

GLAUCO ANDRE WOLFF CISZ

**ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM
MÁQUINAS DE INDUÇÃO UTILIZANDO O
MÉTODO DA DUPLA FREQUÊNCIA**

FLORIANÓPOLIS

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**


**ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM
MÁQUINAS DE INDUÇÃO UTILIZANDO O
MÉTODO DA DUPLA FREQUÊNCIA**

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


ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM MAQUINAS DE INDUÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO DA DUPLA FREQUÊNCIA

Glauco Andre Wolff Cisz


‘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.’


Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Orientador

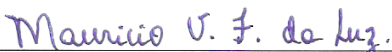

Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Co-Orientador

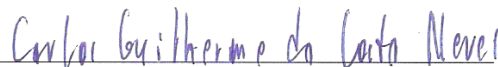

Prof.^a Kátia Campos de Almeida, Dr.^a
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica


Banca Examinadora:


Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Presidente


Prof. Nelson Sadowski, Dr.


Prof. Mauricio Valência Ferreira da Luz, Dr.


Eng. Carlos Guilherme da Costa Neves, Dr.


Prof. Pedro Armando da Silva Júnior, Dr.

Dedico este trabalho, à minha esposa Eliza,
minha filha Laura e meus pais Bernadete e
Alvaro, que sempre me motivaram

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradecer aos meus pais Bernadete e Álvaro pelo carinho e por não pouparem esforços para que me tornasse um engenheiro.

À minha esposa e filha pela paciência, apoio e carinho durante todo o período do curso de mestrado.

À WEG por ter proporcionado este curso e disponibilizado toda sua estrutura durante a preparação desta dissertação.

Aos colegas dos laboratórios de ensaios da WEG Energia em Jaraguá do Sul e São Bernardo do Campo pela grande ajuda na realização dos testes apresentados nesta dissertação.

À UFSC, aos professores e colegas, que me deram a oportunidade de me tornar um engenheiro e um mestre.

Ao Professor Nelson Jhoe Batistela pela oportunidade de realizar esta dissertação e pela motivação e auxílio durante os trabalhos.

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

ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM MÁQUINAS DE INDUÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO DA DUPLA FREQUÊNCIA

Glauco Andre Wolff Cisz

Julho/2008

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-Orientador: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras Chave: Máquina Assíncrona; Ensaios de Elevação de Temperatura; Método da Dupla Frequência.

Números de Páginas: 53.

Testar máquinas de indução a plena carga vem sendo o método mais aceito para determinar sua elevação de temperatura. Este método tem a grande vantagem de simular exatamente as condições de operação da máquina sob teste. Porém, alguns problemas também podem ser relacionados a ele, principalmente a necessidade de um dinamômetro com capacidade igual ou superior ao da máquina sob teste. Montar, acoplar e alinhar motores pode consumir bastante tempo, principalmente quando se trata de motores de grande potência, de alta velocidade, ou verticais. O método com dupla frequência vem oferecer uma maneira de realizar o teste de temperatura em máquinas de indução, sem necessidade de potência elétrica nominal, ou aplicar-se carga no eixo. Este método é aplicado principalmente em máquinas de grande porte, levando, mesmo que em menor escala, a um laboratório de ensaios também constituído por máquinas de grande porte e alto custo. Uma análise detalhada do funcionamento das máquinas que constituem o laboratório durante o teste pode garantir um dimensionamento otimizado dos equipamentos, com uma redução significativa dos gastos necessários para a compra e montagem deste laboratório. Os trabalhos realizados até o momento relacionados ao método da dupla frequência focam principalmente o comportamento da máquina sob teste, fornecendo poucas informações a respeito das máquinas que constituem o sistema de acionamento, dificultando seu projeto e especificação. O objetivo do trabalho consiste em estudar o método de ensaio da Dupla Frequência, discutindo aspectos que auxiliem no entendimento, na realização de ensaios e no levantamento de aspectos importantes para a concepção de sistemas para aplicação do método da Dupla Frequência em ensaios de elevação de temperatura em máquinas de indução.

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

TEMPERATURE RISE TESTS APPLIED TO INDUCTION MACHINES BY USING THE DUAL FREQUENCY METHOD

Glauco Andre Wolff Cisz

July/2008

Advisor: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-Advisor: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: Asynchronous Machines, Temperature Rise Test; Dual Frequency Method.

Number of Pages: 53

Testing induction machines at full load has been the most accepted method to determine temperature rise. This method has the great advantage of simulating the exact operating conditions of the machine under test but some problems may also be related to it, mainly the need of a dynamometer of same or higher capacity of the machine to be tested. The work of coupling and aligning motors may be very time-consuming mainly when it comes to high power, high speed or vertical machines. The dual-frequency method allows for an alternative way to perform the temperature rise test in induction machines without the need of full load electrical power or even applying load to the shaft. This method is mainly applied to large machines, even to a smaller extent, implies in a testing lab also constituted of large and expensive equipments. A more detailed analysis of the functioning of the machines utilized in a testing lab may result in more optimized design of the equipments and significant reduction of costs related to purchase and assembly of the testing lab. To date, the works related to the dual-frequency method have been mainly focused on the behavior of the machine under test, providing little information on the driving machines what makes more difficult their design and specification. The purpose of this research essay is studying the Dual Frequency Test method, bringing to discussion aspects that may contribute to a better understanding, execution of tests as well as important factors for the conception of systems applicable to the Dual Frequency method to determine temperature rise when testing induction machines

SIMBOLOGIA

Pu	por unidade
f_0	diferença de frequência entre as fontes em série (Hz);
H	energia armazenada no rotor (kW);
K	amplitude da velocidade de oscilação do rotor (pu);
v_1	tensão da fonte principal (pu);
v_2	tensão da fonte auxiliar (pu)
φ	ângulo de rotação da onda de fluxo (pu);
w_1	velocidade angular da fonte principal (pu);
w_2	velocidade angular da fonte auxiliar (pu);
w_T	velocidade angular da onda de fluxo (pu);
w_r	Velocidade do Rotor (pu)
w_0	$2\pi f_0$ (rad/s);
f_T	fluxo total (pu).
T	Torque (pu)
P	potência (pu)
t	tempo (segundos)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização e Motivação do Trabalho	1
1.2 Objetivo Geral	2
1.3 Objetivos Específicos	2
1.4 Metodologia	3
1.5 Estrutura do Trabalho	4
CAPÍTULO 2 - A MÁQUINA DE INDUÇÃO	5
2.1 Introdução	5
2.2 Princípio de Funcionamento	5
2.3 Principais Partes Construtivas da Máquina de indução	7
2.3.1 Estator	7
2.3.2 Rotor	7
2.4 Principios de Operação	8
2.5 Perdas em Máquinas de indução	8
2.5.1 Perdas Joule	9
2.5.2 Perdas Mecânicas	9
2.5.3 Perdas no Ferro	9
2.5.4 Perdas Suplementares ou Adicionais	10
2.6 Características Nominais e Aquecimento	11
CAPÍTULO 3 - ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM MÁQUINAS DE INDUÇÃO	13
3.1 Introdução	13
3.2 Ensaio de Elevação de Temperatura	14
3.3 Método Carga Direta	15
3.4 Método Back to Back	17
3.5 Método Gráfico	18
3.6 Método Forward Short Circuit	21
3.7 Método Dupla Frequência	23
3.8 Comparação Entre Ensaios e Discussão de Resultados	23
CAPÍTULO 4 - O MÉTODO DA DUPLA FREQUÊNCIA	28
4.1 Introdução	28
4.2 Princípio de Funcionamento	28
4.3 Equipamentos e Diagramas de Montagem	35
4.4 Procedimento para Realização do Ensaio	36
4.5 Vibração	37
4.6 Método da Dupla Frequência Utilizando Inversores de Frequência	39
CAPÍTULO 5 - BANCADA PROTÓTIPO	41
5.1 Proposta	41
5.2 Resultados Obtidos	43
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	49

