comportamento térmico do rotor durante o ensaio.

Para o aprimoramento deste, realizou-se ensaio com medição da temperatura do rotor. Em motores de rotor bobinado foi medida a resistência antes do ensaio e a resistência quente pós-ensaio e para motores com rotor de gaiola, foi medida a temperatura no anel de curto-circuito do rotor ao final do ensaio de temperatura.

1.5 Estrutura do Trabalho

A apresentação dos resultados é feita neste documento em oito capítulos, sendo o primeiro este capítulo introdutório.

No capítulo 2 são lembrados os conceitos de transferência de calor aplicados a motores elétricos. Condução, convecção e radiação são apresentadas na forma de conceitos.

No Capítulo 3 é apresentada a descrição do ensaio de “*forward short circuit*”.

No Capítulo 4 são analisadas as perdas do motor durante o ensaio de “*forward short circuit*”.

No Capítulo 5 são determinados alguns parâmetros do circuito equivalente.

No Capítulo 6 serão apresentados modelos de laboratórios para a realização do método para motores de grande porte.

No Capítulo 7 são apresentadas as comparações dos ensaios realizados pelos dois métodos para diversas potências de motor e se discute quais fatores influenciam no aquecimento do rotor.

Finalmente é apresentada a conclusão no capítulo 8.

2 ASPECTOS TÉRMICOS

2.1 Introdução

Inevitavelmente, parte da energia disponível para a conversão eletromecânica de energia é transformada em calor no motor de indução. Esta transformação é irreversível, dando origem às perdas. O fio percorrido por corrente elétrica dissipa calor devido ao efeito Joule. A potência térmica dissipada pode ser dada pelo produto da resistência do fio pelo quadrado da corrente que nele circula. Tanto as bobinas do enrolamento do estator como as do rotor, ou suas barras, caso se trate de um rotor de gaiola, dissipam calor. Além disso, o fluxo magnético que atua no núcleo do estator e do rotor induz correntes indesejáveis nas chapas de aço, que são as correntes parasitas, ou correntes de Foucault. Elas também são fontes de aquecimento por efeito Joule. Os núcleos do estator e do rotor são laminados justamente para minimizar essas correntes. A histerese magnética, devido à variação do fluxo também é uma fonte de geração de calor interna no motor.

No motor, além das perdas no cobre e no ferro, somam-se as perdas mecânicas, por exemplo, aquelas geradas pelo atrito entre o eixo e os rolamentos e pelo acionamento do ventilador.

O calor é uma fonte de energia que, no caso do motor elétrico, não é aproveitada para produzir trabalho mecânico. Trata-se de uma energia perdida. Quanto maiores forem as perdas, menor será o rendimento do motor. O calor gerado internamente acaba promovendo uma elevação de temperatura interna. Devido à diferença de temperatura estabelecida entre o interior do motor e o meio exterior, ocorrerá um processo de transferência de calor.

2.2 Transferência de Calor

Conforme [5] a transferência de calor é a ciência que trata da análise da taxa de transmissão de calor em um sistema. A energia transferida pelo fluxo de calor não pode ser medida diretamente, mas o conceito tem significado físico porque está relacionado com a temperatura, grandeza mensurável. O calor flui da região de temperatura mais alta para a região de temperatura mais baixa. O fluxo de calor vai existir onde houver um gradiente de

temperatura. O motor quando operando nas suas condições nominais irá transferir o calor gerado internamente para o exterior.

Para um motor de indução é usual considerar os três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Para simplicidade de análise, pode-se considerar cada modo de transferência de calor separadamente, desde que a transferência de calor pelos outros dois modos for desprezível.

É importante entender o mecanismo de transferência de calor para uma análise térmica do motor. Assim é possível verificar se o motor atende aos valores de cálculo do projeto. Entre estes valores, a temperatura do motor é item essencial. O motor quando opera acima do seu limite de temperatura, terá a sua vida útil diminuída. A seguir são apresentados os principais conceitos relacionados aos três modos de transferência de calor para o motor de indução.

2.3 Condução

Na condução a energia é transmitida de um meio para outro por meio de comunicação direta das moléculas ou por emigração de elétrons livres quando se trata de metais. A temperatura de um elemento de material é proporcional à energia cinética de suas moléculas constituintes. Quanto mais rápido se agitam as moléculas, maior será a temperatura e energia interna do material. Quando a energia cinética de uma região for maior do que a energia da região ao lado, parte desta energia será transmitida para as moléculas de energia cinética menor.

A condução acontece dentro dos limites do corpo ou através da fronteira entre os corpos que estão em contato, sem registrar deslocamento de moléculas que constituem o corpo.

A condução é definida pela equação seguinte:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q = mc \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

Onde:

λ - condutividade térmica do material (W/m.°C);

T – temperatura (°C);

q – taxa de calor gerado por unidade de volume (J/m³);

m – densidade específica de massa (kg/m³);

c – calor específico (J/kg.°C).

A fonte de calor será indicada por q , que neste trabalho, representa a perda de calor gerada por efeito Joule, pelas correntes nos enrolamentos do estator e pelas correntes induzidas nas barras do rotor ou nos enrolamentos do rotor por unidade de tempo. A existência de espaços vazios no interior da ranhura do estator ou rotor dificulta a extração do calor e a temperatura aumenta, prejudicando a vida útil do motor. É importante lembrar que o ar parado é um mau condutor de calor.

2.4 Convecção

A convecção é um processo de transporte de energia pela ação conjunta da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de partículas. A convecção é um mecanismo de transferência de energia entre superfície sólida e um líquido ou um gás. Para o caso de um motor de indução, este tipo de transferência acontece, pois existem fronteiras rotor-entreferro, estator-entreferro e estator-camada de ar onde existe o contato físico entre um metal e o ar. No motor, o calor flui por condução da superfície do estator para as partículas adjacentes de ar. Estas partículas de ar se moverão para uma região de menor temperatura. Ocorre o transporte de energia na direção de um gradiente de temperatura, que é chamado de transferência de calor por convecção.

A transferência de calor por convecção pode ocorrer de forma natural ou forçada.

Se o movimento do ar for induzido por um ventilador, que força o fluxo de ar sobre a superfície, diz-se que a transferência de calor se processa por convecção forçada. Se o movimento do ar resultar dos efeitos da ascensão provocada pela diferença de temperatura no ar, a transferência de calor se dá por convecção natural.

A quantidade de calor transferida da superfície para o ar por convecção é dada por:

$$q_s = -l S \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.2)$$

Onde:

q_s – taxa de transferência de calor da superfície S (W);

S – área na qual ocorre a transferência de calor (m^2);

n – direção normal a S ;

A quantidade de calor transferida por convecção é dada por:

$$q_s = hS(T_w - T_{ar}) \quad (2.3)$$

Onde:

q_s – taxa de transferência de calor da superfície quente para o ar frio;

h – coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2\text{°C}$);

S – área na qual ocorre a transferência de calor (m^2);

T_w – temperatura da superfície quente (°C);

T_{ar} – temperatura do fluido (°C).

Igualando as equações acima, obtém-se:

$$-l \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_w - T_{ar}) \quad (2.4)$$

O motor de indução pode apresentar dois tipos de convecção. A convecção forçada é comum nos motores que possuem ventilador externo no lado não acoplado, onde este movimentava o ar para as aletas do motor quando em funcionamento pleno. Em motores aletados a eficiência das aletas é de fundamental importância para a transferência de calor por convecção. A figura 2.1 apresenta um motor de indução aletado.

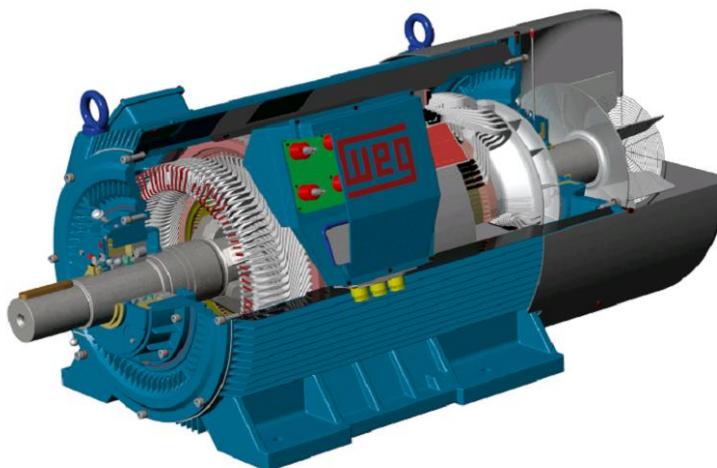


Figura 2.1-Motor de indução aletado.

Motores fechados com trocador de calor podem apresentar a convecção natural e forçada. Convecção natural da carcaça para o ar e forçada para o calor na região do entreferro e canais de ventilação que possam existir no estator e no rotor do motor. A figura 2.2 mostra um motor com trocador de calor.

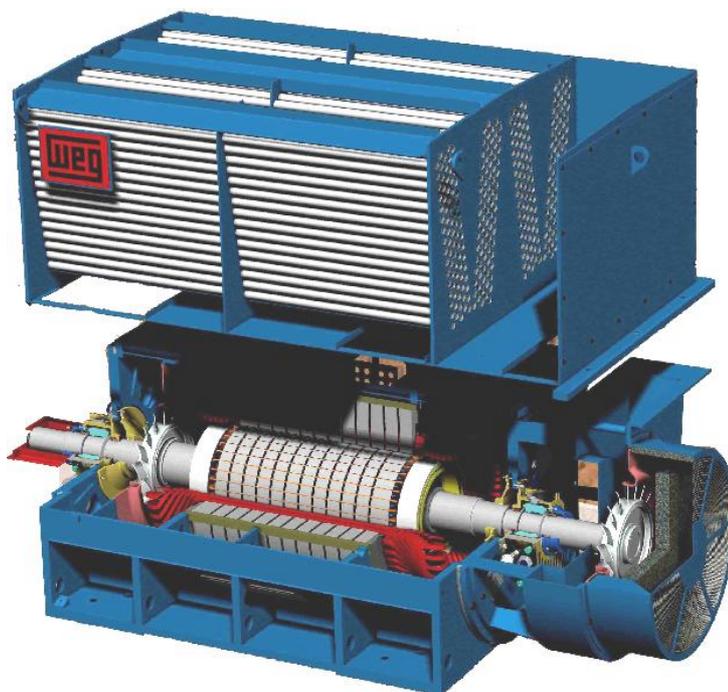


Figura 2.2-Motor de indução com trocador de calor.

2.5 Radiação

Na transferência de calor por radiação, a energia que sai de uma superfície em forma de calor radiante, depende da magnitude absoluta da temperatura e da natureza da superfície. Quando a radiação atinge a superfície, parte da energia é refletida, parte é absorvida e parte é transferida.

A equação da radiação é:

$$q_r = Sge(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.5)$$

Onde:

ε - emissividade da superfície cinzenta.

Para o caso específico em estudo, a temperatura T_1 representa a temperatura da superfície do rotor ou estator (T_w) e a temperatura T_2 representa a temperatura do ar T_{ar} . Pode-se ter também a transferência direta de calor por radiação do estator para o rotor e vice e versa.

2.6 Transferência de Calor no Motor de Indução

No interior do rotor e do estator, a transferência de calor é dada por condução. Nas superfícies do rotor e do estator, que são envolvidas pelo ar, a transferência de calor se dá por convecção e radiação. De acordo com [5], a seguinte equação representa a transferência de calor no motor de indução:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_w - T_{ar}) + \gamma \epsilon (T_w^4 - T_{ar}^4) \quad (2.6)$$

A primeira parcela do lado direito da equação 2.6 é referente à convecção e a segunda é referente à radiação. A segunda parcela poderá ser desprezada se esta for muito menor que a primeira, ou seja, para situações onde T_w é próximo de T_{ar} .

Em [5] verifica-se uma aproximação para a região do entreferro que consiste em obter um valor equivalente da condutividade térmica para a região do entreferro, a fim de trocar os fenômenos de convecção e radiação por condução. O que leva a uma aproximação dos domínios do rotor, estator e entreferro que são analisados na mesma malha de elementos finitos. A condutividade obtida é limitada a uma classe de motores segundo [5].

Em [6] a transferência de calor no motor de indução é apresentada através de um modelo térmico simplificado baseado em resistências térmicas. O modelo é proposto baseado que, no motor de indução, as parcelas referentes à condução e à convecção são mais significativas que a radiação. Tanto [5] como [6] fazem aproximações para apresentar o processo de transferência de calor no motor de indução.

Analisando a transferência de calor no motor de indução tem-se que a circulação de corrente nos fios condutores do estator ou rotor, ou ainda nas barras do rotor produzirá o aquecimento. Este aquecimento é proveniente de condução de calor que irá ser transferido do interior para o exterior do motor. Esta condução de calor irá aquecer a máquina como um todo, produzindo uma elevação de temperatura tanto no estator como no rotor. Ao estudar um método de elevação de temperatura em motores elétricos é necessário observar que o valor de elevação de temperatura é o resultado da condução de calor no estator e no rotor do motor elétrico.

No próximo capítulo, é apresentado o método “*forward short circuit*”, no qual a circulação de corrente nominal no estator faz com que se tenha a mesma perda Joule no estator, quando comparado com o método dinamométrico.

3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO FORWARD SHORT CIRCUIT

3.1 Introdução

No contrato de fabricação de motores de grande porte, uma das cláusulas refere-se à comprovação por meio de ensaio da elevação de temperatura do motor por parte do fabricante. Esta elevação de temperatura, a que se refere este trabalho, é o valor da temperatura encontrada nos enrolamentos do estator e do rotor (quando bobinado) subtraído da temperatura ambiente. Como descrito no capítulo 2, o motor quando acionado em plena carga faz circular uma corrente em seus enrolamentos, que por condução fará com que haja uma transferência de calor do interior para o exterior do motor. Verificar se esta transferência de calor é eficiente a ponto de evitar um superaquecimento do motor faz parte do ensaio de elevação de temperatura. Este ensaio tem como objetivo determinar a temperatura nos enrolamentos do estator e do rotor quando bobinado. Com o resultado da elevação de temperatura do motor podemos verificar se o motor atende ao requisito de contrato.

3.2 Métodos para Determinar a Elevação de Temperatura

A determinação da elevação de temperatura em motores elétricos pode ser feita através de diversos métodos. Dentre eles destacam-se:

- Método dinamométrico;
- Método back-to-back;
- Método gráfico;
- Método “*forward short circuit*”;
- Método da dupla frequência.

Usualmente, o de maior interesse é o método dinamométrico por reproduzir as condições de trabalho do motor durante o ensaio. A figura 3.1 apresenta um motor acoplado a um dinamômetro de 600 kW no laboratório de ensaios da WEG.



Figura 3.1-Motor acoplado num dinamômetro de 600kW.

No método back-to-back, conforme [4], dois motores com características semelhantes são acoplados mecanicamente e alimentados por duas fontes de tensão independentes.

No entanto, muitas vezes o motor fabricado pode exceder à capacidade de teste do laboratório. Neste caso faz-se uso de métodos alternativos de carga. O método gráfico ou superposição, conforme [3], normalmente é utilizado quando é obtido mais de setenta por cento da corrente nominal reduzindo tensão e torque da máquina em teste.

O método da dupla frequência, conforme [4], simula a carga equivalente por sobreposição de duas fontes de tensão com frequências diferentes sem a necessidade de torque na ponta de eixo.

O método “*forward short circuit*” é indicado toda vez que não é obtido mais de setenta por cento da corrente nominal com a máquina acoplada ao dinamômetro.