6.1	Conclusão	49
6.2	Proposta para Trabalhos Futuros	51
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA		53

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perdas em uma Única Lâmina	10
Figura 3.1 - Ensaio de Elevação de Temperatura MGF 355	15
Figura 3.2 - Sistema de Recuperação de Energia até 2MW	16
Figura 3.3 - Sistema de Recuperação de Energia para Potências Maiores que 2MW.	16
Figura 3.4 - Sistema <i>Back-to-Back</i> com Duas Fontes de Alimentação.....	17
Figura 3.5 - Sistema <i>Back-to-Back</i> com <i>Epicycle Gearbox</i>	18
Figura 3.6 - Método Gráfico - Tensão Nominal	19
Figura 3.7 - Método Gráfico - Tensão Reduzida	20
Figura 3.8 - Curva de Torque e Corrente por Rotação.....	22
Figura 3.9 - HGF 400 - 515,2kW - 690V - 6 Pólos - 60Hz.....	23
Figura 3.10 - MGF 355 - 478,4kW - 3,3kV - 4 Pólos - 50Hz	24
Figura 3.11 - Comparação entre Métodos de Elevação de Temperatura – HGF 400	25
Figura 3.12 - Comparação entre Métodos de Elevação de Temperatura – MGF 355	26
Figura 4.1 - Diagrama Fasorial das Ondas de Fluxo	30
Figura 4.2 - Onda de Fluxo por Velocidade Angular (pu) Alimentado por Frequência de 60Hz e 50Hz.	32
Figura 4.3 - Onda de Fluxo por Velocidade Angular (pu) Alimentado por Diferentes Frequências Auxiliares $v_2 = 0,25v_1$	32
Figura 4.4 – Oscilação da Velocidade (pu) em Função do Fator H para Diversas Frequências Secundárias.	34
Figura 4.5 - Diagrama de Montagem (Dupla Frequência)	35
Figura 4.6 - Diagrama Alternativo de Montagem (Dupla Frequência).....	36
Figura 4.7 - Pontos de Medição de Vibração.....	38
Figura 4.8 - Espectro de Vibração Durante Ensaio em Dupla Frequência.....	39
Figura 5.1 - Bancada Protótipo para Ensaio de Dupla Frequência.....	42
Figura 5.2 - Tensão do Motor em Teste (V3) - 60/55Hz.....	43
Figura 5.3 - Corrente do Motor em Teste (A3) - 60/55Hz	44
Figura 5.4 - Tensão Sobre o Gerador Auxiliar (V2) - 60/55Hz.....	45
Figura 5.5 - Fluxo de Potência nos Grupos Geradores (P1-P2) - 60/55Hz	46
Figura 5.6 - Tensão do Motor em Teste (V3) - 60/40Hz.....	47
Figura 5.7 - Corrente do Motor em Teste (A3) - 60/40Hz	47
Figura 5.8 - Espectros de Vibração Senoidal (a) e Dupla Frequência 60/40Hz (b).....	48
Figura 6.1 - Bancada de Dupla Frequência Utilizando Motores de Corrente Contínua	50
Figura 6.2 - Diagrama Proposto para o Método da Dupla Frequência	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Comparação entre os métodos de ensaio (HGF 400 - 515,2kW - 690V - 6 Pólos - 60Hz)	24
Tabela 3.2 - Comparação entre os métodos de ensaio (MGF 355 - 478,4kW - 3,3kV - 4 Pólos - 50Hz)	26
Tabela 4.1 - Valores de ajuste das fontes durante ensaio em Dupla Freqüência.....	37
Tabela 4.2 - Vibração durante o ensaio em Dupla Freqüência.....	38

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Motivação do Trabalho

Para testar uma máquina de indução quanto à sua elevação de temperatura nominal, as perdas nominais devem estar sendo dissipadas na máquina, enquanto ela estiver funcionando com velocidade nominal. Para um ensaio acurado, os diversos componentes das perdas (perdas joule no rotor e estator, perdas mecânicas e perdas no ferro) devem ser quase os mesmos que ocorrem durante a operação normal à plena carga. Mantendo-se esta operação até que as condições se estabilizem, é possível determinar a elevação de temperatura da máquina em condições típicas de operação.

Em máquinas síncronas, isso pode ser feito aplicando-se tensão e frequência nominais aos terminais e fornecendo corrente de campo suficiente para provocar circulação de corrente nominal de linha. Sob estas condições não há carga no eixo e o fator de potência é nulo.

Tendo em vista que isso não é possível para um motor de indução, é necessário aplicar um conjugado de carga plena ao eixo. Para aplicar carga em uma máquina de potência relativamente grande, deve-se dispor de equipamento de ensaio igualmente grande ou de uma segunda máquina idêntica. Em muitos casos, uma carga de proporções suficientes não está disponível. Geralmente, em motores verticais com 2 pólos e de grande porte praticamente não se pode ensaiar aplicando-se uma carga ao eixo. A existência de métodos alternativos que permitam simular a condição de carga nominal e que respeitem as limitações dos laboratórios de ensaios disponíveis é, sem dúvida, muito interessante sob o aspecto de ensaio de máquinas de grande porte.

Uma máquina de indução conduz correntes de carga quando transmite força para o eixo ou quando transforma a energia armazenada em sua inércia girante. Quando a velocidade do rotor é menor que a velocidade síncrona, a máquina funciona como motor, e funciona como gerador quando a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona. Quando a velocidade do rotor oscila em torno da velocidade síncrona, a máquina funcionará alternativamente como motor e gerador. Neste caso, flui corrente adicional para aumentar e diminuir a velocidade do rotor, sem fornecer qualquer conjugado ao eixo. Do ponto de vista de perdas, a máquina funciona como se estivesse alimentando uma carga mecânica equivalente.

Foram concebidos diversos esquemas para criar esse tipo de operação. O mais utilizado é o de conectar duas fontes de tensão, de frequências distintas, em série, a uma máquina de indução, fazendo com que a velocidade síncrona da onda de tensão oscile em torno da velocidade do rotor. Este procedimento é conhecido como Método da Dupla Frequência.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho consiste em estudar o método de ensaio da Dupla Frequência, discutindo aspectos que auxiliem no entendimento, na realização de ensaios e no levantamento de aspectos importantes para a concepção de sistemas para aplicação do método da Dupla Frequência em ensaios de elevação de temperatura em máquinas de indução. Neste trabalho, o equacionamento analítico não foi desenvolvido, tendo em vista a sua complexidade, à operação de todo o sistema na região dinâmica (não opera em uma região estrita de regime permanente), e por envolver aspectos não lineares, de difícil modelagem, que dificultam uma abordagem analítica completa. Aliás, não foi encontrada na literatura uma abordagem analítica exaustiva. Uma formulação analítica de todo o sistema de ensaios do método de Dupla Frequência despenderia um esforço além do que se propôs realizar neste trabalho, necessitando também de ferramentas numéricas não usuais, desenvolvidas especialmente para este fim. Entretanto, utilizavam-se algumas conclusões analíticas simplificadas para o entendimento e aplicação do método, as quais foram realizadas por pesquisadores que se dedicaram ao estudo aprofundado desta metodologia de ensaio.

1.3 Objetivos Específicos

A seguir, enumeram-se os objetivos específicos deste trabalho:

- Û Apresentar os principais métodos utilizados pela indústria na avaliação térmica de máquinas de indução, isto é, métodos de ensaio de elevação de temperatura;
- Û Apresentar o método da Dupla Frequência, levantando-se aspectos necessários para a elaboração de ensaios;

- Û Desenvolver e implementar uma bancada protótipo destinada ao método de elevação de temperatura por Dupla Freqüência;
- Û Realizar experimentos e ensaios, comparando os resultados obtidos com outros métodos;
- Û Apresentar aspectos importantes de desempenho, de operação e de dificuldades encontradas na elaboração da bancada e nos ensaios realizados.

Na literatura, aspectos de elaboração e concepção de bancadas destinadas à aplicação deste método são pouco discutidos, principalmente no que se refere as dificuldades que o método possui intrinsecamente. Assim, neste trabalho, também se propõe medidas que atenuam as implicações eletromecânicas impostas pelo fato de existir operação em dupla freqüência.

1.4 Metodologia

Buscaram-se na literatura os fundamentos do método de ensaio. Ateve-se um cuidado especial na concepção, instrumentação, potências envolvidas e soluções utilizadas para implementação de uma bancada de ensaios.

Realizou-se um estudo dos métodos de elevação de temperatura em máquinas de indução mais utilizados, apresentando seus principais aspectos.

Procurou-se obter os principais elementos para conceber bancadas para implementações. A partir de experimentos realizados, apresentou-se e se discutiu as estratégias utilizadas.

Buscou-se avaliar os resultados de ensaio de elevação de temperatura através da comparação dos resultados obtidos entre os diversos métodos apresentados neste trabalho.

Por fim, procurou-se realizar uma análise criteriosa de utilização dos métodos de ensaio apresentados focando dificuldades, imprecisões, impossibilidades e exigências, a fim de apontar soluções e diretrizes que atenuem as desvantagens inerentes aos métodos.

1.5 Estrutura do Trabalho

O texto descrevendo a resolução do problema proposto neste trabalho, bem como a fundamentação teórica que embasa o mesmo, é organizado em seis capítulos, sendo o primeiro este capítulo introdutório.