Todos os métodos conseguem determinar de maneira distinta um valor similar ou igual para a elevação real de temperatura do motor. Os métodos relacionados possuem vantagens e desvantagens. No entanto um dos métodos relacionados possui uma vantagem que para motores de grande porte é fundamental: utilizar a estrutura existente (fonte de tensão e motores para acionamento) sem a necessidade de ter torque e fontes de potência de grande valor. Este método é conhecido como “*forward short circuit*”.

3.3 Fundamentação Teórica do Ensaio

Em [1,2] o método “*forward short circuit*” tem seus fundamentos baseados na teoria de circuitos elétricos. Para tal temos que relembrar o modelo de circuito equivalente para o motor de indução, que é apresentado na figura 3.2.

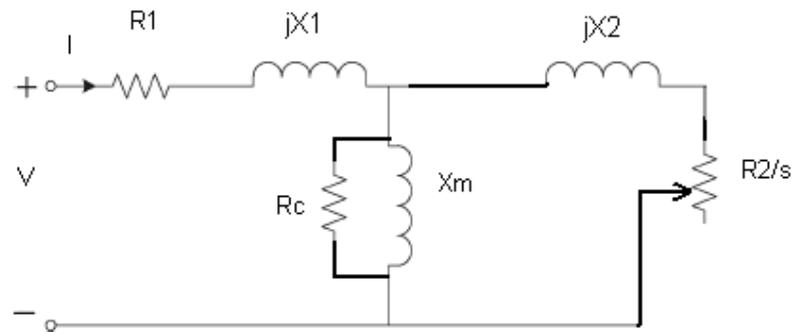


Figura 3.2-Circuito equivalente do motor.

Onde:

R_1 = Resistência do estator;

X_1 = Reatância de dispersão do estator;

R_2 = Resistência do rotor referida ao estator;

X_2 = Reatância de dispersão do rotor referida ao estator;

X_m = Reatância de magnetização;

R_c = Resistência de perdas no ferro.

O circuito equivalente permite avaliar as perdas, o desempenho, a corrente do estator, o conjugado e outras características. Com o circuito equivalente é avaliado o comportamento desses parâmetros em caso de variação da carga, da tensão e da frequência. Portanto, o circuito equivalente é uma ferramenta extremamente útil para avaliação de características e auxílio na compreensão do funcionamento do motor.

Considerando um escorregamento próximo a zero ($s \cong 0$) no caso do motor operando em vazio, temos que a resistência do rotor (R_2/s) é uma resistência de valor muito elevado em série com a reatância do rotor (X_2). Desta forma, um valor elevado de resistência está em paralelo com o ramo magnetizante do circuito equivalente. Da teoria de circuitos elétricos, tem-se que o valor de resistência equivalente de dois resistores em paralelo, sendo um de valor elevado e outro de baixo valor, resulta num valor de resistência

equivalente menor e próximo ao valor baixo. Como exemplo, o resistor equivalente para o paralelo de 200Ω com 1Ω é aproximadamente $0,99502 \Omega$. Desta forma, é considerado que toda a corrente flui pelo ramo magnetizante (R_c e X_m). Com isso a reatância X_m inclui todo o efeito de magnetização e a resistência R_c todas as perdas no ferro. O circuito equivalente do motor para a condição $s=0$ é apresentado na figura 3.3.

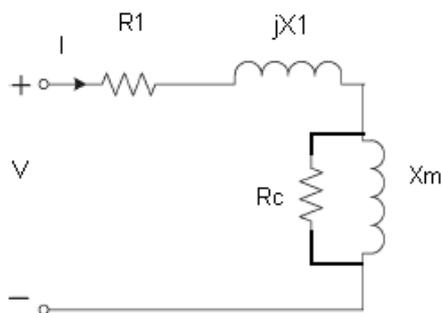


Figura 3.3-Circuito equivalente do motor em vazio.

Outra situação a ser considerada é $s=1$ que representa o motor na condição de rotor bloqueado. Nesta condição aplica-se uma tensão reduzida nos terminais do motor até que se atinja o valor da corrente nominal. Quando $s=1$ o ramo da direita do circuito equivalente apresentado na figura 3.2 passa a ter uma impedância menor que o ramo magnetizante. Como a tensão é baixa, a magnetização e as perdas no ferro são desprezíveis. Desta forma o ramo magnetizante é desprezível no circuito equivalente para rotor bloqueado. A figura 3.4 apresenta o circuito equivalente para a condição de rotor bloqueado.

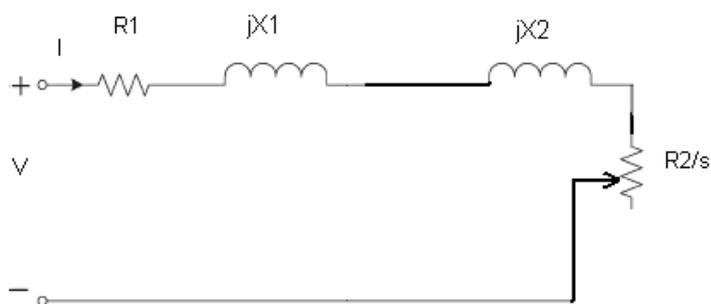


Figura 3.4-Circuito equivalente do motor com rotor bloqueado.

Então, a resistência do rotor decresce com o aumento do escorregamento do motor, o que possibilita visualizar que o escorregamento afeta o rotor de maneira mais significativa que a reatância de magnetização. Desta maneira, conforme [2], toda forma de carga que produz um escorregamento no rotor irá causar perdas e aquecimento no rotor. Já a diminuição da tensão do motor, para circular apenas a corrente nominal, no ensaio de rotor bloqueado terá influência sobre as perdas no ferro do motor tornando-as desprezíveis. Com base nestes dois ensaios é determinado outro método para ensaio de elevação de temperatura, que está baseado no circuito equivalente apresentado na figura 3.5.

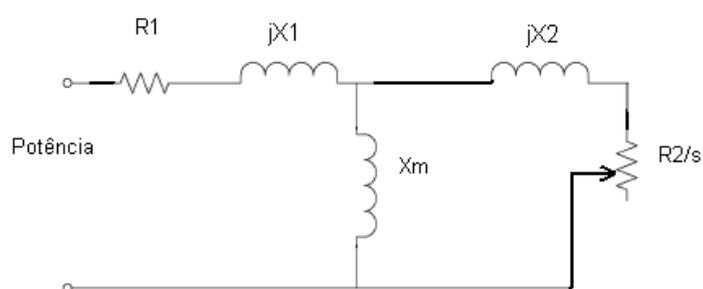


Figura 3.5-Circuito equivalente para “forward short circuit”.

3.4 Descrição do Ensaio

A figura 3.6 apresenta um modelo para o teste pelo método do “forward short circuit”.

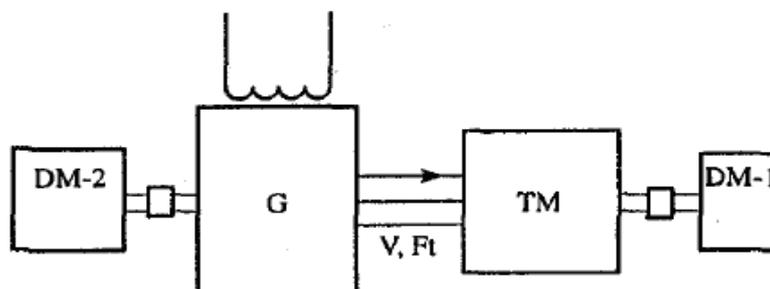


Figura 3.6-Modelo para teste em “forward short circuit”.

Onde:

TM – representa o motor a ser testado;

DM-1 – Motor que aciona mecanicamente o motor em teste;

G – Gerador que alimenta eletricamente o motor em teste;

DM-2 – Motor que aciona o gerador do sistema.

O ensaio de “*forward short circuit*” consiste em acoplar o motor para teste TM a outro motor com rotação variável DM-1. Este motor DM-1 irá acionar mecanicamente o motor em teste para um escorregamento maior que o nominal. O motor DM-1 que irá acionar mecanicamente o motor para teste TM tem uma potência nominal de aproximadamente 10% da potência nominal do motor a ser testado TM conforme [1]. A fonte de potência (G + DM-2) que aciona eletricamente o motor para teste TM irá trabalhar numa frequência de 80 ou 120% da frequência do motor TM, até que nas bobinas do estator circule a corrente nominal. Desta forma o motor em teste TM irá operar como um gerador de indução com escorregamento negativo ou como um motor de indução com escorregamento positivo. Para essa condição, segundo [1], a resistência de rotor é muito pequena se comparada com a resistência de partida do motor. A tensão aplicada no motor em teste TM é aumentada de zero até a tensão que fará circular a corrente nominal numa frequência de 80% ou 120% da nominal.

A impedância da máquina consiste predominantemente na reatância de dispersão para frequência de ensaio o que resulta em ser necessário apenas um pequeno gerador para circular corrente nominal na máquina em teste.

3.5 Determinação do Grupo Gerador (G e DM-2)

O grupo gerador (G + DM-2) é determinado considerando dois fatores segundo [1]. Primeiro, pelo acréscimo da magnitude da perda Joule do rotor no motor em teste, TM, durante o ensaio e, segundo, pelo decréscimo da potência útil do motor acionante DM-1 durante o ensaio. Durante o ensaio de “*forward short circuit*” a perda Joule do rotor é maior do que a perda Joule do rotor no ensaio dinâmico, isso ocorre, devido a um aumento da corrente do rotor e do efeito pelicular na ranhura do rotor.

Conforme [2] e [9] o grupo gerador irá alimentar o motor em teste com uma frequência de oitenta ou cento e vinte por cento da frequência nominal. A tensão utilizada

para o acionamento de TM será aproximadamente de vinte e cinco por cento da tensão nominal para termos corrente nominal circulando no estator do motor em teste de “*forward short circuit*”.

É possível testar o motor em duas condições de frequência do motor. Uma condição é acionar mecanicamente o motor TM na rotação síncrona e aumentar a frequência da fonte de alimentação, acionando com uma tensão reduzida. Outra condição é acionar o motor mecanicamente na rotação síncrona e diminuir a frequência da fonte de alimentação. Neste caso o mesmo resultado de elevação de temperatura é obtido quando operamos em qualquer situação acima citada. Para tanto, o grupo gerador deverá ser dimensionado para trabalhar numa faixa de frequência maior. Normalmente os motores para uso industrial são projetados para operar nas frequências de 50 ou de 60 Hertz. Logo, o grupo gerador deverá operar para alimentar o motor numa faixa de frequência de 40 a 72 Hertz. Também é importante salientar que o sistema deverá ser um sistema regenerativo principalmente na condição em o motor em teste é acionado com frequência reduzida em função da potência do motor estar sendo transferida para o gerador.

3.6 Determinação do Motor Acionante (DM-1)

O motor DM-1 que irá acionar mecanicamente o motor em teste TM deverá ter uma potência suficiente para manter mecanicamente a rotação do motor em um escorregamento maior que o nominal. Segundo [1] a potência deste motor, DM-1, deverá ser no mínimo de 10% da potência nominal do motor em teste, TM, para um bom desempenho do conjunto. O motor DM-1 poderá ser tanto um motor de indução CA, como também poderá ser um motor de corrente contínua. Com o surgimento dos inversores de frequência torna-se mais fácil o uso de um motor de indução CA com inversor de frequência. Ou ainda o acionamento de um motor a partir de uma fonte de alimentação variável em tensão e frequência. A utilização de motor de corrente contínua para acionar o motor em teste também é uma forma existente citada por [1] e [4].

3.7 Características do Motor TM

O motor a ser testado, TM, normalmente tem sua potência nominal superior à potência do dinamômetro. Neste caso são adotados métodos equivalentes de carga para realizar o ensaio de elevação de temperatura. Se o motor TM for acoplado a um dinamômetro, e este não possui potência necessária para fazer circular no motor setenta por cento da corrente nominal com tensão reduzida, o método “*forward short circuit*” é indicado para determinação da elevação de temperatura. No entanto, outro requisito é importante para a escolha do ensaio de “*forward short circuit*”: o torque nominal do motor. Motores com alto valor de torque que excede o máximo torque nominal do dinamômetro são indicados para este método. Desta forma é possível testar um motor com um elevado torque nominal utilizando apenas um motor que o acione mecanicamente na rotação nominal. Um exemplo de aplicação do método é o teste de um motor de 27 mega-Watts utilizando a estrutura de um laboratório dinamométrico de 5 mega-Watts de potência em plena carga.

3.8 Medidas e Cálculos do Ensaio

Durante o ensaio de “*forward short circuit*” alguns parâmetros são medidos no motor em intervalos de trinta minutos. Os parâmetros medidos são:

- Corrente de fase do estator em A;
- Tensão de fase do estator em V;
- Potência em W;
- Rotação do motor em rpm;
- Temperatura nos enrolamentos em °C (quando o motor for provido de detectores de temperatura);
- Temperatura no circuito de ar do motor em °C;
- Temperatura ambiente em °C.

Após a estabilização térmica do motor que ocorre num intervalo de tempo que depende das características construtivas do motor, será realizado o desligamento do motor em teste. É considerado estabilizado termicamente o motor que sofre uma variação menor que 1 °C no período de uma hora. Assim que o motor parar de girar é medida a resistência

do estator. No caso de rotores enrolados, também será medida a resistência do rotor. Com o valor da variação da resistência pode-se determinar a elevação de temperatura através de (3.1):

$$\Delta T = \left(\frac{R_q - R_f}{R_f} \right) * (234,5 + T_f) + (T_f - T_q) \quad (3.1)$$

Onde:

ΔT = Elevação de temperatura K;

R_q = Resistência a quente do enrolamento (estator ou rotor) em Ω ;

R_f = Resistência a frio do enrolamento (estator ou rotor) em Ω ;

T_q = Temperatura ambiente no momento da medição de R_q em $^{\circ}\text{C}$;

T_f = Temperatura ambiente no momento da medição de R_f em $^{\circ}\text{C}$;

O valor de 234,5 é o coeficiente de temperatura da resistência do cobre a 0 $^{\circ}\text{C}$ conforme [13] e [14].

Além da elevação de temperatura medida pela variação da resistência conforme citado acima, também é possível verificar a elevação da temperatura no detector de temperatura. Em máquinas elétricas, os principais tipos de detectores de temperatura utilizados são do tipo PT-100 e PT-1000 como também termopares tipo T, J e outros.

Tendo o valor da temperatura medida pelo detector, é possível determinar o valor da elevação de temperatura nos enrolamentos do estator onde os detectores estão instalados da seguinte forma:

$$\Delta T = T_{ab} - T_q \quad (3.2)$$

Onde:

ΔT = Elevação de temperatura K;

T_{ab} = Temperatura medida em $^{\circ}\text{C}$;

T_q = Temperatura ambiente no momento da medição em $^{\circ}\text{C}$;

Conforme regem as normas [10], [13] e [14], para motores com potência nominal inferior a 5000 kW, a referência para elevação de temperatura é o valor obtido pelo método da variação da resistência do estator, enquanto que para motores com potência superior a referência para elevação de temperatura é o valor obtido pelo método do detector de temperatura. Neste trabalho sempre que possível será apresentado o valor obtido pelos dois métodos para comparação. É importante salientar que o método da variação da resistência consiste em obter um valor médio da temperatura de todo enrolamento do estator. O

método do detector embutido reflete apenas o valor do ponto mais quente do enrolamento do estator. Para os motores com potência inferior a 5000kW, a diferença do valor da elevação de temperatura obtida nos dois métodos não pode ser superior a 10 K sempre que o motor for provido de detector de temperatura.

O valor da elevação de temperatura normalmente está associado à classe térmica do material isolante. Para motores de classe térmica F, normalmente o mercado solicita uma elevação de temperatura de 80 K para uma temperatura ambiente de 40 °C. Na tabela 3.1 é apresentado o valor da temperatura limite em °C para as classes de isolamento mais comumente utilizadas em motores de indução:

Tabela 3.1-Temperatura limite.

Classe de Isolamento	Temperatura limite (°C)
B	130
F	155
H	180

3.9 Análise do Ensaio

O método do “*forward short circuit*” cria uma nova distribuição de perdas quando comparado com o método dinamométrico. Na prática, os resultados mostram que o aumento ou a diminuição das perdas que afetam a temperatura do estator são balanceadas, de maneira que o resultado final fique próximo do resultado obtido pelo método dinamométrico. Em particular, se comparadas as perdas em “*forward short circuit*” e as perdas em plena carga, obtêm-se as seguintes conclusões sobre o método “*forward short circuit*”:

- Perdas por ventilação e atrito são iguais;
- Perdas Joule no estator iguais;
- Perdas Joule no rotor são maiores;
- Perdas suplementares são maiores;
- Perdas no ferro na frequência fundamental são menores.

Quanto ao rotor, nota-se um aumento de temperatura que está relacionado com o aumento da sua perda Joule. Este aumento da perda está relacionado com o aumento do

escorregamento do motor durante o ensaio. Como se tem um aumento do escorregamento, a corrente do rotor também irá aumentar como também o efeito pelicular nas ranhuras do rotor.

O aumento do escorregamento diminui o torque necessário para a circulação de corrente nominal no motor TM.

Tanto [9] como [10] afirma que, além do ensaio acoplado na condição de tensão reduzida e escorregamento elevado, deverão ser realizados outros dois ensaios de temperatura em vazio com tensão nominal do motor e tensão reduzida utilizada no ensaio de *“forward short circuit”*. A diferença entre as elevações de temperatura obtidas nos dois ensaios em vazio é somada à elevação de temperatura obtida em *“forward short circuit”*.

Com base nos valores obtidos no ensaio de *“forward short circuit”*, é possível calcular a elevação de temperatura do motor e as perdas do motor em plena carga, como também determinar parâmetros do circuito equivalente do motor.

4 PERDAS EM FORWARD SHORT CIRCUIT

4.1 Determinação das Perdas

No processo de conversão eletromecânica da energia sempre perdas estão envolvidas. Em um motor de indução a energia na entrada é sempre maior que a energia na saída. Assim, a potência absorvida pela máquina será a soma das perdas com a potência útil na ponta de eixo. A perda total do motor é representada pelo somatório das perdas Joule, ferro, mecânica e suplementar. A perda mecânica em um motor de indução não será alterada durante o ensaio de elevação de temperatura, independentemente do método utilizado. A perda no ferro depende da tensão em que a máquina está acionada eletricamente. A perda Joule no estator será a mesma da máquina operando a plena carga. A perda joule do rotor será maior, pois a máquina durante o teste tem um escorregamento maior que em plena carga fazendo aumentar as perdas do rotor. Já o valor das perdas suplementares irá sofrer influência em função deste escorregamento e do efeito pelicular.

4.2 Perda Mecânica

As perdas mecânicas são provenientes da componente de perda por atrito no mancal, perda por atrito do rotor no ar e a perda por ventilação. As perdas por atrito e ventilação em um motor de indução não irão se modificar apenas com a modificação do método de ensaio para determinação da temperatura. Tanto no método dinamométrico como no método *“forward short circuit”* o atrito nos mancais e no rotor não será alterado, assim como o sistema de ventilação (ventilador, radiador, trocador de calor) será o mesmo. Estas perdas são determinadas pelo ensaio em vazio, onde a máquina é acionada eletricamente com frequência nominal e, para vários pontos de tensão, os valores respectivos de corrente e potência serão amostrados para então determinar a curva de perdas em vazio. Com esta curva determinam-se as perdas em vazio (ferro e mecânica). A figura 4.1 apresenta a curva em vazio de um motor de indução com suas perdas.

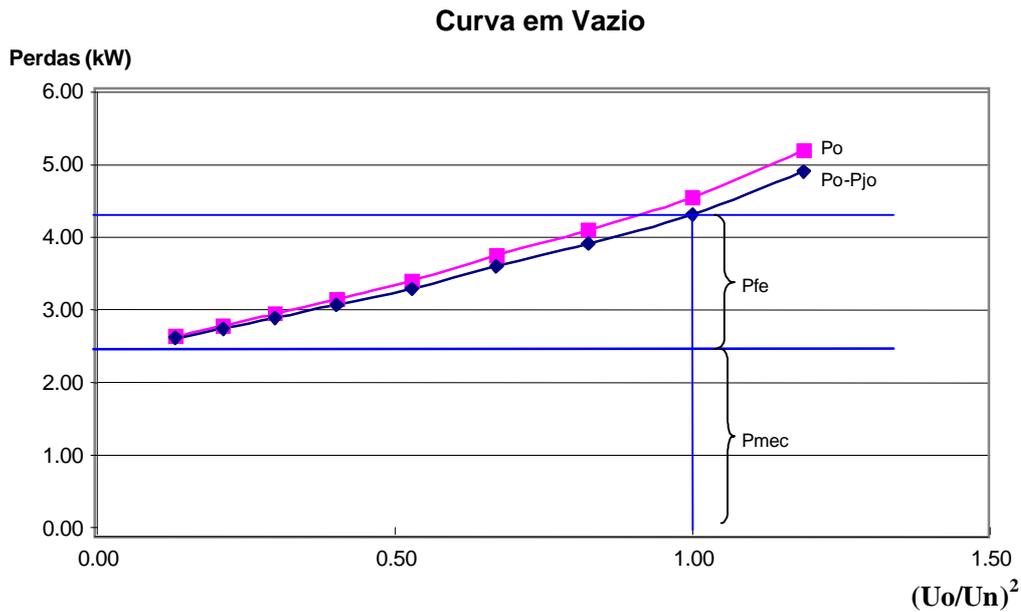


Figura 4.1- Exemplo de curva em vazio de motor de indução.

Onde:

P_o = Perda em vazio na tensão nominal;

P_{jo} = Perda Joule em vazio na tensão nominal;

P_{fe} = Perda no ferro;

P_{mec} = Perda mecânica;

U_o = Tensão em vazio;

U_n = Tensão nominal.

4.3 Perda no Ferro

O motor em teste é acionado por uma fonte de tensão com frequência de 80 ou 120% da frequência nominal do motor. Logo, conforme demonstrado anteriormente, a tensão aplicada ao motor é menor que a tensão nominal, de maneira que a perda no ferro é menor que a perda no ferro para tensão nominal.

Portanto, além de realizar o ensaio de temperatura em “*forward short circuit*” também são realizados dois ensaios de temperatura em vazio: um com tensão nominal e outro com tensão reduzida. Desta forma é possível determinar a elevação de temperatura

da máquina de maneira conservativa. Tanto [1] como [2] citam apenas em realizar o ensaio na condição de “*forward short circuit*”. No entanto [9] e [10] consideram os ensaios de temperatura em vazio para cálculo da elevação temperatura. Neste trabalho será adotada a metodologia conservativa de [9] e [10] e apresentada em [3].

4.4 Perda Joule no Estator

Como nos enrolamentos do estator tem-se a corrente nominal da máquina, a perda Joule do estator em ambos os métodos será igual. Esta perda é demonstrada na equação abaixo:

$$P_{j1} = mR_1 I_1^2 \quad (4.1)$$

Onde:

m – número de fases do enrolamento;

R_1 – resistência de fase do estator em Ω ;

I_1 – Corrente de fase do estator em A.

Como a resistividade dos materiais condutores depende da temperatura, é necessário estabelecer em qual temperatura as perdas são calculadas. Normalmente são calculadas para a temperatura nominal da máquina.

É importante salientar que a resistência de fase do estator é diretamente proporcional ao comprimento médio dos condutores e do número de condutores em série por fase, e inversamente à seção do condutor e do número de caminhos paralelos do circuito do estator.

4.5 Perda Joule no Rotor

A perda no rotor no ensaio de “*forward short circuit*” é muito importante. Com o aumento do escorregamento do motor durante o ensaio, o rotor irá apresentar um aquecimento maior que é visualizado a partir do cálculo das perdas.

4.5.1 Rotores de Gaiola e Rotores Bobinados

O rotor de um motor de indução poderá apresentar duas formas distintas. Uma delas é a forma de gaiola e a outra forma é a de rotor bobinado com anéis coletores e escovas de deslizamento.

No rotor de gaiola cada ranhura do rotor é preenchida com uma barra de cobre ou de alumínio e curto-circuitada nas suas extremidades por anéis semelhantes a uma gaiola de esquilo. O formato da barra no rotor de gaiola do motor de indução irá levar a uma categoria de motor para motores de pequeno e médio porte. As figuras 4.2 e 4.3 apresentam rotores de gaiola.



Figura 4.2-Rotor de gaiola com barra de cobre.



Figura 4.3-Rotor de gaiola com alumínio injetado.

No rotor bobinado as ranhuras do rotor são preenchidas por um enrolamento trifásico conectado em estrela (ligação Y). As três fases do rotor são conectadas a anéis de deslizamento e um conjunto de escovas elétricas de grafite que levam os três terminais do rotor ao exterior do motor. Os três terminais podem ser conectados a bancos de resistências que são utilizados na partida do motor. O motor de rotor bobinado normalmente é utilizado para cargas que apresentam um elevado torque de partida. Sua vantagem é de acionar estas cargas com uma baixa corrente de partida nos enrolamentos do estator. A figura 4.4 apresenta um rotor bobinado.

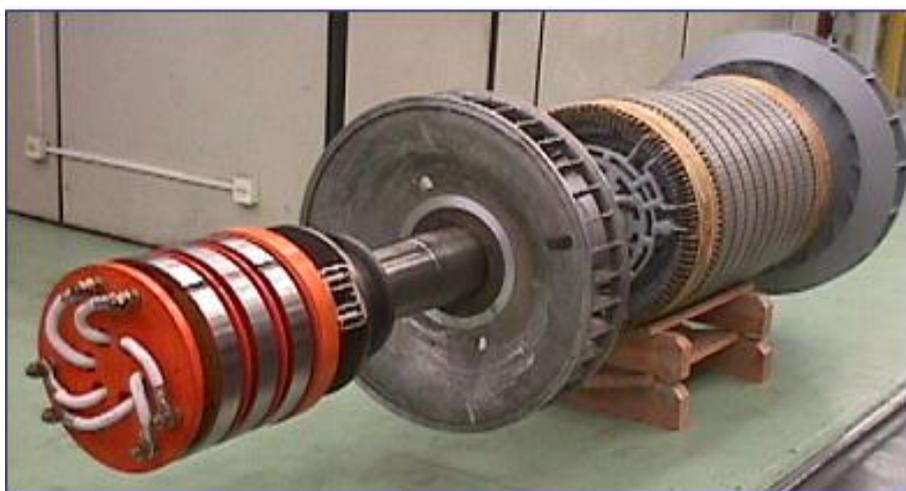


Figura 4.4-Rotor bobinado.

O projeto do motor de indução prevê que o rotor do motor deva ser dimensionado de maneira que suporte os elevados valores de corrente na partida do motor.

4.5.2 Escorregamento do Motor

Num motor de indução o rotor é a parte girante responsável em acionar a carga a qual o motor está acoplado. Num motor de indução o rotor é dotado de uma velocidade angular diferente da velocidade angular do campo magnético girante estabelecido no entreferro, o que leva ao escorregamento. A velocidade angular do campo magnético girante do entreferro é maior do que a velocidade angular do rotor. O escorregamento do motor é determinado pela equação 4.2.

$$s = \left(\frac{N_s - N_r}{N_s} \right) 100\% \quad (4.2)$$

Onde:

s = Escorregamento em %;

N_s = Velocidade angular do campo magnético em rpm;

N_r = Velocidade angular do rotor em rpm.

Portanto o escorregamento é uma das características que deve ser considerada importante num motor de indução.

O escorregamento irá influenciar algumas características do motor de indução como, fator de potência, rendimento, torque e resistência do rotor, de tal forma que a diferença existente entre um motor de indução e as demais máquinas elétricas girantes é justamente o escorregamento.

4.5.3 Perdas no Rotor

Para determinar as perdas Joule no rotor da máquina são considerados os tipos construtivos de rotor: rotor bobinado ou rotor de gaiola.

Para o rotor bobinado temos que a perda Joule é dada por:

$$P_{j2} = mR_2 I_2^2 \quad (4.3)$$

Onde:

m – número de fases do enrolamento;

R_2 – resistência de fase do rotor em Ω ;

I_2 – Corrente de fase do rotor em A.

Neste caso também a resistência do rotor é diretamente proporcional ao comprimento médio dos condutores e do número de condutores em série por fase, e inversamente proporcional à seção do condutor e ao número de caminhos paralelos. Em motores de rotor bobinado as medidas de resistência e corrente podem ser realizadas independentemente do método utilizado para determinação da temperatura e assim determinar para cada método o valor da perda Joule no rotor.

Para o rotor de gaiola a perda Joule é dada por:

$$P_{j2} = N_2 R_2 I_2^2 \quad (4.4)$$

Onde:

N_2 – número de barras da gaiola do rotor;

R_2 – resistência de uma barra do rotor mais segmento de anel do rotor em Ω ;

I_2 – Corrente na barra da gaiola do rotor em A.

Neste caso a resistência é a soma da resistência da barra da gaiola com a resistência de um segmento do anel de curto circuito da gaiola.

Para esta situação é importante salientar que na prática com o motor totalmente montado não é possível conseguir medir a corrente na barra da gaiola, como também é difícil medir a resistência da barra da gaiola do rotor. Assim a perda Joule do rotor será calculada para ambos os métodos a partir de deduções de fórmulas que são apresentadas a seguir.

No método dinamométrico o motor absorve uma potência em carga. Esta potência absorvida subtraída das perdas do estator e ferro irá fornecer uma perda que multiplicada pelo escorregamento é igual a perda Joule do rotor.

$$P_{abs} = P_{j_1} + P_{j_2} + P_{fe} \quad (4.5)$$

$$P_{j_2} = P_{abs} - P_{j_1} - P_{fe} \quad (4.6)$$

$$P_{j_2} = N_2 I_2^2 \frac{R_2}{s} = P_{abs} - P_{j_1} - P_{fe} \quad (4.7)$$

$$P_{j_2} = N_2 I_2^2 R_2 = (P_{abs} - P_{j_1} - P_{fe}) \times s \quad (4.8)$$

A equação 4.8 representa a perda Joule do rotor para motores de indução rotor de gaiola pelo método dinamométrico.

Para o método de “*forward short circuit*” a perda Joule do rotor pode ser calculada pela equação 4.3 quando os valores de resistência e corrente do rotor forem conhecidos. Quando os valores de corrente e de resistência não forem conhecidos, a perda Joule do rotor poderá ser calculada por semelhança ao método dinamométrico. Para tal, é desconsiderada a perda no ferro e com isso a perda Joule é obtida da seguinte maneira:

$$P_{j_2} = s(P_g + P_{j_1}) \quad (4.9)$$

Onde:

P_g = Potência gerada em W.

Considerando a situação de “*forward short circuit*” com 80% da frequência nominal (escorregamento negativo) onde P_g é a potência gerada em W.