No Capítulo 2 é apresentada a máquina de indução, o seu princípio de funcionamento, os tipos de perdas de energia e as suas características gerais.

No Capítulo 3 são apresentados diferentes métodos utilizados para determinação da elevação de temperatura em máquinas de indução, descrevendo de maneira rápida o procedimento, as vantagens e desvantagens associadas.

No Capítulo 4 é apresentado o Método da Dupla Frequência, descrevendo detalhadamente seu funcionamento.

Possíveis configurações para montagem de uma bancada protótipo, bem como os resultados obtidos serão apresentadas no Capítulo 5.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, ressaltando as contribuições do mesmo e sugerindo também caminhos possíveis a serem seguidos em trabalhos posteriores.

Finalmente, são apresentadas as referências utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 2 - A MÁQUINA DE INDUÇÃO

2.1 Introdução

A máquina elétrica mais utilizada na prática, sobretudo na indústria, é a *máquina de indução*, também chamado de *máquina assíncrona*. O seu largo emprego se justifica pela sua robustez (não existe partes que se desgastam facilmente, tais como comutador e escova), pelo seu baixo custo, pouca necessidade de manutenção e possibilidade de emprego em praticamente qualquer aplicação, incluindo ambientes hostis, ambientes explosivos, ambientes com poeiras, e aplicações navais, por exemplo.

2.2 Princípio de Funcionamento

Sempre que houver uma variação do fluxo sobre uma espira (ou um conjunto de espiras formando uma bobina) surge nesta uma tensão induzida, a qual é proporcional à taxa de variação do fluxo. Numa máquina de indução trifásica o fluxo tem uma distribuição espacial aproximadamente senoidal e é criado, inicialmente, pelo enrolamento do estator. Sobre o enrolamento do rotor existe assim um fluxo alternado produzindo neste, tensões induzidas, as quais por sua vez produzirão correntes induzidas sempre que o enrolamento do rotor se encontrar fechado. O campo magnético criado pelas correntes do rotor cria, por sua vez, outro campo magnético também senoidalmente distribuído que é atraído pelo campo do estator, à semelhança do que ocorre com os pólos de dois ímãs. A força de atração se traduz em um torque que atua sobre o eixo do rotor, fazendo-o girar.

O motor de indução trabalha em uma rotação mecânica um pouco inferior à rotação síncrona, para que haja uma variação de fluxo nas espiras do rotor, sendo que existe pouca variação da velocidade em função da carga mecânica acoplada ao eixo. A diferença entre a velocidade do motor e a velocidade síncrona é chamada de escorregamento, que em geral é expresso como um percentual da velocidade síncrona.

O nome *máquina assíncrona* resulta do fato de que a rotação mecânica difere da rotação síncrona, considerando-se que a máquina trabalhe em regime permanente. O torque da máquina assíncrona é zero na velocidade síncrona, uma vez que a tensão induzida é igualmente zero nesta condição particular; ela não pode assim funcionar na

velocidade síncrona, uma vez que o torque eletromagnético desenvolvido é zero. Na velocidade síncrona o fluxo concatenado com o rotor é constante (não varia), o que explica porque a tensão induzida e, conseqüentemente, a corrente e o torque possuem valor nulo.

Observa-se que na prática, quando a máquina opera a vazio, o escorregamento é muito baixo, fazendo com que as tensões induzidas no rotor sejam igualmente baixas. Assim, a corrente do rotor é reduzida, mantendo-se em um valor suficiente apenas para produzir o torque necessário a vazio, necessário para vencer as perdas rotacionais a vazio. O fator de potência é extremamente baixo e em atraso, pois a corrente que circula pelo motor é utilizada apenas para suprir as perdas no ferro, as perdas no cobre e para a criação do campo magnético necessário para que ocorra conversão eletromecânica de energia.

Quando uma carga mecânica é aplicada ao rotor, o mesmo tende a desacelerar, fazendo com que a velocidade diminua. O decréscimo na velocidade causa um aumento no escorregamento e da frequência rotórica, fazendo com que a tensão induzida aumente. Como conseqüência, ocorre um aumento da corrente induzida no rotor. Por sua vez a corrente do rotor tende a desmagnetizar a máquina. Como a tensão aplicada é constante, o fluxo resultante na máquina deve também permanecer (aproximadamente) constante. Assim, a corrente do estator terá de aumentar a fim de compensar o efeito da maior corrente do rotor. Portanto, um aumento da corrente do rotor reflete-se em um aumento da componente ativa da corrente do estator (componente em fase com a tensão e que produz potência). Desta forma a rede fornecerá mais potência para o estator, a qual será convertida em trabalho mecânico.

À plena carga o motor de indução sempre irá girar a um escorregamento que assegure o equilíbrio entre o torque eletromagnético desenvolvido pelo motor e o torque resistente da carga.

As máquinas assíncronas também podem trabalhar como gerador assíncrono (gerador indutivo). Para operar nesta condição, devem ser acionadas acima da velocidade síncrona e, além disso, deve-se prover uma forma de magnetizar seu núcleo ferromagnético. Na prática, isto é feito associando-se capacitores em paralelo aos terminais dos enrolamentos do estator da máquina, os quais fornecerão a energia reativa necessária para a magnetização. Geradores assíncronos também podem operar em paralelo com uma rede, sendo que a rede deverá fornecer a energia reativa necessária para a sua magnetização.

2.3 Principais Partes Construtivas da Máquina de indução

2.3.1 Estator

É formado de um núcleo de chapas magnéticas (também chamado de pacote), o qual possui ranhuras axiais para alojar o enrolamento do estator. O uso de chapas magnéticas é justificado pela redução de perdas e melhora do rendimento. O uso de ranhuras além de diminuir o entreferro efetivo e a corrente de magnetização, também é um meio bastante eficiente de transmissão do calor para o exterior. O estator também aloja as bobinas do enrolamento estatórico que pode ser tanto trifásico como monofásico. Entre as chapas e as bobinas do enrolamento existem elementos de isolamento, cuja função é evitar colocar a carcaça e o pacote de chapas sob tensão.

2.3.2 Rotor

É igualmente composto de um núcleo de chapas magnéticas, também dotadas de ranhuras axiais, onde o enrolamento do rotor é alojado. Os enrolamentos são de dois tipos:

- ü *Enrolamento em Curto-Circuito* (rotor em gaiola de esquilo, rotor em curto circuito), formado de barras de alumínio conectadas por anel em ambas as extremidades do pacote de chapas. Este enrolamento não é acessível, ou seja, não existe nenhum terminal externo a máquina para conexão. A gaiola é comumente formada por cobre ou alumínio, e não existe isolamento entre ela e o pacote de chapas. A forma das ranhuras do rotor influencia o desempenho do motor, especialmente a curva de torque.
- ü *Enrolamento de Bobinas* (rotor bobinado) feitas em geral de cobre. Trata-se de um enrolamento semelhante ao enrolamento do estator, em geral trifásico. Os seus terminais são conectados a anéis coletores e escovas, os quais podem ser acessados externamente. Este tipo de enrolamento é usado quando se deseja um controle das características de torque e de velocidade da máquina. É menos freqüente que o enrolamento em gaiola, uma vez que é mais caro e menos robusto. A escolha de um motor com rotor bobinado também pode ser requerida devida ao processo de partida do motor, uma vez que este tipo de motor pode fornecer um torque mais elevado na partida.

2.4 Princípios de Operação

Os seguintes princípios gerais de operação do motor de indução são apresentados devido a sua importância relacionada aos problemas de aplicação e serão úteis no entendimento dos capítulos a seguir. Geralmente, pode-se afirmar as seguintes características operacionais e/ou construtivas sobre o motor de indução:

- Û O conjugado do motor varia aproximadamente com o quadrado da tensão aplicada em seus terminais;
- Û A corrente do motor varia aproximadamente de maneira linear com a tensão aplicada em seus terminais;
- Û Baixa resistência rotórica resulta em alta rotação nominal em carga e conseqüentemente em alto rendimento (Perdas rotóricas são proporcionais ao escorregamento);
- Û Alta resistência rotórica fornece alto conjugado e baixa corrente na partida, mas resulta em baixo rendimento em carga;
- Û O escorregamento no conjugado máximo é proporcional a resistência rotórica;
- Û A amplitude da tensão rotórica e sua frequência são proporcionais ao escorregamento, assim, ambas são iguais a zero na rotação síncrona, mas atingem valor máximo na rotação zero;
- Û As perdas rotóricas são proporcionais ao escorregamento;
- Û O rotor bobinado, ou de anéis, é obviamente utilizado para variar a resistência do rotor, aumentando seu valor para uma partida rápida e com baixa corrente e a reduzindo ao máximo para uma boa operação em carga, em termos de temperatura e desempenho.

2.5 Perdas em Máquinas de Indução

A consideração das perdas em máquinas é importante basicamente por três razões: determinam o rendimento da máquina influenciando seu custo de funcionamento; são responsáveis pelo aquecimento da máquina, definindo, qual a máxima potência de saída que a mesma pode ter sem excessiva deterioração do seu isolamento; e as quedas de tensão ou componentes de corrente associadas às perdas precisam ser levadas em consideração em uma representação de máquinas.

O rendimento das máquinas assíncronas, semelhantes ao de transformadores ou qualquer dispositivo de transformação de energia, é dado pela razão entre potência de saída e potência de entrada.

As perdas em máquinas de indução são geralmente divididas nas componentes descritas a seguir:

2.5.1 Perdas Joule

As perdas Joule, ou perdas no cobre, naturalmente existem em todos os enrolamentos da máquina, sejam eles no estator ou rotor. Estas perdas dependem da resistência efetiva do enrolamento sob condições de fluxo e frequência de funcionamento.

Minimizar estas perdas implica em aumentar a seção de cobre dos bobinados, reduzindo a sua resistência, mas por outro lado, aumenta o custo final da máquina. Outra estratégia é diminuir a temperatura de operação utilizando circuitos de refrigeração mais eficientes, mas corre-se o risco de aumentar as perdas mecânicas do conjunto. Também se pode otimizar o projeto elétrico da máquina buscando um melhor rendimento e aumentando o fator de potência, de modo que as correntes nominais de funcionamento também diminuam.

2.5.2 Perdas Mecânicas

Perdas mecânicas consistem de atritos nas escovas de máquinas com rotor bobinado, de atrito nos mancais, e do torque utilizado no sistema de ventilação englobando a potência necessária para circular o ar através da máquina pelo sistema de ventilação.

Estas perdas podem ser minimizadas utilizando projetos mecânicos mais aprimorados, peças com melhor aerodinâmica, rotores mais leves que exigem menor esforço dos mancais e mancais com menor atrito.

2.5.3 Perdas no Ferro

As Perdas no Ferro, ou perdas originadas nas lâminas magnéticas, é um tema atual que está exigindo um esforço considerável de estudo. Basicamente, as perdas em uma única lâmina podem ser divididas em três partes (ver figura 2.1): perda por Histerese magnética, geradas pela magnetização através do deslocamento de paredes de domínios magnéticos; Correntes Induzidas, geradas pelas correntes que são induzidas nas lâminas pela variação de fluxo; e Anômalas, geradas por microcorrentes parasitas devido ao

deslocamento das paredes dos domínios magnéticos. Estas perdas são características de cada tipo de material e dependem da composição da chapa e de seu tratamento para se tornar um aço para fins elétricos.

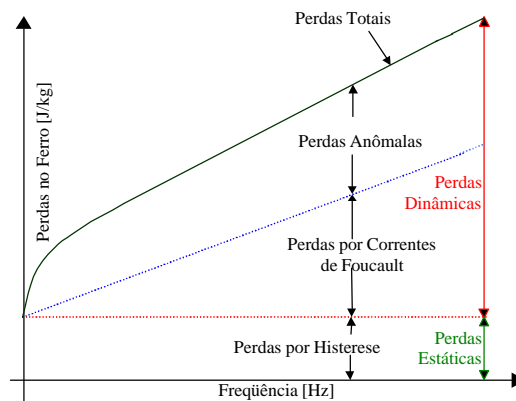


Figura 2.1 - Perdas em uma Única Lâmina

Perdas por histereses, correntes induzidas e anômalas são determinadas e conhecidas para uma única chapa submetida a uma determinada indução B . Quando se tem uma ou mais chapas próximas, como é o caso do pacote de chapas do estator e rotor de máquinas de indução, existe outro fenômeno a ser considerado, isto é, as perdas interlaminares.

O núcleo do estator é composto de várias chapas. Cada chapa possui uma isolamento na sua superfície para evitar que correntes parasitas circulem entre elas. A qualidade da isolamento da chapa é uma variável importante a ser considerada nas perdas. Outros pontos devem ser considerados como de grande influência nas Perdas no Ferro: controle das rebarbas, controle dos anéis de prensar, bom processo de estampagem, tratamento térmico e cuidados no trabalho com a chapa.

2.5.4 Perdas Suplementares ou Adicionais

As perdas suplementares ou adicionais são aquelas que aparecem da distribuição não-uniforme da corrente no cobre e das perdas adicionais no ferro produzidas por distorção do fluxo magnético devido à corrente de carga. São perdas difíceis de se determinar com precisão, sendo assim um campo de pesquisa ainda a ser explorado, tanto no que se refere aos fenômenos associados que as provocam quanto em metodologias de medição das mesmas.

2.6 Características Nominais e Aquecimento

Uma das mais comuns e importantes questões na aplicação de máquinas, transformadores, e outros equipamentos elétricos é “Qual a máxima potência de saída que pode ser obtida?”. A resposta, naturalmente, depende de vários fatores, pois a máquina, ao fornecer potência, precisa em geral satisfazer padrões de desempenho definidos. Uma exigência universal é que a vida útil da máquina não deverá ser indevidamente encurtada por sobreaquecimento. A elevação de temperatura resultante das perdas é, portanto, um fator importante na especificação de uma máquina.

A temperatura de funcionamento de uma máquina está intimamente associada a uma vida esperada, pois a deterioração da isolação é uma função do tempo e da temperatura. Tal deterioração é um fenômeno químico envolvendo uma oxidação lenta e um endurecimento, levando a perda de durabilidade mecânica e da rigidez dielétrica. Uma temperatura além daquela de projeto, pode acelerar o processo de deterioração.

De maneira geral a temperatura máxima de funcionamento, ou classe de temperatura de uma máquina elétrica, vai depender exclusivamente das características físico químicas dos materiais que a constituem. Para os materiais isolantes comumente encontrados existem valores tabelados de temperatura suportável. Estas tabelas estão presentes na maioria das normas regulamentadoras internacionais (IEC, NEMA, ANSI, NBR etc,...).

Nestas normas, são feitas distinções razoavelmente detalhadas em relação ao tipo de máquina, ao método de medição de temperatura, à parte da máquina envolvida e ao tipo de resfriamento. Também são feitas classificações entre máquinas de aplicação geral e máquinas para aplicações especiais.

Uma vez definida a classe de temperatura da máquina é possível determinar quais serão suas características nominais de operação. A especificação mais comum é a potência nominal, normalmente expressa em kW. A frequência, a tensão, os limites de variação destas grandezas, bem como a possibilidade de operação com sobrecargas periódicas, são detalhes importantes na especificação nominal de uma máquina elétrica.

Outra condição de operação que vem exigindo cada vez mais das máquinas de indução é a utilização de inversores de frequência para a alimentação. Esta realidade presente no meio industrial vem crescendo com a evolução tecnológica e conseqüente redução de custos deste tipo de acionamento. Sua utilização vem crescendo e substituindo os tradicionais motores de corrente contínua, mesmo em aplicações de alta

potência e/ou que exigem controles de precisão. Os inversores, por seu princípio de funcionamento, permitem a máquina de indução trabalhar em regimes de frequência, tensão e torques variados, dificultando ainda mais sua especificação ou determinação das características nominal, gerando inclusive uma deterioração acelerada dos materiais isolantes.

Neste capítulo, a máquina de indução foi apresentada em linhas gerais, contendo os princípios básicos de funcionamento, das perdas geradas internamente e de assuntos importante para compreensão deste trabalho.

CAPÍTULO 3 - ENSAIOS DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM MÁQUINAS DE INDUÇÃO

3.1 Introdução

Testar máquinas de indução para determinar sua elevação de temperatura é um interesse comum de clientes e fabricantes. Sua importância é devida ao fato da temperatura afetar diretamente os materiais isolantes, os sistemas de refrigeração e até a eficiência da máquina.

Existem muitos métodos estabelecidos para determinar a elevação de temperatura à plena carga em máquinas de indução. Dentre os mais aceitos, destaca-se:

- Ü Carga Direta;
- Ü Método Gráfico;
- Ü *Back-to-Back*;
- Ü *Forward Short Circuit*;
- Ü Dupla Frequência.

Estes métodos estão previstos em normas nacionais e internacionais e podem ser utilizados sem restrição. A escolha do método é realizada, principalmente, pelas características dos equipamentos que constituem o laboratório de ensaios, limitações mecânicas da máquina em teste ou até por razões de acordo entre cliente e fornecedor.