No ensaio de “*forward short circuit*” depois de determinado o valor da perda Joule do rotor poderá ser determinado o valor da resistência do rotor pela equação (4.3) considerando que toda corrente do rotor seja igual à corrente do estator e com isso determina-se a resistência do rotor pela seguinte fórmula:

$$R_2 = \frac{P_{J_2}}{N_2 I_1^2} \quad (4.10)$$

Assim conforme [1] o valor da resistência do rotor em “*forward short circuit*” será maior que o valor de resistência do rotor no método dinamométrico. Isso ocorre em função do aumento da corrente do rotor e do efeito pelicular na porção da ranhura da barra do rotor. A corrente do rotor é essencialmente desmagnetizante e aproximadamente igual à corrente do estator e, por conseguinte, maior que a corrente em plena carga. O aumento na corrente do rotor está associado à corrente de magnetização.

Com o aumento de corrente também ocorre o aumento da frequência no rotor tanto para o rotor de gaiola como para o rotor bobinado. O aumento da frequência irá afetar a temperatura do rotor pelo efeito pelicular. Em baixas frequências temos que o efeito pelicular será reduzido, no entanto irá influenciar na temperatura do rotor. Conforme verificado na prática, a frequência do rotor quando testado pelo método “*forward short circuit*” é de 10 Hz, muito superior à frequência em plena carga que é da ordem de mili-Hertz.

4.6 Perda Suplementar

A soma das perdas de uma máquina (perda Joule, perda ferro e perda mecânica) com sua potência útil resultam em uma diferença, a qual é denominada de perda suplementar ou adicional. As perdas suplementares provem das perdas interlaminares, perdas por excesso de rebarbas na chapa, perdas geradas pelo fluxo de dispersão nas cabeças de bobinas, perdas por harmônicas da força magneto-motriz e perdas de alta frequência. Segundo [20] este valor de perda suplementar é um valor percentual (0,5%) da potência absorvida da máquina.

Para o ensaio de “*forward short circuit*” a perda suplementar é determinada por uma diferença entre a potência de saída, P_0 , do motor acionante DM-1, e a potência gerada,

P_g , para o motor em teste TM, subtraído do somatório de perdas do motor em teste conforme [1]. É também considerado que as perdas no ferro são desprezíveis. Com isso tem-se a seguinte equação:

$$P_0 - P_g = P_{j1} + P_{j2} + P_s + P_{mec} \quad (4.11)$$

Onde:

P_s = Perda Suplementar em W.

A potência transferida para o entreferro do motor em teste é o somatório da perda Joule do estator P_{j1} , com a potência gerada P_g . Este somatório multiplicado pelo escorregamento é igual à perda Joule do rotor P_{j2} .

$$P_{j2} = s(P_g + P_{j1}) \quad (4.12)$$

Onde:

s = escorregamento entre 0 e 1.

Substituindo a equação (4.12) em (4.11) é determinada a perda suplementar do motor durante o ensaio pela equação (4.13).

$$P_s = P_0 - P_g(1 + s) - P_{j1}(1 + s) - P_{mec} \quad (4.13)$$

A tabela 4.1 apresenta uma comparação dos valores de perda para um motor 6 pólos de 168 kW.

Tabela 4.1 - Valores de perda para motor 168 kW.

Perda (kW)	Forward Short Circuit	Dinamométrico
Perda mecânica	0,94	0,94
Perda ferro	0,3	3,12
Perda Joule estator	1,67	1,66
Perda Joule Rotor	2,28	2,12
Perda Suplementar	0,95	0,91

5 Parâmetros do Circuito Equivalente

5.1 Circuito Equivalente

Com base em valores coletados durante ensaio de “*forward short circuit*” é possível determinar alguns dos parâmetros do circuito equivalente. A figura 5.1 apresenta o circuito equivalente para o método “*forward short circuit*”.

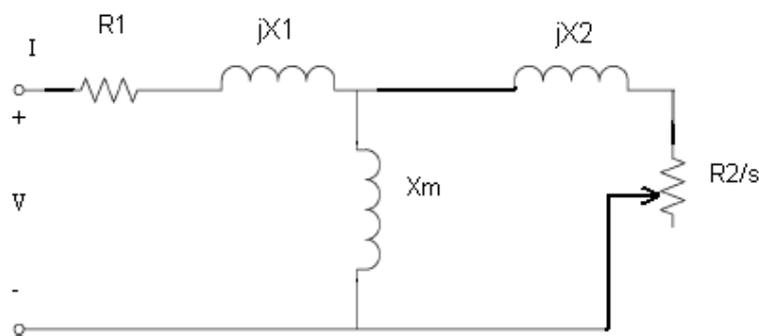


Figura 5.1 - Circuito equivalente para “*forward short circuit*”.

5.2 Parâmetros do Estator

São considerados parâmetros do estator a resistência do estator R_1 em Ohms e a reatância do estator X_1 também em Ohms.

No estator, o valor de R_1 é parâmetro característico do motor. Cada motor possui um valor para R_1 que está relacionado à resistência elétrica que o enrolamento possui para cada fase do motor. O valor de R_1 normalmente é considerado para uma temperatura de 75°C . O valor medido de resistência para uma determinada temperatura é convertido conforme a fórmula 5.1:

$$R_f(75^\circ\text{C}) = R_f \left(\frac{234,5 + 75}{234,5 + T_f} \right) \quad (5.1)$$

Onde:

$R_f(75^\circ\text{C})$ = Resistência de fase do estator para temperatura de 75°C ;

R_f = Resistência de fase do estator medida numa temperatura T_f ;

T_f = Temperatura ambiente no momento da medição de R_f ;

O valor de 234,5 é o coeficiente de temperatura da resistência do cobre a 0 °C.

Portanto, o valor de R1 é igual à R_f (75°C) e não irá se alterar em função da metodologia adotada para determinação da elevação de temperatura no motor em teste.

O valor da reatância do estator X1 não pode ser calculado de maneira indireta. Neste trabalho será calculado o valor global de reatância, ou seja, o somatório das reatâncias do estator e rotor. O valor da reatância de dispersão global X será dado pela equação 5.2:

$$X = \frac{Q_b}{I_1^2} \quad (5.2)$$

Onde:

X = Reatância de dispersão global em Ohms;

Q_b = Potência reativa de bloqueado em kVAr;

I₁ = Corrente de fase do estator em A;

A potência reativa de bloqueado é o valor de potência reativa medida no motor durante o ensaio de “*forward short circuit*”. Em laboratório foi verificado que o valor de potência reativa durante o ensaio de “*forward short circuit*” é igual à potência reativa para o ensaio de rotor bloqueado para corrente nominal e frequência de ensaio igual à frequência de “*forward short circuit*”. Foi observado assim que a diferença no triângulo de potência para os dois ensaios está no fator de potência. Isto prova que o motor se comporta de maneira semelhante ao ensaio de rotor bloqueado conforme apresentado na fundamentação teórica do ensaio.

Desta maneira, a equação 5.2 acima apresenta o valor da reatância de dispersão global. Uma maneira de determinar o valor da reatância de dispersão do estator é considerar as relações que existem entre as reatâncias de dispersão, e que são apresentadas em [10]. Para motores categoria N, a reatância de dispersão do estator é igual à reatância de dispersão do rotor referida ao estator e com isso X1 por aproximação é a metade de X.

5.3 Parâmetros do Entreferro

Os parâmetros do entreferro ou ramo magnetizante do circuito equivalente são: reatância de magnetização, X_m e resistência de perdas no ferro, R_c. Da fundamentação teórica do ensaio apresentada em 3.3, temos que R_c é desconsiderado de tal forma que se tem apenas a reatância de magnetização, X_m.

O valor de X_m é determinado pela potência reativa em vazio e a corrente em vazio. Esta potência e corrente não podem ser determinadas no ensaio de “*forward short circuit*”. A corrente que circula no estator é composta por uma componente de carga e uma componente de excitação. Com isso a componente de carga representa a corrente do rotor enquanto a componente de excitação representa a corrente de magnetização.

5.4 Parâmetros do Rotor

São parâmetros do rotor a resistência do rotor, R_2 , e a reatância de dispersão do rotor X_2 . Para X_2 vale o que foi exposto anteriormente em relação à reatância de dispersão do estator. Determina-se o valor global da reatância de dispersão do motor X que representa o somatório da reatância do estator com a reatância do rotor. Tendo o valor da reatância de dispersão global é possível determinar X_2 .

A resistência do rotor será determinada a partir das perdas do rotor, equação 5.3:

$$R_2 = \frac{P_{j2}}{3I_1^2} \quad (5.3)$$

Onde:

R_2 = Resistência de fase do rotor em Ω ;

P_{j2} = Perda Joule no rotor em W;

I_1 = Corrente de fase do estator em A;

Como o motor na condição de ensaio está próximo da condição de rotor bloqueado o ramo magnetizante passa a ser desprezível, e com isso pode-se assumir que a corrente do estator I_1 é igual a corrente do rotor I_2 , que foi anteriormente demonstrado na fundamentação teórica do ensaio.

Para determinar a perda Joule do rotor adota-se que a potência transmitida no entreferro da máquina em teste é o somatório da potência gerada, P_g , pelo gerador G, com a perda Joule do estator P_{j1} . Este somatório será multiplicado pelo escorregamento s , conforme equação 5.4:

$$P_{j2} = s(P_g + P_{j1}) \quad (5.4)$$

Onde:

P_{j2} = Perda Joule no rotor em W;

P_{j1} = Perda Joule no estator em W;

P_g = Potência entregue pelo gerador, G, ao motor em teste TM em W;

s = escorregamento, %;

Com o objetivo de visualizar os parâmetros do circuito equivalente a tabela 5.1 apresenta os valores de resistência e reatância para um motor 06 pólos de 168 kW.

Tabela 5.1 - Parâmetros circuito equivalente.

Parâmetro	Forward short circuit	Circuito equivalente
Resistência estator, R1	0,0333	0,0333
Reatância global, X	0,9905	0,9980
Resistência rotor, R2	0,0220	0,0222

Na tabela 5.1 existe uma semelhança entre os valores obtidos pelo método “*forward short circuit*” quando comparados aos valores do circuito equivalente.

6 ESTRUTURA PARA TESTE DE MOTORES EM FORWARD SHORT CIRCUIT

6.1 Introdução

Para determinar a estrutura de um laboratório de ensaio para máquinas elétricas deve ser determinado primeiro o tipo de máquina que será testado no laboratório. Na empresa WEG são fabricados máquinas de indução, máquinas síncronas e máquinas de corrente contínua. Depois de determinado o tipo de máquina que será testado no laboratório deverá ser escolhida a metodologia de teste. Para o motor de indução, tem-se atualmente na empresa WEG em funcionamento o método dinamométrico. Neste método, como já foi relatado anteriormente, é simulada a condição nominal da máquina. Alguns motores são fabricados com potência muito superior à potência do dinamômetro e com isso os laboratórios deverão estar adequados para a utilização de métodos alternativos. O objetivo é apresentar um modelo de estrutura de laboratório para o método dinamométrico e para o método “*forward short circuit*”.

6.2 Estrutura para Método Dinamométrico

A estrutura necessária para realizar ensaios no método dinamométrico compreende uma fonte de alimentação para o motor em teste e um dinamômetro CA ou CC.

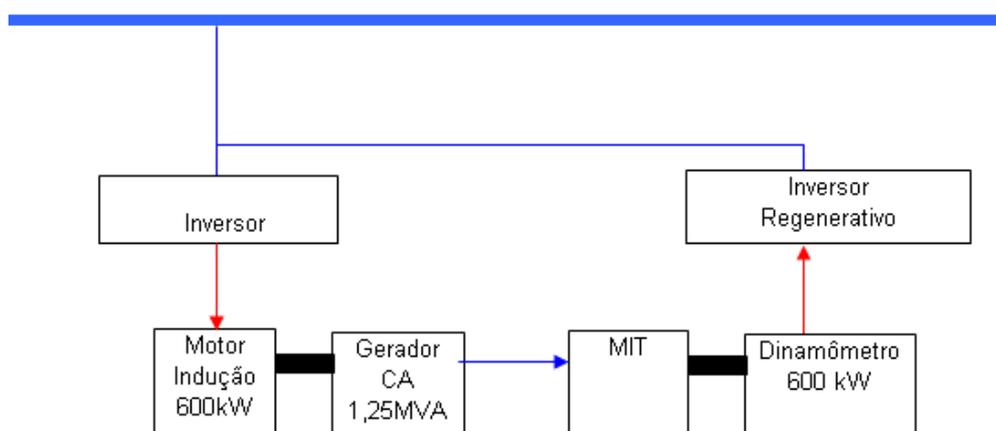


Figura 6.1-Diagrama de laboratório de 600kW.

Na figura 6.1 é apresentado um diagrama para um laboratório de 600 kW. Toda vez que a potência do dinamômetro e da fonte de alimentação aumenta, também aumenta o custo e a robustez dos equipamentos necessários para o funcionamento do laboratório. Em laboratórios de até 2 MW de potência os conversores CA/CC e as máquinas de corrente contínua estão sendo substituídas por máquinas de indução e inversores de frequência regenerativos.

A figura 6.2 apresenta o diagrama unifilar de um laboratório para ensaio de temperatura pelo método dinamométrico existente na empresa WEG com capacidade de ensaio em plena carga de 10MW. Este é o maior laboratório dinamométrico em funcionamento na empresa atualmente.

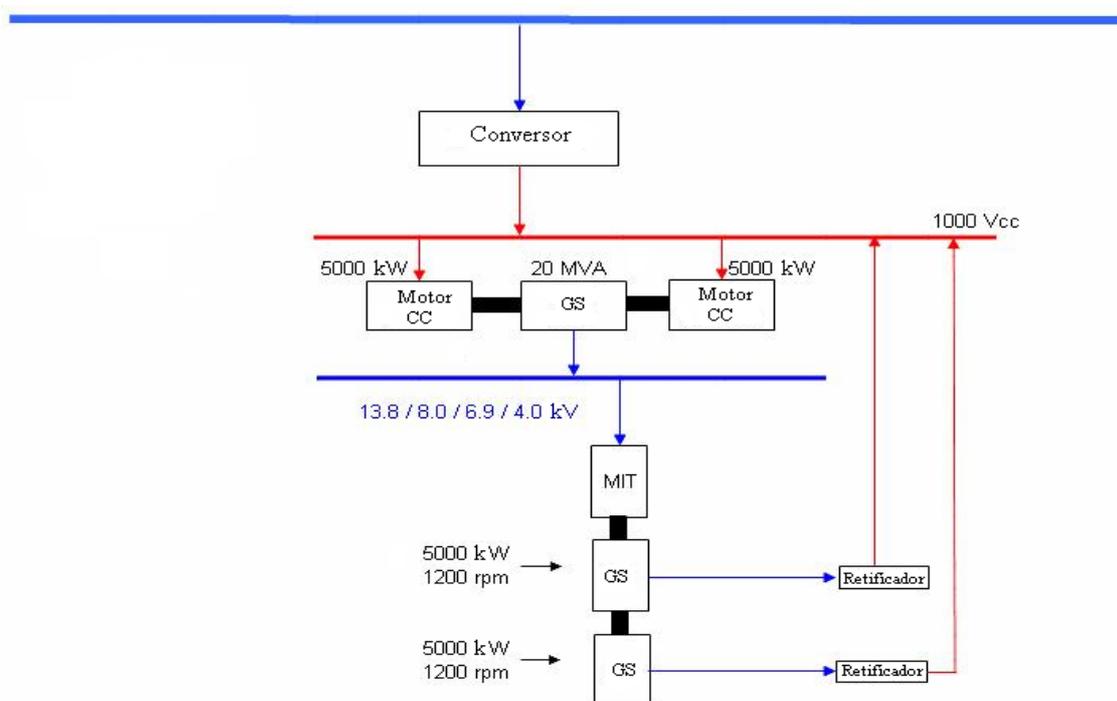


Figura 6.2-Diagrama de laboratório dinamométrico.