Respeitando a necessidade de cada procedimento, alguns dos fatores pertinentes à escolha da metodologia de ensaio são: necessidade ou não de acoplamento da máquina sob teste, disponibilidade de torque, potência e frequência da fonte de alimentação.

3.2 Ensaio de Elevação de Temperatura

O ensaio de elevação de temperatura consiste em operar a máquina em teste em uma condição pré-determinada de tensão, frequência e torque até atingir a estabilização térmica. Entende-se por estabilização térmica uma variação da elevação de temperatura da máquina inferior a 1°C em um período de 30 minutos. Ensaios de elevação de temperatura costumam durar de 3 a 6 horas, dependendo exclusivamente das características construtivas da máquina em teste.

Existem basicamente duas maneiras de se medir a elevação de temperatura em máquinas elétricas: utilizando detectores de temperaturas instalados na máquina ou pelo método da variação da resistência.

Máquinas de médio e grande porte costumam ter instalado nos locais considerados termicamente críticos de seu bobinado, detectores de temperatura. Os sensores mais utilizados são os termoresistores (tipo Pt100 e Pt1000) e os termopares (tipo J, K e T). Este método tem como característica determinar a elevação de temperatura em apenas um ponto do bobinado, ou seja, onde o detector está instalado.

O método da variação da resistência consiste em determinar a elevação de temperatura da máquina utilizando a variação da resistência do bobinado no início e no final do ensaio de elevação de temperatura e fornece, por este motivo, uma temperatura média do estator.

Na prática, durante os ensaios, o que de fato acontece é que em máquinas que possuem os detectores de temperatura instalados, e as condições do ensaio permitem, os dois métodos de avaliação de elevação de temperatura são utilizados.

A figura 3.1 mostra a evolução de um ensaio de elevação de temperatura em um motor MGF 355. Neste caso se estava realizando uma elevação de temperatura com tensão nominal e 70% da corrente de carga, um dos ensaios necessários para cálculo da temperatura a plena carga utilizando o método gráfico, que será apresentado a seguir. No gráfico da figura 3.1 é possível acompanhar a estabilização térmica dos Pt100 instalados nos bobinados e mancais, e verificar a tensão e a corrente ajustados no decorrer do ensaio.

Os valores térmicos apresentados na figura 3.1 dizem respeito à elevação de temperatura, ou seja, o valor absoluto da temperatura em um determinado ponto menos a temperatura ambiente naquele instante. Convenciona-se utilizar a unidade Kelvin para este resultado. Este artifício é usado para que, uma vez determinada a elevação de

temperatura de uma máquina elétrica, é possível determinar qual será sua temperatura absoluta de funcionamento apenas avaliando a temperatura ambiente do local onde será instalada.

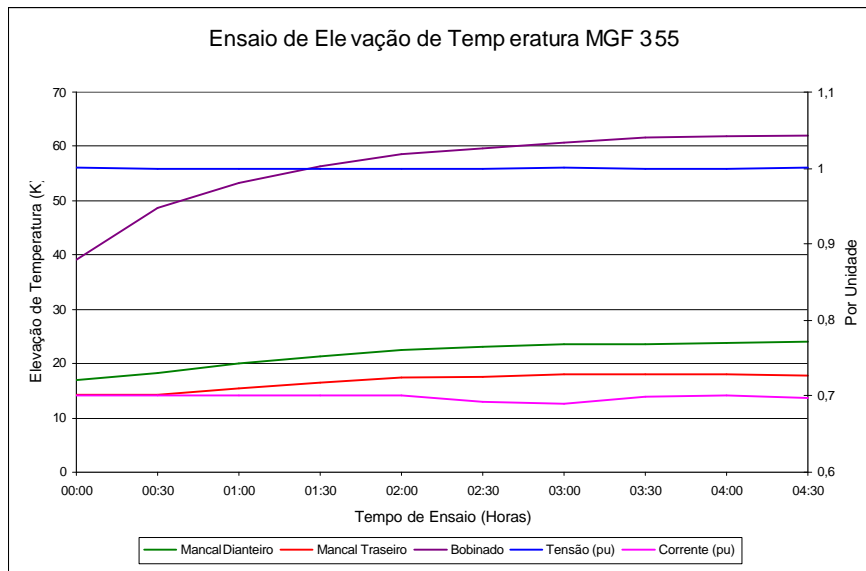


Figura 3.1 - Ensaio de Elevação de Temperatura MGF 355

Conforme será apresentado nos tópicos a seguir, alguns métodos alternativos requerem mais de um ensaio de elevação de temperatura em condições diferentes da nominal para determinar, a partir de cálculos, a elevação de temperatura a plena carga.

3.3 Método Carga Direta

O método Carga Direta é certamente o mais acurado[6] método para determinação da elevação de temperatura para máquinas de indução. Consiste em aplicar torque nominal diretamente à ponta de eixo, alimentando-se o motor com tensão e frequência nominais. Este teste é capaz de reproduzir com elevada precisão as condições de operação no campo. Contudo, necessita que todo o equipamento utilizado na realização do ensaio tenha capacidade nominal igual ou maior que a do motor em teste.

Laboratórios de Ensaio capazes de realizar esta metodologia de teste normalmente trabalham com sistemas de recuperação de energia conforme mostrado na figura 3.2. A energia gerada pelo dinamômetro, que serve de carga para o motor de indução em teste, realimenta as máquinas do sistema de teste conforme mostrado nas

figuras 3.2 e 3.3. Somente as perdas são supridas pelo sistema externo de alimentação e costumam representar em torno de 20% da potência nominal da máquina em teste.

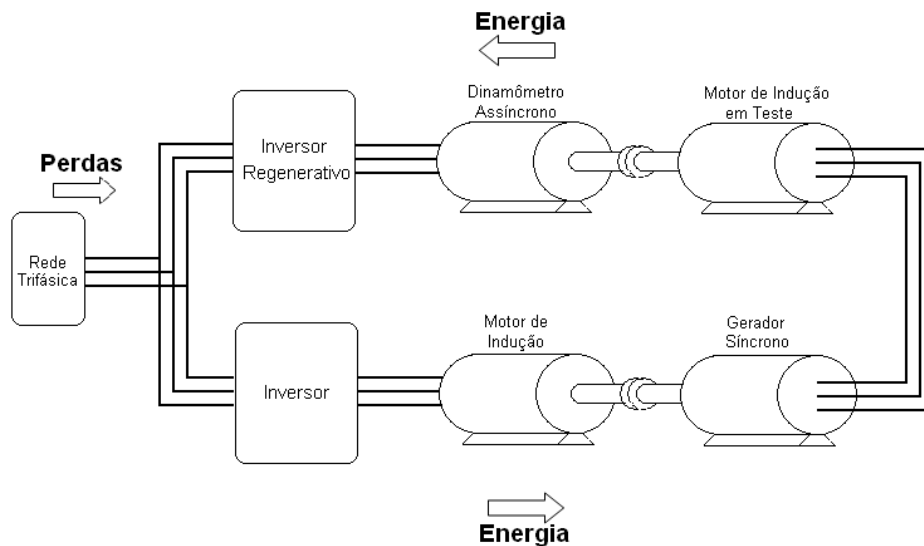


Figura 3.2 - Sistema de Recuperação de Energia até 2MW

Laboratórios com capacidade até 2MW podem ser montados utilizando-se dinamômetros assíncronos com inversores de frequência regenerativos conforme figura 3.2. Acima dos 2MW, o custo dos inversores torna proibitiva sua utilização e são normalmente utilizados sistemas de recuperação com máquinas de corrente contínua conforme mostra a figura 3.3.

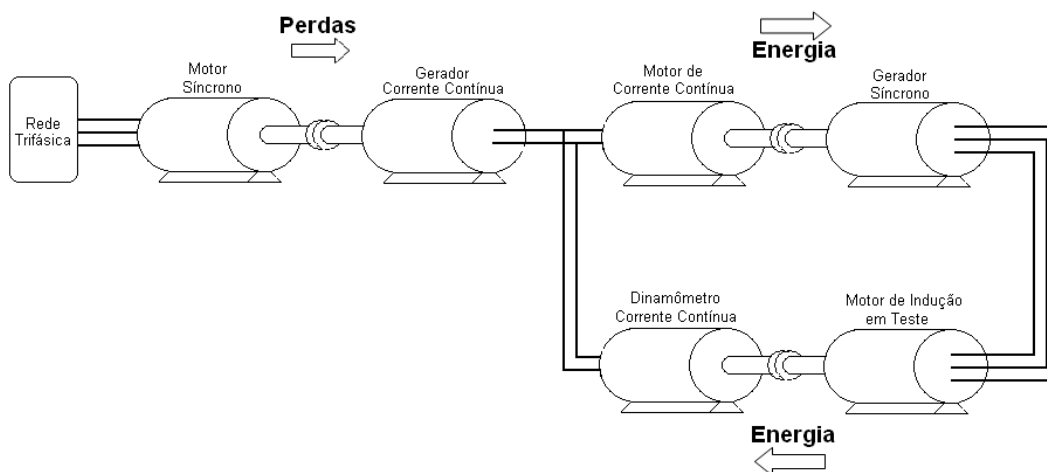


Figura 3.3 - Sistema de Recuperação de Energia para Potências Maiores que 2MW.

3.4 Método *Back to Back*

O método *Back-to-Back* é um caso particular de realização do método com carga Direta e também é capaz de simular com precisão o funcionamento de um motor de indução à plena carga. Exige-se a disponibilidade de duas máquinas de indução para a realização do teste, o qual consiste em acoplar mecanicamente dois motores de indução com características semelhantes, podendo ser realizado de duas maneiras. A primeira, com um custo bastante elevado, necessita de duas fontes de alimentação independentes, com potências nominais iguais ou superiores ao da máquina sob teste, uma para cada motor de indução, onde a frequência de cada máquina acoplada é regulada para que uma opere como motor e outra como gerador (vide figura 3.4).

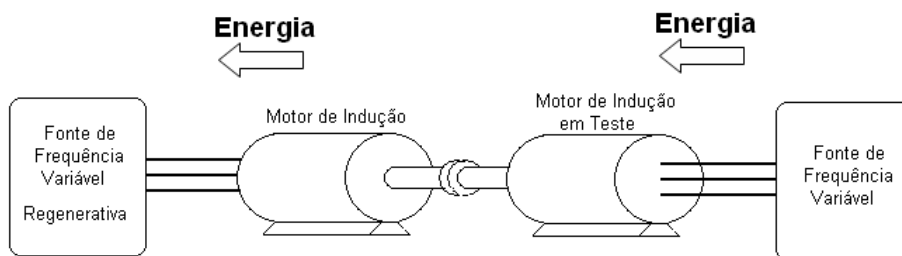


Figura 3.4 - Sistema *Back-to-Back* com Duas Fontes de Alimentação

A segunda opção, agora utilizando um redutor de relação variável (*epicycle gearbox*), pode ser utilizada, permitindo que as duas máquinas de indução sejam alimentadas pela mesma fonte, conforme mostra a figura 3.5. O *epicycle gearbox* possui uma relação de rotação entre os eixos de acoplamento ligeiramente maior que um, e que pode ser ajustada para que a máquina de indução em teste opere em sua condição nominal de escorregamento, impondo à outra máquina de indução a operação como gerador, acima da velocidade síncrona.

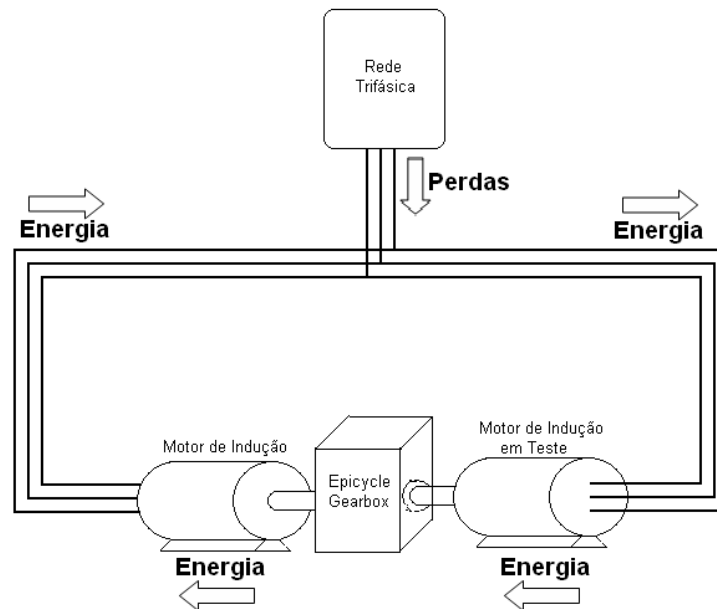


Figura 3.5 - Sistema *Back-to-Back* com *Epicycle Gearbox*

Esta opção é a que apresenta a configuração mais econômica, pois, salvo o investimento no redutor de acoplamento, a fonte de alimentação só precisa ter a potência necessária para suprir o total das perdas das duas máquinas acopladas somadas às perdas do redutor.

No caso de se utilizar máquinas idênticas para o ensaio, é importante uma análise do sistema de ventilação ou refrigeração das máquinas, pois uma delas poderá operar com o sentido de rotação invertido ao que foi especificada.

3.5 Método Gráfico

O método Gráfico é utilizado quando o dinamômetro ou a fonte de alimentação disponível para o ensaio não tem capacidade de aplicar carga nominal à máquina em teste. É necessária a realização de ensaios de temperatura em vazio e em carga para o cálculo da elevação de temperatura nominal da máquina. Inicialmente é realizado um ensaio de elevação de temperatura com o motor em teste acoplado a um dinamômetro, objetivando operá-lo com no mínimo 70% da corrente nominal, e com tensão nominal. Caso o torque disponível no dinamômetro não seja suficiente, a tensão deve ser reduzida, mantendo-se o torque disponível do dinamômetro, buscando agora satisfazer a

condição de 100% da corrente. Lembrando que para um mesmo torque, tensão e corrente em uma máquina de indução são inversamente proporcionais.

Caso a condição de corrente mínima tenha sido satisfeita com tensão nominal, apenas um ensaio de elevação de temperatura em vazio com tensão nominal é necessário, senão, também um teste de elevação de temperatura em vazio com a tensão reduzida utilizada no ensaio em carga deve ser realizado.

O cálculo final da elevação de temperatura é determinado assumindo que a elevação de temperatura é diretamente proporcional ao quadrado da corrente de ensaio e que, uma vez determinado seu ângulo de crescimento, este não varia com a tensão, ou seja, uma vez determinada a reta que representa o comportamento da temperatura em função da corrente ao quadrado para um determinada condição de tensão, outras retas de mesma inclinação podem ser traçadas sobre pontos de ensaio de elevação de temperatura em vazio com a tensão desejada. A melhor maneira de visualizar este raciocínio é utilizando um gráfico, daí o nome do método.

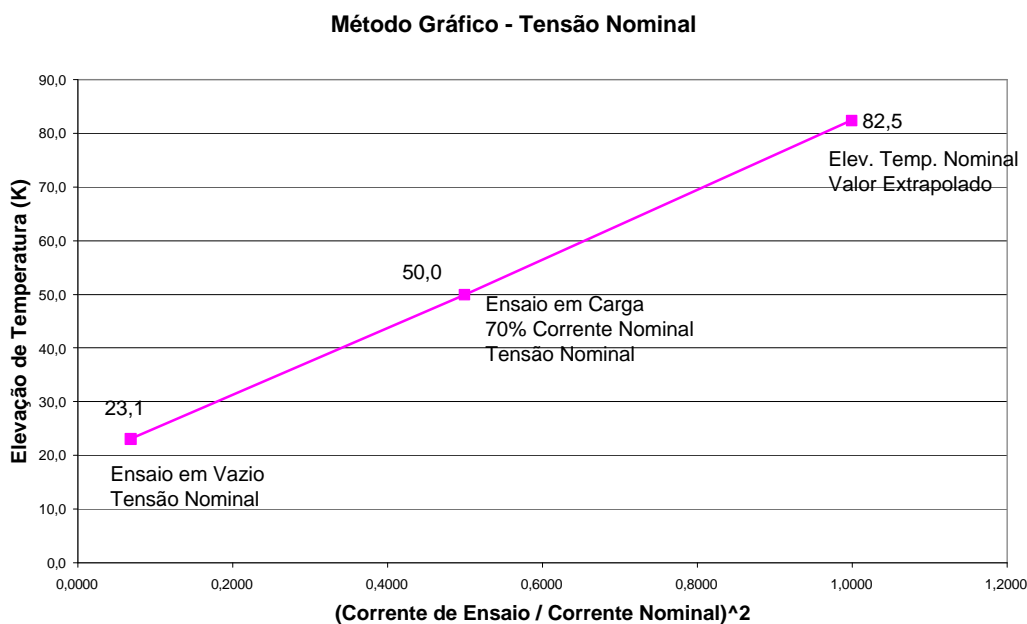


Figura 3.6 - Método Gráfico - Tensão Nominal

Um exemplo de aplicação com método gráfico utilizando apenas a tensão nominal é mostrado na figura 3.6. Inicialmente foi realizado um ensaio de elevação de temperatura em vazio com tensão nominal, encontrou-se uma elevação de temperatura de 23,1K e este valor foi registrado no gráfico respeitando o valor da corrente em vazio encontrada durante o ensaio. Um novo ensaio de elevação de temperatura, desta vez em

carga, com tensão nominal e 70% da corrente nominal foi realizado. Este ensaio apresentou uma elevação de temperatura de 50,0K e o valor, também respeitando a corrente medida durante o ensaio, foi registrado no gráfico. O valor extrapolado da elevação de temperatura para 100% da corrente nominal é obtido prolongando-se a reta criada a partir dos pontos ensaiados em vazio e com 70% da corrente.