Na estrutura apresentada na figura 6.2 um barramento de alimentação transfere energia para um conversor CA/CC. Este conversor alimenta eletricamente dois motores de corrente contínua em 1000Vcc. Os motores CC, acionam mecanicamente um gerador, GS, de 20MVA, que transfere energia para o motor em teste MIT.

O motor em teste MIT aciona mecanicamente os dinamômetros GS, que estão montados mecanicamente em série. Desta forma a energia produzida pelos dinamômetros (geradores síncronos) será enviada para o banco de retificadores que irão devolver a energia ao barramento CC, desta maneira ocorre o sistema de recuperação de energia.

Esse acionamento mecânico é responsável pela produção de torque na ponta do eixo do motor em teste.

Com isso o motor em teste deve ser compatível em potência e torque com o dinamômetro que irá acionar. Excedendo o torque ou a potência não será possível realizar o ensaio em plena carga ou com tensão e potência nominal. A figura 6.3 apresenta um gráfico de capacidade de teste para o laboratório.

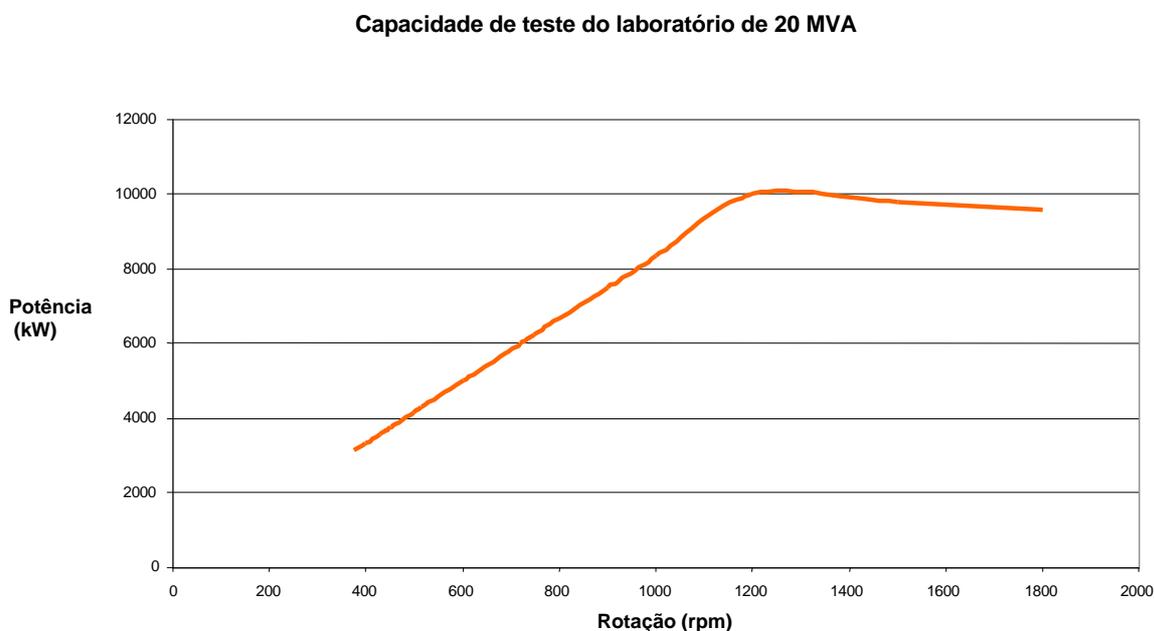


Figura 6.3-Capacidade de teste em função da rotação do motor para teste.

Na figura 6.3 a máxima capacidade de teste ocorre na rotação de 1200rpm, ou seja, 10.000 kW para motores seis pólos na frequência de 60 Hertz.

6.3 Estrutura para Forward Short Circuit

A figura 6.4 apresenta o diagrama unifilar de um laboratório para ensaio de motor de grande porte utilizando o método “*forward short circuit*”.

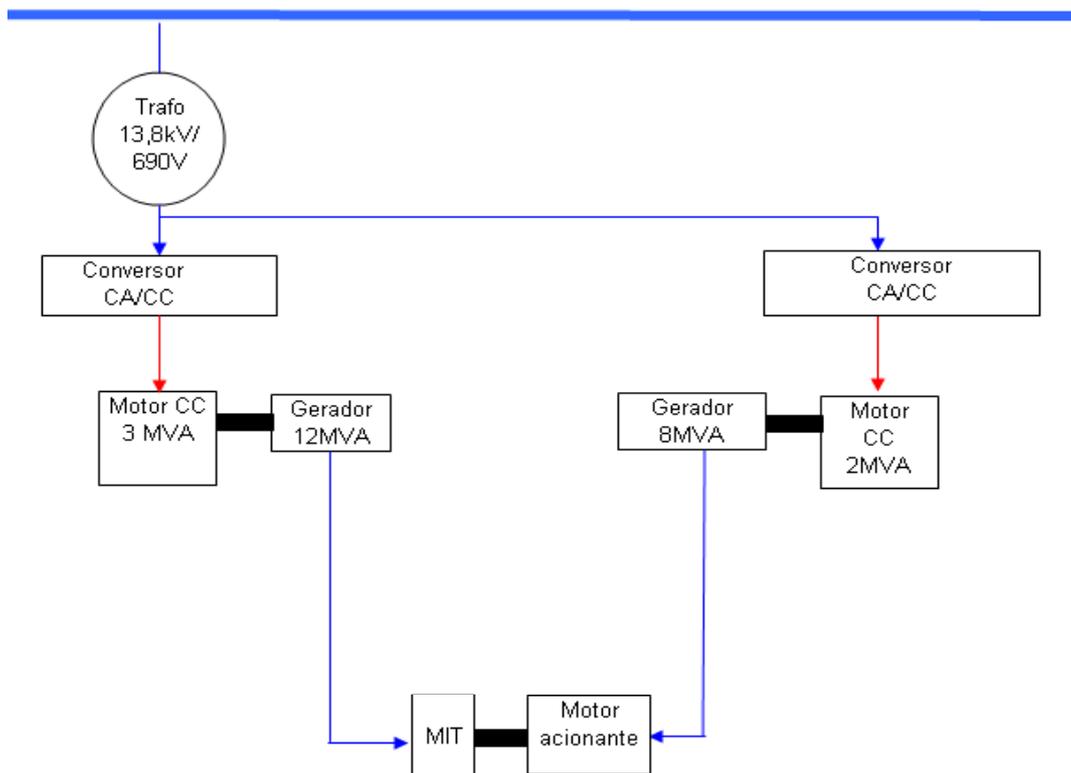


Figura 6.4 -Diagrama de laboratório para “forward short circuit”.

Conforme o diagrama da figura 6.4, existe duas fontes de alimentação. A primeira fonte de alimentação, e de grande potência será utilizada para o acionamento elétrico do motor em teste, MIT. A fonte em questão representa o grupo gerador (motor indução + gerador) conforme detalhado no item 3.5. Já a fonte de alimentação de menor potência será utilizada para acionar eletricamente o motor (motor acionante). O motor acionante terá uma potência de no mínimo 10% da potência nominal do motor MIT e será responsável pelo acionamento mecânico do motor MIT.

Em [1], [2] e [4] o motor acionante e a fonte de alimentação para o motor acionante são de corrente contínua. No entanto [9] e [10] descrevem o ensaio utilizando um motor e uma fonte de corrente contínua ou o conjunto em corrente alternada. Para o caso de corrente alternada deverá ser prevista a variação de frequência para ocorrer o ajuste da rotação de acordo com a rotação síncrona do motor em teste MIT. A figura 6.5 apresenta uma estrutura baseada em um motor de corrente contínua.

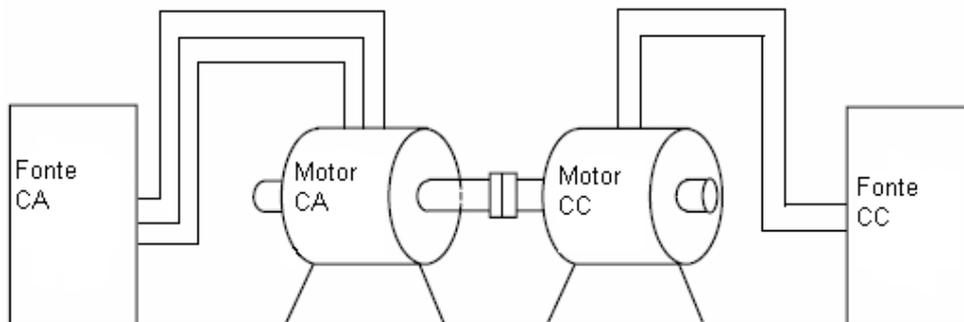


Figura 6.5 - Estrutura de teste usando motor CC.

Na estrutura da figura 6.5 o diferencial está em fazer um acionamento CC. O motor CC é responsável em manter a rotação síncrona do motor CA. O motor CA acima é o motor que estará sendo submetido ao ensaio de “*forward short circuit*”.

Na prática também foram realizados alguns ensaios usando a estrutura da figura 6.1 tornando o dinamômetro a máquina acionante responsável em manter a rotação síncrona do motor em teste e a fonte de alimentação trabalhando numa frequência diferente da frequência nominal do motor em teste. Nesta situação conseguiu-se apenas realizar o ensaio quando a frequência de alimentação do motor em teste é de 120% da frequência nominal da máquina. Na situação inversa de 80% da frequência nominal o sistema acionava os alarmes em função da potência de saída do motor. Nessa condição o motor opera como um gerador de indução com escorregamento negativo. Os diodos do inversor de frequência impedem o fluxo de potência no sentido contrário, para o inversor que não é regenerativo.

Com isso a empresa passou a utilizar para alguns casos específicos o método “*forward short circuit*” sem a necessidade de novos investimentos. Atualmente no laboratório de ensaios até a potência de 736kW utilizamos o método para os motores com frequência nominal diferente das frequências industriais (50 e 60 Hz).

7 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO DINAMOMÉTRICO E FORWARD SHORT CIRCUIT

7.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos em laboratório de diversos motores que foram testados nos dois métodos para comparação. Para cada motor a seqüência de ensaios adotada foi a seguinte:

1. Elevação de temperatura pelo método dinamométrico (plena carga);
2. Elevação de temperatura acoplado na condição de “*forward short circuit*”;
3. Elevação de temperatura em vazio com tensão nominal;
4. Elevação de temperatura em vazio com tensão reduzida.

Os valores obtidos nos itens 2, 3 e 4 acima foram utilizados para determinar a elevação de temperatura total em “*forward short circuit*” do motor para comparar com o valor obtido no item 1. A determinação da elevação de temperatura em “*forward short circuit*” foi baseada no método citado em [3], [9] e [10].

Os motores foram classificados em duas categorias: motor rotor de gaiola e motor rotor bobinado.

7.2 Resultados de Ensaios em Motores com Rotor de Gaiola

Na seqüência são apresentados os resultados obtidos na elevação de temperatura pela variação da resistência e pelo detector de temperatura (tipo PT-100) em 4 motores de características diferentes que foram ensaiadas nos dois métodos. São máquinas abertas ou fechadas com rotor de gaiola.

Motor 01 - MGA 560 - 1650 kW – 6 pólos – 6000V – 50 Hz

O motor MGA 560 é um motor com carcaça soldada, rotor de gaiola, com refrigeração aberta e a carcaça com altura de eixo 560 milímetros. O motor 01 foi acionado mecanicamente na rotação de 1000 rpm e eletricamente em 1204 Volts e 60 Hertz na condição de “*forward short circuit*” e tem rotor de barra de cobre.

Para determinar a elevação de temperatura de temperatura foram realizados os ensaios na condição de “*forward short circuit*” (FSC) e os ensaio de temperatura em vazio com tensão nominal (U_n) e tensão reduzida (U_r). O valor da diferença entre os ensaios de elevação de temperatura em vazio e tensão reduzida ($U_n - U_r$) foi somado ao valor da elevação de temperatura na condição de “*forward short circuit*” e resulta no valor total que representa a real elevação de temperatura em “*forward short circuit*”. Os valores obtidos nos ensaios são apresentados na tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Valores para determinar a elevação de temperatura em “*forward short circuit*”.

Valores	FSC	U_n	U_r	Resultante
ΔT -Média PT-100 ($^{\circ} C$)	56,5	17,8	3,3	71,0
ΔT – Resistência Estator ($^{\circ} C$)	46,6	17,5	3,8	60,3

A diferença obtida entre o método dinamométrico e o “*forward short circuit*” é de $6,5^{\circ} C$ a mais na elevação de temperatura pelo PT-100 e mais $4,3^{\circ} C$ na variação da resistência. Os resultados de cada método estão na tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Resultados da elevação de temperatura do motor n^o 1.

Valores	Dinamométrico	Forward Short circuit
ΔT -Média PT 100 ($^{\circ} C$)	64,5	71,0
ΔT – Resistência Estator ($^{\circ} C$)	56,0	60,3

Esses valores, em percentual, correspondem a 10% para o PT-100 e 7,7% para a resistência. Valores que são aceitáveis segundo [9]. No motor n^o 1 não foi instalada sonda para determinar a elevação de temperatura no rotor, no entanto os resultados obtidos no estator comprovam a similaridade dos métodos para a elevação de temperatura.

Na figura 7.1 é apresentada a comparação dos valores obtidos em cada método de elevação de temperatura. São apresentados os valores dos seis PT-100 instalados no motor e a média dos seis.

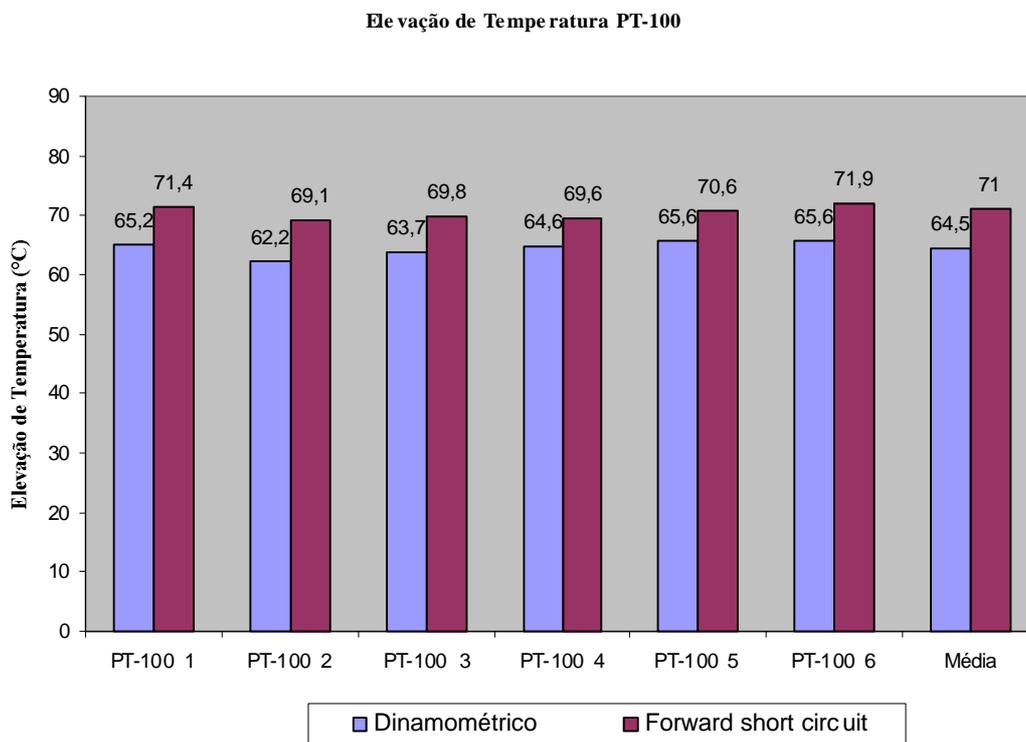


Figura 7.1 - Elevação de temperatura motor número 1.