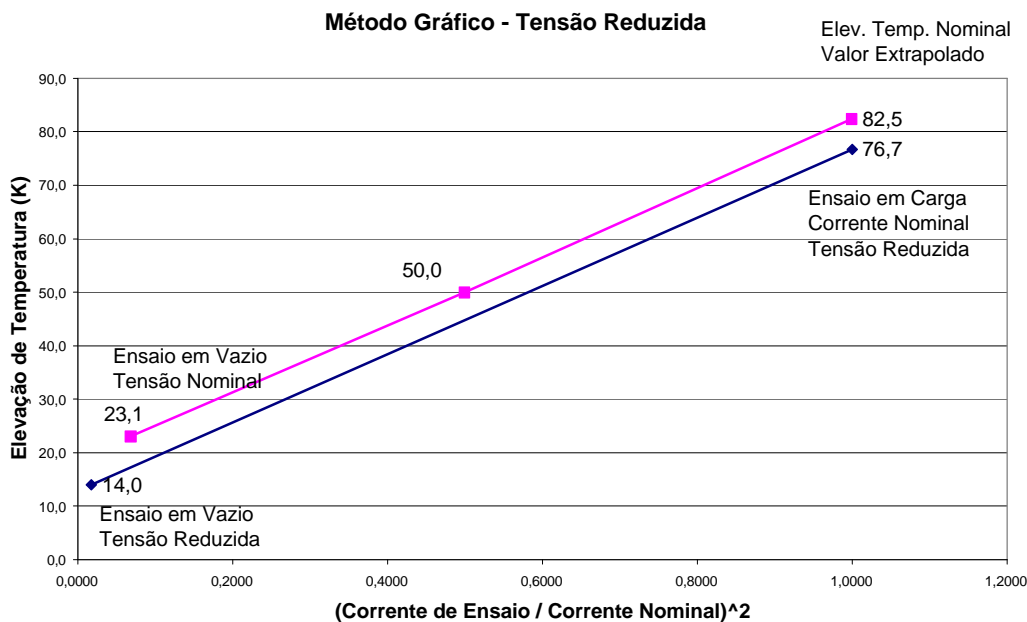


Figura 3.7 - Método Gráfico - Tensão Reduzida

Outro exemplo de aplicação, agora com tensão reduzida, é mostrado na figura 3.7. Aqui foram realizados três ensaios de temperatura, dois em vazio e um em carga. O ensaio em carga foi realizado utilizando a máxima carga do dinamômetro e a tensão foi sendo gradativamente reduzida até obter-se corrente nominal nos terminais da máquina em teste. Um ensaio de elevação de temperatura nesta condição foi realizado e o resultado encontrado, 76,7K, foi registrado no gráfico. Foi realizado um ensaio de elevação de temperatura em vazio, com a mesma tensão do ensaio anterior em carga, e o resultado encontrado foi de 14,0K. Estes dois ensaios de elevação de temperatura nos fornecem uma reta com uma determinada inclinação. De acordo com o método, esta inclinação não depende da tensão e é característica da máquina em teste. Um terceiro ensaio de elevação de temperatura foi realizado, agora em vazio, com a tensão nominal e o resultado obtido foi de 23,1K. O valor extrapolado da elevação de temperatura para 100% da corrente nominal é obtido traçando uma reta sobre o ponto do ensaio em vazio

com tensão nominal e respeitando a inclinação da reta encontrada durante os ensaios em carga e em vazio com tensão reduzida.

O cuidado que deve ser tomado na realização deste teste é que, se a disponibilidade de torque for muito pequena em relação à máquina em teste, é necessário reduzir consideravelmente a tensão do teste buscando satisfazer a condição de 100% da corrente nominal, podendo colocar a máquina em teste em uma condição de conjugado máximo, inviabilizando o ensaio.

3.6 Método *Forward Short Circuit*

O método *Forward Short Circuit*, assim como os descritos anteriormente, requer o acoplamento mecânico da máquina em teste a uma segunda máquina. A diferença deste método para os demais se dá no fato que o torque necessário na realização do teste é bem inferior ao nominal do conjunto. O ensaio é realizado utilizando uma máquina para acionar o motor sob teste, acoplada ao mesmo com o objetivo de mantê-lo em sua rotação nominal. O motor em teste é alimentado com tensão e frequência diferentes dos valores nominais, normalmente inferiores, ajustados para obter corrente de plena carga em seu estator, respeitando a disponibilidade de torque do motor de acionamento.

O motor opera com um escorregamento bastante alto e, quanto menor for a disponibilidade de potência do laboratório, maior será o escorregamento necessário para obtenção da corrente de plena carga nos terminais da máquina. Nas curvas de torque e corrente em função da rotação, como mostra a figura 3.8, verifica-se que quanto mais longe de sua rotação síncrona a máquina em teste opera menor é o torque necessário para obtenção de uma mesma corrente. A máquina em teste funciona como gerador quando a frequência de alimentação é inferior à nominal da máquina, ou como motor quando a frequência de alimentação é maior que a nominal. Esta informação é muito importante, pois pelo menos uma das fontes utilizadas para alimentar as máquinas durante o teste deve ser regenerativa.

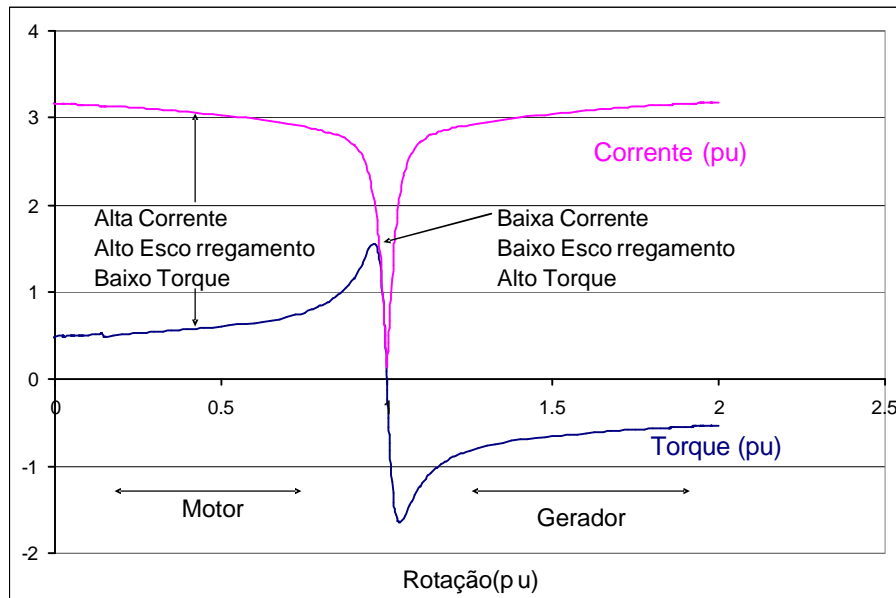


Figura 3.8 - Curva de Torque e Corrente por Rotação

Para um resultado mais acurado é possível realizar adicionalmente dois ensaios de elevação de temperatura em vazio, um com tensão e frequências nominais e outro com frequência nominal e a tensão usada durante o ensaio acoplado. A diferença de temperatura encontrada entre estes dois testes deverá ser somada à temperatura do ensaio em carga. A utilização deste procedimento tem o objetivo de corrigir as perdas no ferro que não são nominais durante o ensaio de temperatura acoplado, mas acaba por desconsiderar o efeito das perdas joule, também presentes durante os ensaios em vazio. Talvez fosse uma boa solução na correção das perdas no ferro, uma mistura entre os métodos *Forward Short Circuit* e Gráfico. O que se percebe, na prática, é que o aumento de temperatura causado pelo escorregamento elevado no rotor durante o ensaio em carga praticamente compensa o fato de a tensão de alimentação não ser a nominal, isto é, compensa as perdas no ferro.