Motor 02 - HGF 315 – 340kW – 4pólos – 4000V - 50Hz

O motor HGF 315 é um motor aletado com rotor de gaiola, totalmente fechado com altura de eixo de 315 milímetros. No motor 02 foi instalado um termopar no anel de curto-circuito do rotor para medir a temperatura do rotor. Com os valores obtidos nos ensaios de temperatura em vazio e temperatura em “*forward short circuit*” é calculado a elevação de temperatura para o método “*forward short circuit*”. Durante a elevação de temperatura em “*forward short circuit*” o motor é acionado na frequência de 60 Hertz e tensão de 870 Volts. Os valores de ensaio e a elevação de temperatura final estão na tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Valores para determinar temperatura para o motor 02.

Valores	FSC	U_n	U_r	Resultante
ΔT -Média PT 100 (° C)	69,8	8,6	2,1	76,3
ΔT – Resistência Estator (° C)	64,2	8,5	2,5	70,2
ΔT - Rotor (° C)	96,7	12,7	6,3	103,1

O motor 02 apresenta uma pequena diferença entre a temperatura do método dinamométrico em relação a elevação de temperatura do método “*forward short circuit*”. Os valores obtidos para estator e rotor em cada método estão na tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Resultados de elevação de temperatura do motor 02

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit
ΔT - Média PT 100 ($^{\circ} C$)	69,9	76,3
ΔT – Resistência Estator ($^{\circ} C$)	67,0	70,2
ΔT - Rotor ($^{\circ} C$)	100,0	103,1

O termopar instalado no anel de curto-circuito do rotor é do tipo T. O motor 02 tem rotor de barra de cobre. Para o cálculo da elevação de temperatura do rotor optamos pela metodologia empregada para o estator.

Na figura 7.2 também são apresentados os valores para cada método de elevação de temperatura. Temos os valores dos PT-100 instalados nos enrolamentos do estator e o valor médio.

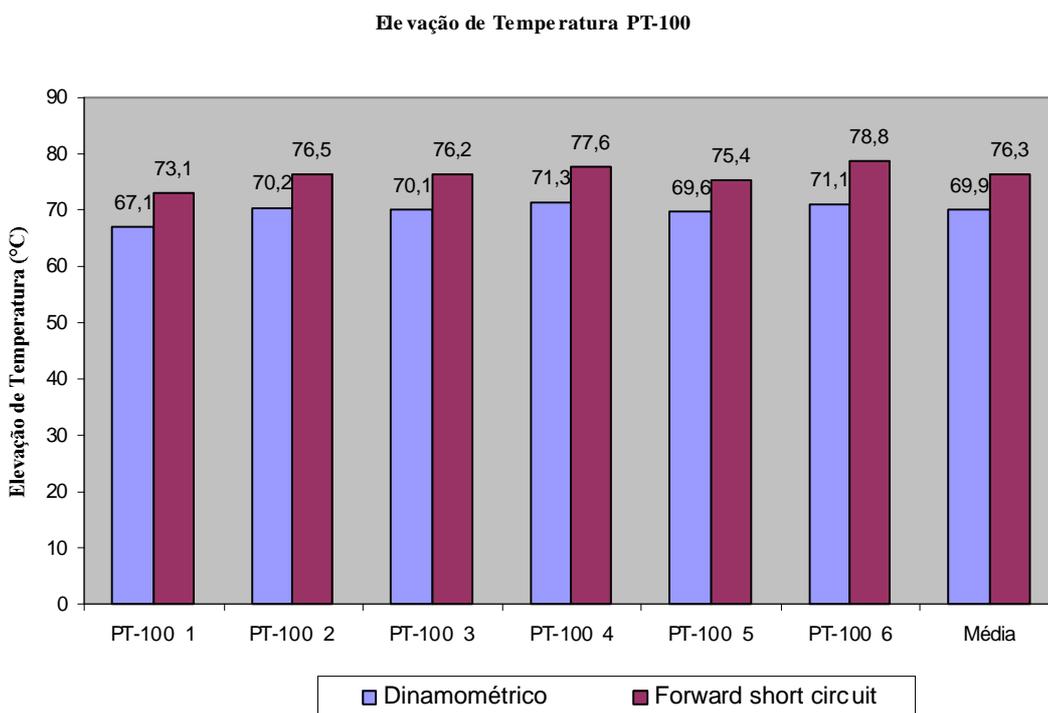


Figura 7.2 - Elevação de temperatura no PT-100 do motor 2.

Motor 03 - HGF 315 – 184kW – 4pólos – 2300V - 60Hz

O motor 03 também é um motor aletado, rotor de gaiola, totalmente fechado com altura de eixo 315 milímetros. No motor 03 foi instalado um termopar tipo T no anel de curto-circuito do rotor. O rotor do motor é de gaiola com barra de cobre. Na condição de forward short circuit o motor foi acionado com 590 Volts e 50 Hertz. A seguir na tabela 7.5 são apresentados os resultados dos ensaios necessários para determinar a elevação de temperatura em “*forward short circuit*”.

Tabela 7.5 - Valores para determinar temperatura para o motor 3.

Valores	FSC	U_n	U_r	Resultante
ΔT -Média PT 100 (° C)	58,3	11,1	2,8	66,6
ΔT – Resistência Estator (° C)	50,6	7,4	2,7	55,3
ΔT - Rotor (° C)	63,8	8,5	3,5	68,8

Com os valores da tabela 7.5 é possível comparar a elevação de temperatura dos métodos “*forward short circuit*” e dinamométrico para o rotor e estator do motor 03. Os resultados são apresentados na tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Resultados de elevação de temperatura do motor n°3

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit
ΔT - Média PT 100 (° C)	64,1	66,6
ΔT – Resistência Estator (° C)	52,3	55,3
ΔT - Rotor (° C)	67,1	68,8

A figura 7.3 apresenta o comportamento dos detectores de temperatura instalados no estator do motor 03.

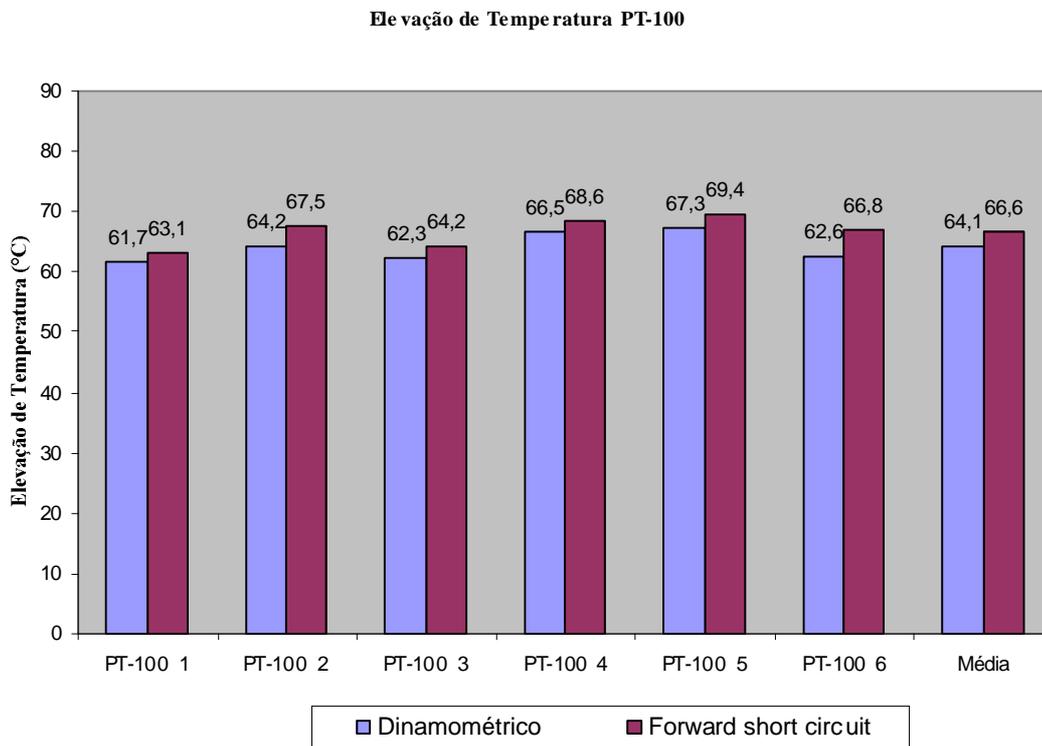


Figura 7.3 - Elevação de temperatura no PT-100 do motor 3.

Motor 04 - HGF 400 – 515kW – 6pólos – 690V - 60Hz

O motor 04 tem altura de eixo 400 milímetros. No motor 04 foram realizados os ensaios de temperatura pelo método dinamométrico e pelo método “*forward short circuit*”. Para “*forward short circuit*” o motor é acionado uma vez com frequência de 50 Hertz e outra com frequência de 65 Hertz. Esta experiência foi realizada para verificar se existia alguma diferença entre o ensaio com 80% da frequência para o ensaio com 120% da frequência. As duas condições são citadas tanto em [9] como em [10]. Verificou-se que os resultados são semelhantes. Os resultados com 50 Hertz são apresentados na tabela 7.7.

Tabela 7.7 - Resultados de elevação de temperatura do motor 4 para 50 Hz.

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit
ΔT – Resistência Estator (° C)	67.5	67.4
ΔT - Média PT 100 (° C)	66.2	65.9

Para a condição de 50 Hertz o motor foi acionado com 135 Volts. Após o ensaio em “*forward short circuit*” com 50 Hertz, outro ensaio também em “*forward short circuit*” foi realizado com a frequência alterada para 65 Hertz e a tensão neste caso para obter corrente nominal no estator chegou a 193 Volts. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Resultados de elevação de temperatura do motor 4 em 65 Hz

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit (65Hz)
ΔT – Resistência Estator ($^{\circ} C$)	67.5	67.0
ΔT - Média PT 100 ($^{\circ} C$)	66.2	66.4

O que difere entre o ensaio em 50 Hertz para o ensaio em 65 Hertz é o torque que o motor solicita para que a corrente nominal circule nos enrolamentos do estator. Em 50 Hertz o torque é menor do que em 65 Hertz.

Com este ensaio pode-se comprovar que tanto é possível acionar o motor com uma frequência menor que a nominal como também é possível acionar com uma frequência maior. Os resultados obtidos em “*forward short circuit*” são semelhantes. Não foi acionado o motor com 120% da frequência nominal (72 Hertz) por questão de limitações do laboratório e segurança do ensaio. O resultado acima mostra que o ensaio de “*forward short circuit*” pode ser aplicado com uma frequência inferior a 120% da frequência nominal, desde que circule corrente nominal.

Verificou-se que os valores obtidos pelo método “*forward short circuit*” são próximos do valor obtido pelo método dinamométrico, fazendo com isso que o método seja válido para determinação da elevação de temperatura. A maior diferença obtida foi de 10% a mais no método “*forward short circuit*” em relação ao dinamométrico na média do PT-100 do motor n^o 1. Esta diferença de até 10% é tolerada conforme [9].

Os motores utilizados são motores fabricados na WEG Energia – Máquinas e fazem parte da produção da empresa. Para este trabalho não foram projetados protótipos específicos, mas se optou em verificar o método a partir dos motores produzidos para clientes que poderiam ser ensaiados nos dois métodos sem comprometer resultados ou prazos de entrega da fábrica. Não foi possível instalar sonda no rotor de todos os motores, no entanto verificamos que para motores rotor de gaiola o aquecimento no rotor na

condição de “*forward short circuit*” não é tão expressiva conforme resultados do motor 02 e 03.

Os motores acima descritos são motores com rotor de barra de cobre. Neste trabalho não verificamos o comportamento dos motores com rotor injetado de alumínio. O motivo disso é que a tecnologia de rotor injetado tem aplicação para motores de pequeno porte e o estudo do método “*forward short circuit*” é destinado para motores de médio e grande porte.

A figura 7.4 apresenta a foto do motor 04, rotor de gaiola sendo testado na metodologia de “*forward short circuit*”.



Figura 7.4-Motor rotor de gaiola em “*forward short circuit*”.

7.3 Resultados de Ensaios em Motores com Rotor Bobinado

Para os motores com rotor bobinado encontramos duas famílias. A família MAF representa os motores de carcaça soldada, com rotor bobinado e totalmente fechado. A outra família, FAF representa os motores aletados, com rotor bobinado e totalmente

fechado. Após a designação da família temos um número que representa a altura de eixo do motor em milímetros.

Nos motores com rotor bobinado o valor da elevação de temperatura do rotor foi obtida a partir da medida da resistência do enrolamento do rotor. Os valores a frio e a quente foram utilizados no cálculo da elevação de temperatura de acordo com a equação 3.1.

Motor 05 - MAF 800 – 4560kW – 8pólos – 13200V - 60Hz

O motor foi acionado mecanicamente na rotação de 900 rpm e acionado com 3450 Volts e frequência de 65 Hertz. A tabela 7.9 apresenta os valores obtidos nos ensaios em vazio e “*forward short circuit*”.

Tabela 7.9 - Valores para determinar a elevação de temperatura.

Valores	FSC	U_n	U_r	Resultante
ΔT -Média PT 100 (° C)	57,3	31,0	9,2	79,1
ΔT – Resistência Estator (° C)	54,4	30,6	11,4	73,6
ΔT – Resistência Rotor (° C)	49,7	22,8	4,4	68,1

Com a frequência de 65 Hertz obtivemos valores em “*forward short circuit*” muito próximos dos valores obtidos no método dinamométrico. Os resultados são apresentados na tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Resultados de elevação de temperatura do motor 05.

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit
ΔT – Resistência Estator (° C)	70.0	73.6
ΔT - Média PT 100 (° C)	72.6	79.1
ΔT – Resistência Rotor (° C)	62.6	68.1

Tanto as escovas como os anéis coletores do rotor não sofreram aquecimento excessivo durante o ensaio em “*forward short circuit*”. No ensaio dinamométrico a elevação de temperatura máxima nas escovas chegou a 35 ° C e no ensaio em “*forward short circuit*” este valor é de 44° C.

A figura 7.5 apresenta o comportamento dos detectores de temperatura tipo PT-100 que estão instalados nos enrolamentos do estator do motor 05.

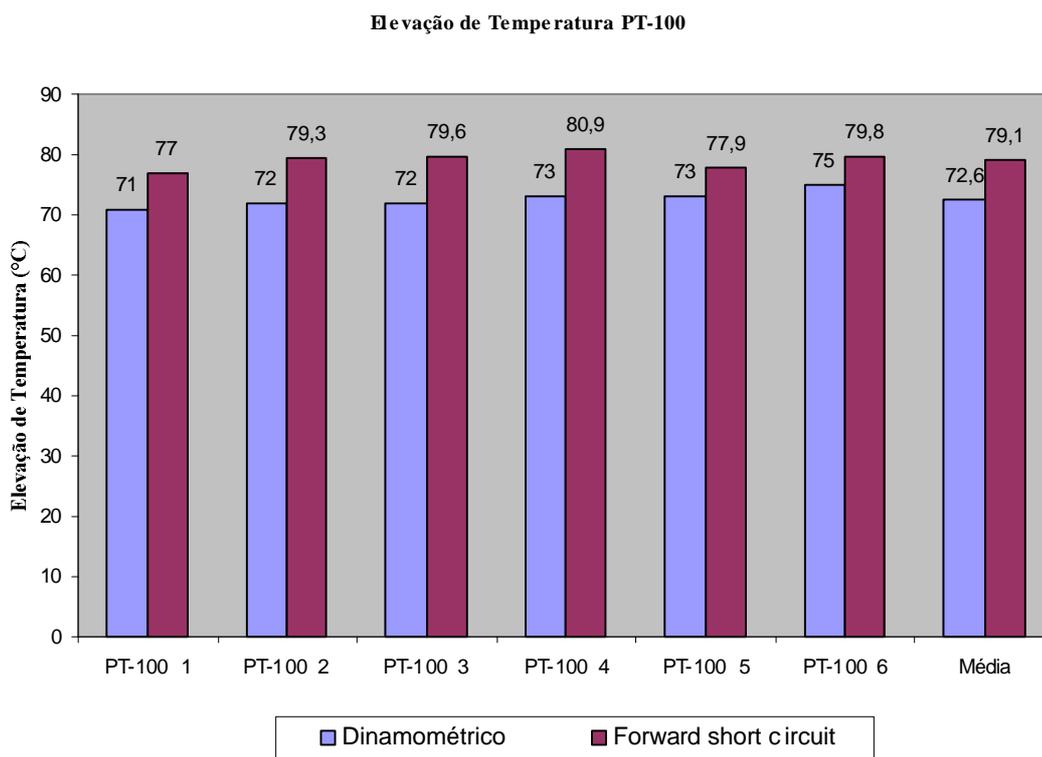


Figura 7.5 - Elevação de temperatura no PT-100 do motor 05.

Motor 06 - FAF 355 – 120kW – 6pólos – 525V - 60Hz

No motor aletado com rotor bobinado não se faz uso de detectores de temperatura no enrolamento do estator. Os valores apresentados são relativos a elevação de temperatura pela variação da resistência de acordo com a equação 3.1.

Tabela 7.11 - Resultados de elevação de temperatura do motor 06.

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit
ΔT – Resistência Estator (° C)	63,0	68,2
ΔT – Resistência Rotor (° C)	81,0	87,0

O ensaio foi realizado numa condição de frequência de 50 Hertz. Para o motor 06 optou-se em verificar o comportamento da corrente do rotor. Para essa verificação foram coletadas as formas de onda da corrente do rotor medidas no curto-circuito do rotor. Com as formas de onda observa-se o aumento da corrente do rotor do ensaio no método dinamométrico para o método de “*forward short circuit*”. Também fica evidente o aumento da frequência da corrente do rotor que é causada pelo aumento do escorregamento durante o ensaio de “*forward short circuit*”.

A figura 7.6 apresenta a forma de onda da corrente para o método dinamométrico.

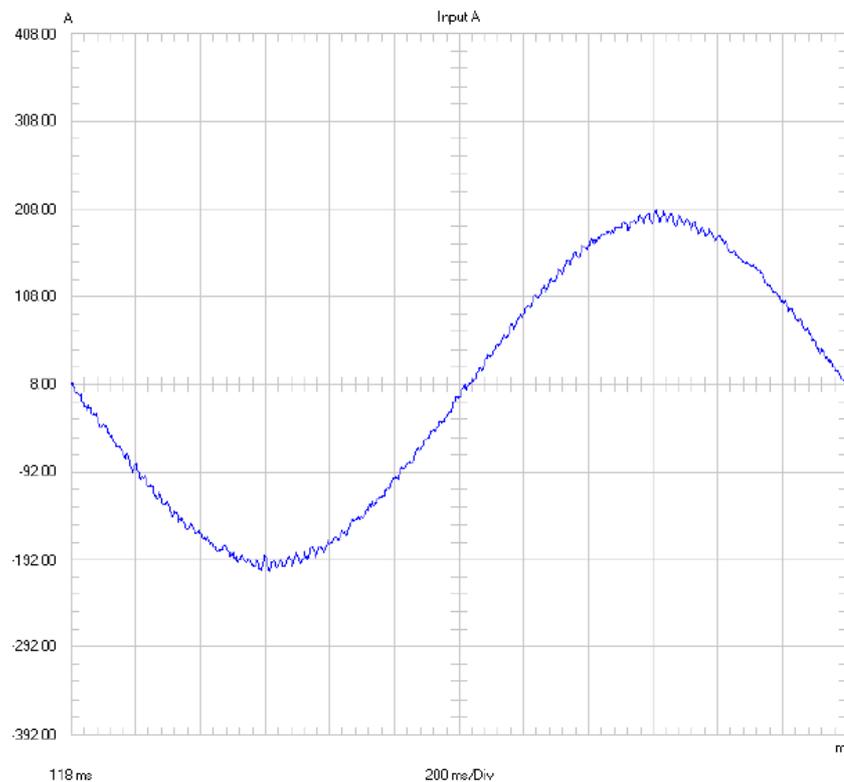


Figura 7.6 - Forma de onda da corrente do rotor no método dinamométrico.

A figura 7.7 e a figura 7.8 apresentam a forma de onda da corrente para o método “*forward short circuit*”.

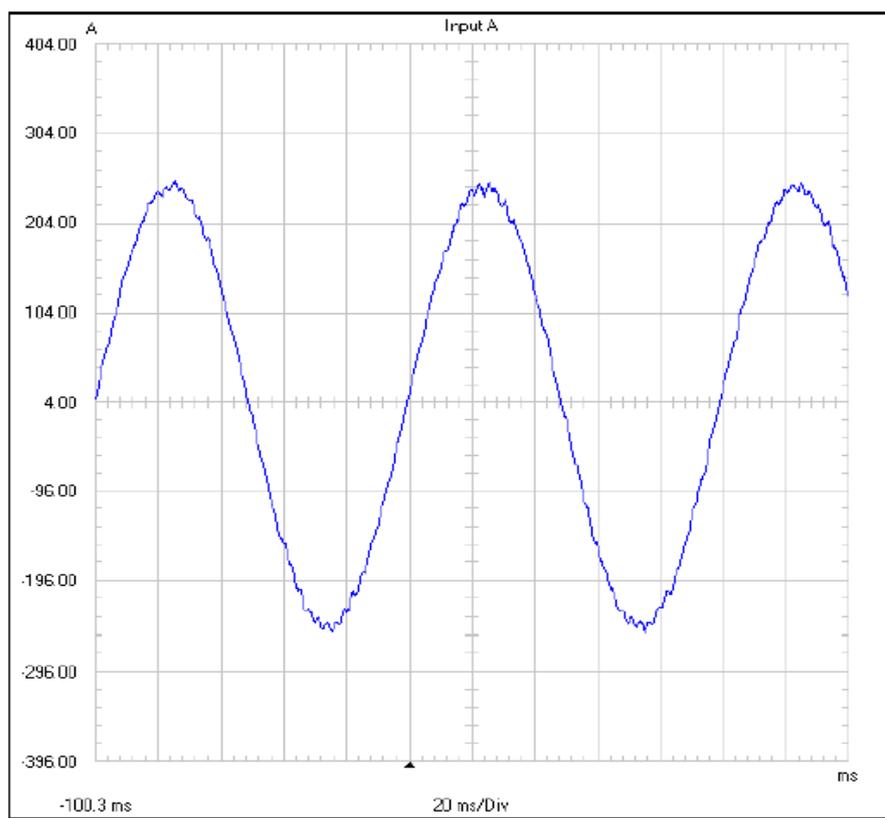


Figura 7.7 - Forma de onda da corrente do rotor para “*forward short circuit*” com 80% da frequência.

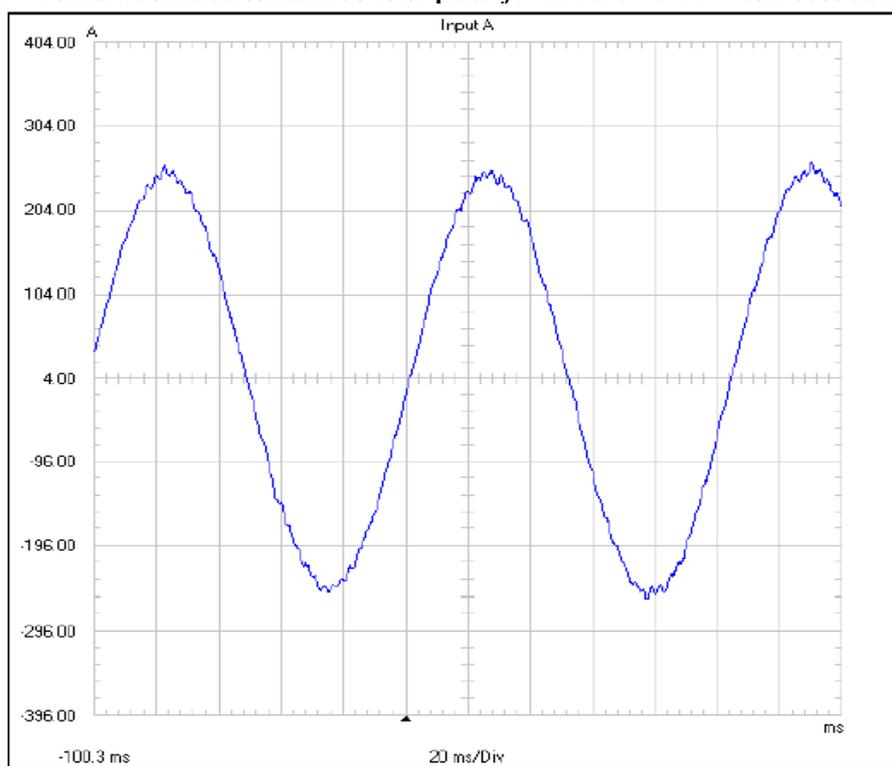


Figura 7.8 - Forma de onda da corrente do rotor para “*forward short circuit*” com 120% da frequência.

Nas formas de onda apresentadas tem-se uma diferença na unidade de tempo. Na figura 7.6 temos 200ms/divisão e nas figuras 7.7 e 7.8 temos 20 ms/divisão. Na situação de plena carga (método dinamométrico) a corrente eficaz do rotor é de 139 Ampères com uma frequência de 418 mili-Hertz. Quando o motor está na condição de “*forward short circuit*” a corrente aumenta para uma frequência de 10 Hertz na condição de 80% e 9,7 Hertz para a condição de 120%.

Tabela 7.12 - Valores de corrente e frequência no rotor.

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit 50 Hz	Forward Short Circuit 72 Hz
Corrente do rotor (A)	139,0	173,0	176,0
Frequência da corrente do rotor (Hz)	0,418	10,0	9,7

Com os valores apresentados na tabela 7.12 fica evidente o aumento da corrente do rotor e da frequência no rotor causado pelo aumento do escorregamento do motor.

Motor 07 - FAF 355 – 168kW – 6pólos – 550V - 50Hz

Para o motor 07 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de elevação de temperatura pelos dois métodos, e as formas de onda do rotor para os dois métodos. A tabela 7.13 apresenta os resultados finais da elevação de temperatura.

Tabela 7.13 - Resultados de elevação de temperatura do motor 07.

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit 40 Hz	Forward Short Circuit 60Hz
ΔT – Resistência Estator ($^{\circ}$ C)	87.4	93.2	90.5
ΔT – Resistência Rotor ($^{\circ}$ C)	101.1	109.2	104.9

Observou-se uma diferença maior na elevação de temperatura em “*forward short circuit*” com 40 Hertz. Para essa condição o rotor apresentou uma elevação de 109,2 $^{\circ}$ C o que representa uma diferença de 8% em relação a método dinamométrico. Tal fato se

explica pelo escorregamento maior nesta condição, e com isso o valor de elevação de temperatura é maior que em 60 Hertz.

As figuras 7.9, 7.10 e 7.11 apresentam as formas de onda da corrente do rotor.

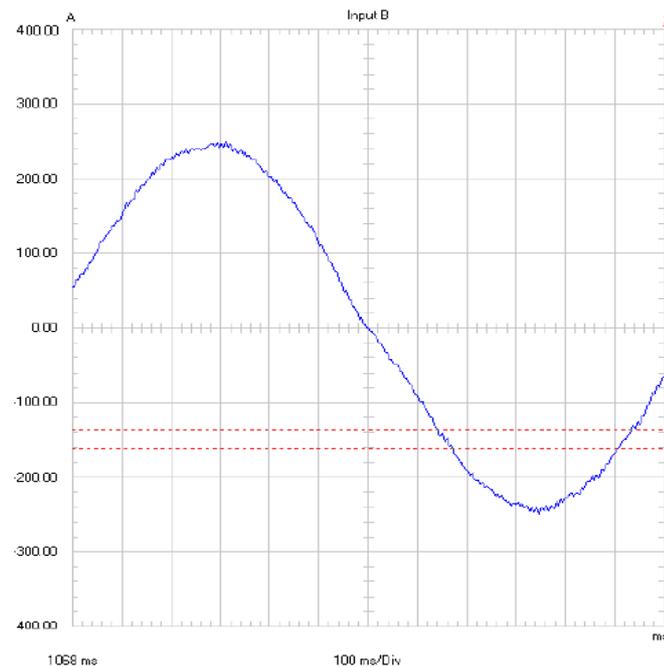


Figura 7.9 - Forma de onda da corrente do rotor para método dinamométrico.

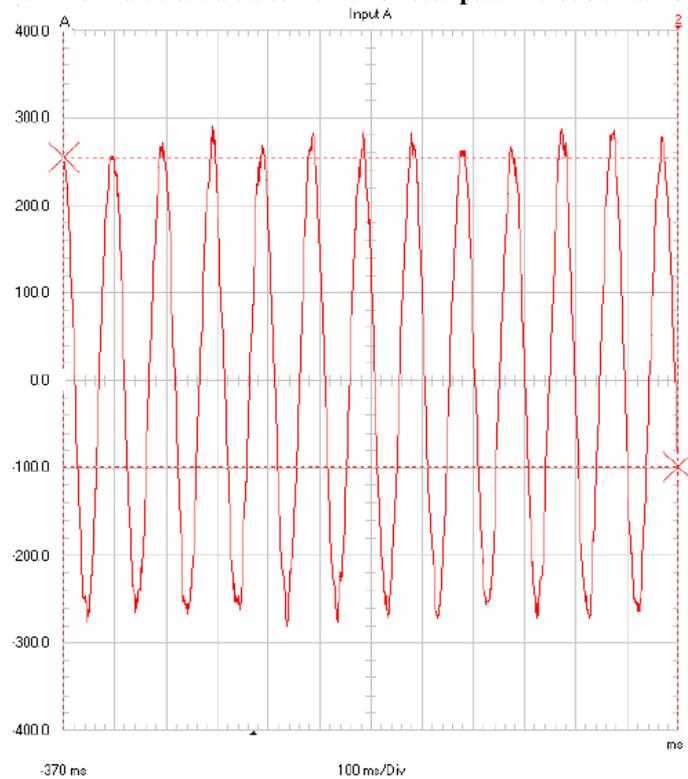


Figura 7.10 - Forma de onda da corrente do rotor para "forward short circuit" com 120% da frequência.

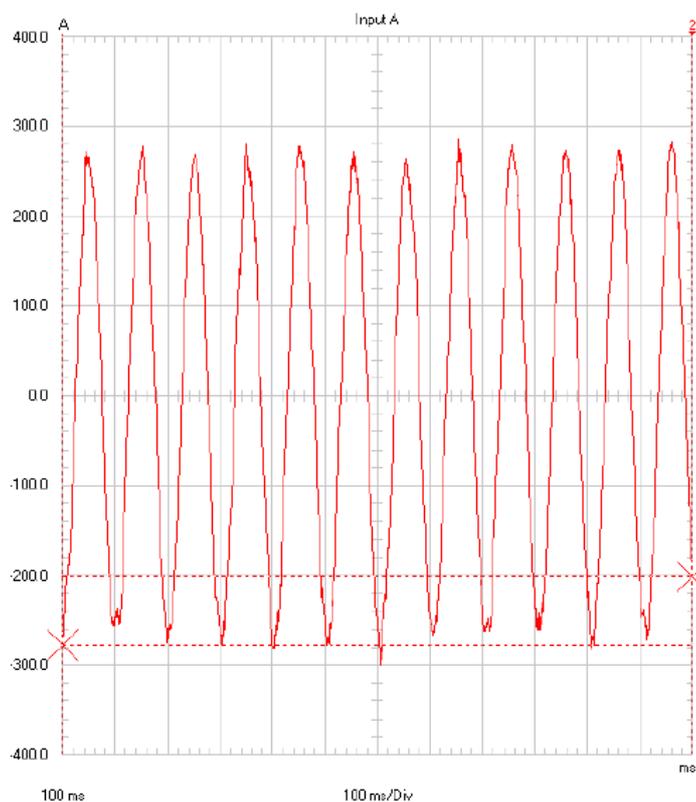


Figura 7.11 - Forma de onda da corrente do rotor para “forward short circuit” com 80% da frequência.

Nas três formas de onda apresentadas acima nas figuras 7.9, 7.10 e 7.11 podemos observar claramente o aumento da frequência no ensaio de “forward short circuit”. A tabela 7.14 apresenta os valores de corrente e frequência.

Tabela 7.14 - Valores de corrente e frequência no rotor.

Valores	Dinamométrico	Forward Short Circuit 40 Hz	Forward Short Circuit 60 Hz
Corrente do rotor (A)	170,4	189,0	188,1
Frequência da corrente do rotor (Hz)	0,760	9,9	10,2

Para os motores 05, 06 e 07 os resultados comprovam que a diferença entre os dois métodos para elevação de temperatura é muito pequena. Para os motores de rotor bobinado o diferencial no ensaio foi a medida da resistência do rotor. Para o motor 05 essa medida foi realizada direta nos cabos do rotor. Para o motor 06 e 07 essa medida foi realizada nos anéis coletores do rotor que estão conectados aos cabos do rotor.

Nos motores de rotor bobinado verificou-se um aquecimento maior no rotor, diferente do obtido em motores rotor de gaiola.

7.4 Análise dos Resultados

Na prática, verifica-se um aumento da temperatura do rotor nos motores submetidos ao método “*forward short circuit*”. Nos motores com rotor de gaiola a diferença da temperatura do rotor do método dinamométrico para o método de “*forward short circuit*” é muito pequena, inferior a 4° C ou 3,1%. Em motores com rotor bobinado notamos um aumento da temperatura do rotor de até 8,1° C ou 8%. A tabela 7.15 apresenta os valores obtidos na elevação de temperatura no rotor e o valor projetado para motores com rotor bobinado.

Tabela 7.15 - Elevação de temperatura no rotor para motor com rotor bobinado.

	Projetado (°C)	Dinamométrico (°C)	“ <i>Forward Short Circuit</i> ” (°C)
Motor 05	68,4	62,6	68,1
Motor 06	83,0	81,0	87,0
Motor 07	93,2	101,1	109,2

A tabela 7.16 apresenta os dados de elevação de temperatura obtidos nos estatores dos motores ensaiados nos dois métodos e o valor calculado no projeto do motor.

Tabela 7.16 - Elevação de temperatura no estator.

	Projetado (°C)	Dinamométrico (°C)	“ <i>Forward Short Circuit</i> ” (°C)
Motor 01	68,2	56,0	60,3
Motor 02	67,5	67,0	70,2
Motor 03	68,2	52,3	55,3
Motor 04	70,0	67,5	67,4
Motor 05	76,1	70,0	73,6
Motor 06	65,0	63,0	68,2
Motor 07	86,0	87,4	93,2

Os resultados apresentados para o estator e rotor evidenciam que o método de elevação de temperatura “*forward short circuit*” obtém valores muito próximos do valor apresentado pelo método dinamométrico e de projeto.

É importante lembrar que na comparação dos métodos não foram utilizados motores de rotor de gaiola com alumínio injetado. O método em estudo deve ser utilizado em motores de médio e grande porte, que na prática possuem rotor de gaiola com barra de cobre.

Foi observado nos dados coletados que no motor 06 com rotor bobinado houve um aumento de até 25% da corrente de rotor quando o motor está na condição de “*forward short circuit*”. Este aumento está relacionado com o aumento do escorregamento. Desta forma tem-se um aumento da perda Joule do rotor, evidenciada pelo aumento da corrente do rotor. Este aumento do escorregamento também afetou a frequência da corrente do rotor que, no método dinamométrico, era da ordem de 0,418 Hz e passou para aproximadamente 10 Hz quando submetido a condição de “*forward short circuit*” tanto com 80% da frequência como para 120% da frequência. O aumento da frequência da corrente do rotor ajudou no aumento da temperatura do rotor. Isso ocorre pelo efeito pelicular relacionado à frequência. O efeito pelicular será mais forte em motores com rotor bobinado. Isso se deve ao fato que em motores com rotor de gaiola as dimensões das barras de cobre são maiores que as dimensões das bobinas de cobre do rotor bobinado.

Para motores com rotor bobinado o ideal é realizar o ensaio de “*forward short circuit*” numa condição de frequência de até 10 % maior que a frequência nominal. Essa medida visa reduzir o aquecimento excessivo que o rotor pode sofrer quando submetido a uma frequência maior por um longo período.

8 CONCLUSÕES

Em um processo de conversão eletromecânica de energia, a potência absorvida pela máquina será a soma entre as perdas e a potência útil na ponta de eixo. Essas perdas, na máquina, são responsáveis pelo seu aquecimento. A partir deste aquecimento é obtido um processo de transferência de calor nas diversas partes da máquina que tende ao equilíbrio. Dentre essas partes o rotor e o estator são avaliados termicamente para verificar se a classe térmica dos materiais está sendo respeitada. Esta avaliação ocorre com base nos valores obtidos no ensaio de elevação de temperatura da máquina. Este ensaio de elevação de temperatura pode ser realizado seguindo uma das diversas metodologias existentes. Para motores de médio e grande porte existe um método chamado de “*forward short circuit*”.

Nesta dissertação, objetivou-se estudar o método de “*forward short circuit*”, identificar as perdas da máquina, determinar parâmetros do circuito equivalente e determinar a estrutura necessária para realizar o ensaio. O método “*forward short circuit*” é um método de carga equivalente eficaz para determinação da elevação de temperatura em motores de indução. O método se mostrou útil tanto para motores de médio como de grande porte. Para motores de grande porte tem como vantagem a não necessidade de torque elevado para realizar o ensaio.

Para avaliar a eficácia do método, os resultados de vários motores ensaiados no método “*forward short circuit*” foram comparados aos obtidos através do método dinamométrico. Os ensaios realizados mostraram que o valor de elevação de temperatura pelo método de “*forward short circuit*” é semelhante ao valor de elevação de temperatura obtido pelo método dinamométrico que simula condições próximas da real em motores de indução.

O método “*forward short circuit*” apresentou um aumento da corrente do rotor em função do aumento do escorregamento, no entanto, este aumento não é prejudicial ao rotor. Todo motor tem seu rotor projetado para suportar elevadas correntes de partida. Como no ensaio a corrente do rotor irá aumentar não mais que 25% da corrente nominal, não existirão problemas que possam prejudicar a vida útil do rotor. Como ocorre o aumento da corrente do rotor também ocorre um aumento na frequência no rotor. Percebeu-se que à medida que o escorregamento aumenta, menor será o valor do torque e também o valor da tensão necessária para que circule a corrente nominal do motor durante o ensaio.

O aquecimento do rotor é dado pelo aumento da corrente e da frequência do rotor. Tanto a corrente como a frequência, aumentam devido ao aumento do escorregamento. Verificou-se que nos motores ensaiados com frequência maior (120%) e com frequência menor (80%) a diferença nos resultados obtidos é muito pequena. Isso pode ocorrer na condição de “*forward short circuit*” com 80% da frequência, neste caso o escorregamento é de -0,25 e para 120% da frequência o escorregamento é de 0,166. Portanto as duas condições de ensaio são válidas.

Pode-se considerar que os objetivos foram alcançados, como exposto abaixo.

Durante a elaboração deste trabalho verificou-se que o ensaio de “*forward short circuit*” está relacionado com os ensaios em vazio e rotor bloqueado, pois o motor durante o ensaio está com o rotor girando na rotação síncrona do motor e com escorregamento elevado como no ensaio de rotor bloqueado. Com base nestes critérios podemos determinar um circuito equivalente do motor para este ensaio.

Foram identificadas as perdas do motor durante o ensaio e qual a sua importância na determinação da temperatura do motor.

Com base nos valores do ensaio de “*forward short circuit*” foi possível determinar alguns parâmetros do circuito equivalente do motor com grande precisão quando comparado com o método tradicional para determinação dos parâmetros do circuito equivalente.

Um das vantagens do método é a possibilidade de ensaio de motores de grande porte utilizando a estrutura já existente, para tal, é necessário apenas que a fonte geradora (G e DM-2) consiga partir o motor com um pequeno torque na ponta de eixo com tensão reduzida e corrente nominal.

O principal fator a aumentar a temperatura do rotor durante o ensaio de “*forward short circuit*” está relacionado com o aumento do escorregamento que irá influenciar diretamente no aumento da corrente do rotor e do efeito pelicular com o aumento da frequência no rotor.

Foi utilizada uma estrutura de laboratório dinamométrico com inversores para o ensaio em “*forward short circuit*”. A vantagem está em usar o dinamômetro como motor acionante para o motor em teste durante o ensaio. Em motores 60 Hertz a frequência de alimentação passa a ser 72 Hertz o que pode causar danos à fonte de alimentação (G e DM-2). O motivo da utilização da condição de 120% da frequência está no fato que, em 80% da frequência, o motor opera como um gerador de indução com alto escorregamento e não se

tem uma fonte regenerativa. Os resultados provam que, para motores 60 Hertz, podemos realizar o ensaio com uma frequência inferior a 120% da frequência nominal, por exemplo, 65 Hertz, respeitando a condição de corrente nominal no estator e rotação síncrona para o rotor sem prejudicar os resultados de elevação de temperatura.

Ao final deste trabalho constatou-se que o método de “*forward short circuit*” passou a ser utilizado com frequência no ensaio de motores que excedem a capacidade dos dinamômetros em operação na empresa WEG. Também passou a ser utilizado em motores de médio porte quando estes possuem frequência diferente das frequências industriais (50 e 60 Hertz) ou motores com características específicas como motores verticais com mancal de óleo onde a capacidade de ensaio em plena carga é reduzida.

O ensaio de elevação de temperatura pelo método “*forward short circuit*” fornece resultados de temperatura com valores um pouco acima dos resultados do método dinamométrico, o que o coloca como um ensaio conservativo, no sentido em que ele tende a indicar condições de uso mais severas que o motor teria em condições de trabalho normais.

As sugestões para futuros trabalhos, são apresentadas a seguir.

- A influência do efeito pelicular no ensaio de “*forward short circuit*” na determinação da elevação de temperatura;
- Desgaste do isolamento do rotor durante o ensaio de “*forward short circuit*”;
- O comportamento das perdas suplementares no ensaio de “*forward short circuit*”;
- A elevação de temperatura em rotores de alumínio injetado;
- Determinação da reatância de magnetização no ensaio de “*forward short circuit*”.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **PLEVIN,D.H.;GLEW,C.N.;DYMOND,J.H.** Equivalent Load Test for Induction Machines – The Forward Short Circuit Test ,*IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.14, n° 3, p. 419-425, September 1999.
- [2] **DYMOND,J.H.** Forward Stall Test: An Alternate Method of Rotor and Stator Loading for Temperature and Vibration Verification , *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31, n° 5, p. 1153-1158, September/October 1995.
- [3] **PORTOS,J.; TURNER,S.** Equivalent Load Test for Large Induction Machines – The Three Step Method , *IEEE paper n° PCIC-2004-35*, p. 319-323, 2004.
- [4] **ÇOLAK,I.;BAL, G.;ELMAS,Ç.** Review of the Testing Methods for Full-Load Temperature Rise Testing of Induction Machines , *EPE Journal*, Vol.6, n°1, p. 37-43, May 1996.
- [5] **CABREIRA,M.F.R.R.** *Análise Termo-Magnética de Motores de Indução de Pequeno Porte Utilizando Técnicas de Elementos Finitos em Duas Dimensões* , Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- [6] **BOGLIETTI,A.;CAVAGNINO,A.;LAZZARI,M.;PASTORELLI,M.** A Simplified Thermal Model for Variable-Speed Self-Cooled Industrial Induction Motor ,*IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.39, n° 4, p. 945-952, July/August 2003.
- [7] **STATON,D.;BOGLIETTI,A.;CAVAGNINO,A.** Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis , *Dip. Ingegneria Elettrica Industriale*, Politécnico di Torino, 2004.
- [8] **SADOWSKI,N.;BASTOS,J.P.A.** *Eletromagnetic Modeling by Finite Element Methods* , Marcel Dekker,InC, New York, 2003. p. 419-435

- [9] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION.** *Rotating Electrical Machines – Equivalent Loading and Super-position Techniques – Indirect Testing to Determine Temperature Rise*, IEC 61986.Geneva, 2004.
- [10] **IEEE STANDARD.** *Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, IEEE 112.New York, 2006.
- [11] **MIHALCEA,A.;SZABADOS,B.;HOOLBOOM,J.** Determining Total Losses and Temperature Rise in Induction Motors Using Equivalent Loading Methods ,*IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.16, n° 3, p. 214-219, September 2001.
- [12] **BASTOS,J.P.A.** *Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática.* Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [13] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION.** *Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and Performance*, IEC 60034-1.Geneva, 2004.
- [14] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *Máquinas Elétricas Girantes Parte 1: Motores de Indução Trifásicos - Ensaio.* NBR 5383-1. Rio de Janeiro, 2002.
- [15] **KRAL,C.;HABETLER,T.G.;HARLEY,R.G. et al.** Rotor Temperature Estimation of Squirrel-Cage Induction Motors by Means of a Combined Scheme of Parameter Estimation and a Thermal Equivalent Model ,*IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.40, n° 4, p. 1049-1057, July/August 2004.
- [16] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução - Especificação.* NBR 7094. Rio de Janeiro, 2002.
- [17] **BRADLEY,K.J.;CAO,W.;PADILLA,J.A.** Evaluation of Stray Load Loss in Induction Motors With a Comparison of Input-Output and Calorimetric Methods ,*IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.21, n° 3, p. 682-689, September 2006.

- [18] **NAGORNYI,A.;WALLACE,A.K.;JOUANNE,A.V.** Stray Load Loss Efficiency Connections ,*IEEE Industry Applications Magazine*, p. 62-69, May/June 2004.
- [19] **WU,Y.;GAO,H.** Induction-Motor Stator and Rotor Winding Temperature Estimation Using Signal Injection Method ,*IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.42, n° 4, p. 1038-1044, July/August 2006.
- [20] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.** *Rotating Electrical Machines – Part 2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests*, IEC 60034-2.Geneva, 2007.