Podemos também dizer que o método Carga Direta é um caso particular do *Forward Short Circuit*, onde se tem disponível torque pleno, e alimenta-se o motor em teste com tensão e frequência nominais.

3.7 Método Dupla Frequência

Este método é realizado sem necessidade de acoplamento mecânico e requer a aplicação simultânea de duas frequências distintas nos terminais do estator da máquina a ser testada.

Mesmo não havendo nenhuma carga externa acoplada ao eixo do motor, a simultânea aplicação de duas frequências pode simular uma condição de carga, buscando realizar um ensaio de elevação de temperatura.

Esta metodologia de teste será apresentada de maneira mais específica no capítulo 4.

3.8 Comparação Entre Ensaio e Discussão de Resultados

Buscando avaliar a qualidade dos métodos alternativos de ensaios de elevação de temperatura foram usadas duas máquinas de indução com características bastante distintas.

A primeira máquina utilizada foi um motor de indução WEG da linha H, fechado, com rotor de gaiola, carcaça aletada e baixa tensão, como mostra a figura 3.9.

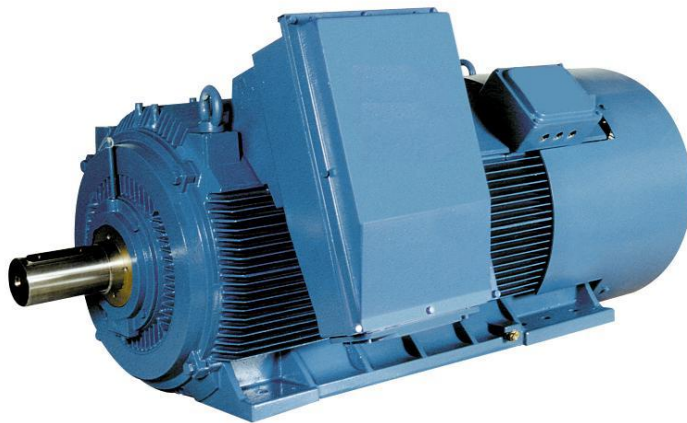


Figura 3.9 - HGF 400 - 515,2kW - 690V - 6 Pólos - 60Hz

A segunda máquina utilizada na comparação foi um motor de indução WEG da linha M, fechado, com rotor de gaiola, trocador de calor e média tensão, conforme mostra a figura 3.10.

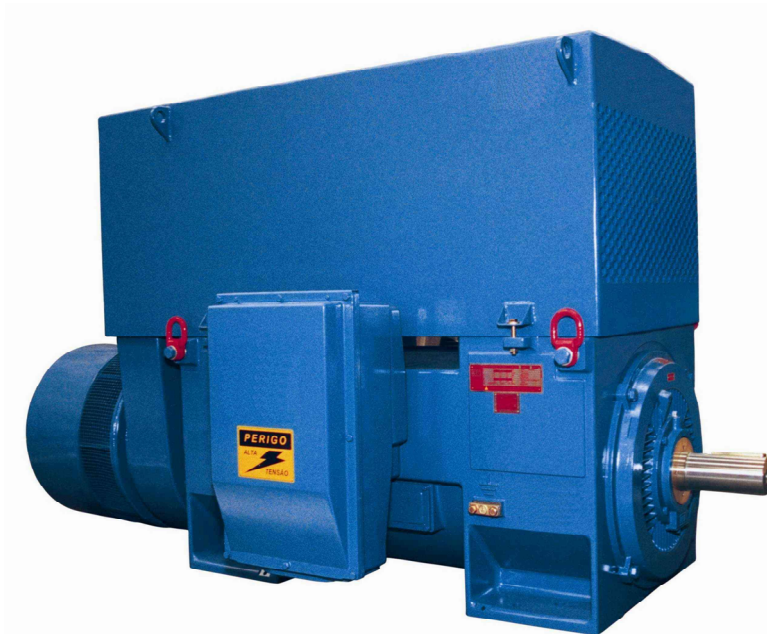


Figura 3.10 - MGF 355 - 478,4kW - 3,3kV - 4 Pólos - 50Hz

Inicialmente foi realizado o ensaio com carga direta nominal onde, além de coletadas as temperaturas, foi determinada a corrente nominal do estator de cada uma das máquinas, parâmetro que foi usado como referência nos ensaios seguintes.

Tabela 3.1– Comparação entre os métodos de ensaio (HGF 400 - 515,2kW - 690V - 6 Pólos - 60Hz)

Método	Valores do Ensaio em Carga			Freq. (Hz)	Elevação Temp. Pt100 (K)	Elevação Temp. Resist. (K)
	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (kW)			
Carga Direta	690	521,0	530,0	60	67,0	65,0
Gráfico (1)	690	364,7	386,5	60	67,5	66,1
Gráfico (2)	345	521,0	253,5	60	68,9	67,0
Forward Short Circuit (1)	135	521,0	25,4	50	65,9	64,8
Forward Short Circuit (2)	193	521,0	73,7	65	64,4	62,9
Dupla Frequência (1)	690	521,0	-	60/55	66,0	65,0
Dupla Frequência (2)	690	521,0	-	60/50	68,0	66,5

As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os resultados dos ensaios realizados nos motores HGF e MGF respectivamente, mostrando que todos os testes alternativos apresentaram resultados de elevação de temperatura bastante próximos ao método com carga direta, que foi usado como referência. É possível verificar nestas tabelas que algumas metodologias de ensaio foram realizadas com diferentes ajustes e foram criados índices,

(1) e (2), destacando estas diferenças. Estes mesmos índices foram utilizados nas figuras 3.11 e 3.12 na apresentação dos resultados de temperatura.

As figuras 3.11 e 3.12 comparam de maneira gráfica os resultados de elevação de temperatura nos Pt100 utilizando os métodos de ensaio apresentados. O que vale a pena salientar é que existem diferenças entre um mesmo método de ensaio, apenas modificando a maneira como foi ensaiado (ajuste de tensão, freqüência, corrente e torque). Outra constatação é que as diferenças construtivas entre as duas máquinas utilizadas na comparação levaram a um diferente comportamento da temperatura entre os métodos ensaiados.

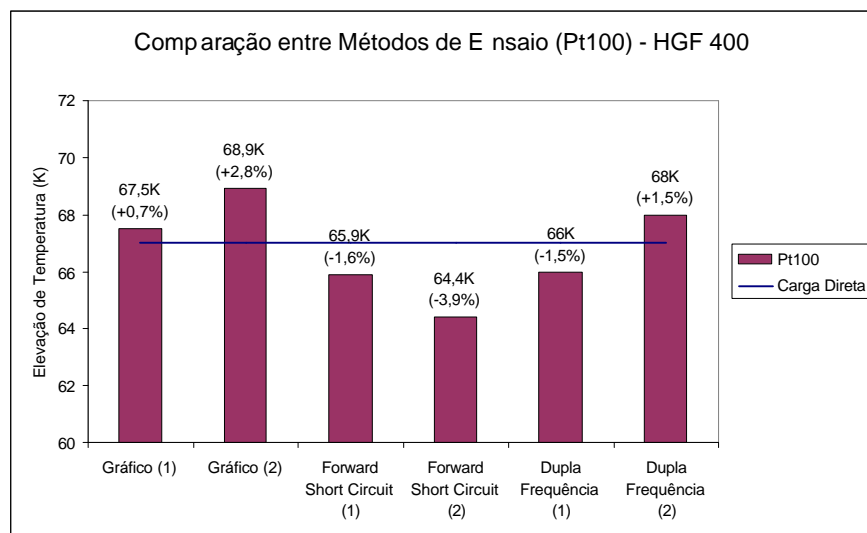


Figura 3.11 - Comparação entre Métodos de Elevação de Temperatura – HGF 400

O método gráfico foi realizado em duas condições, a primeira utilizando tensão nominal e 50% da corrente e a segunda de maneira inversa, com 50% da tensão e corrente nominal.

O método *Forward Short Circuit* foi realizado em duas condições, com valores de escorregamento/freqüências diferentes.

O método dupla freqüência foi realizado utilizando dois valores da freqüência na fonte auxiliar, com 10 e 20% de diferença em relação à principal.

Tabela 3.2 - Comparação entre os métodos de ensaio (MGF 355 - 478,4kW - 3,3kV - 4 Pólos - 50Hz)

Método	Valores do Ensaio em Carga			Freq. (Hz)	Elevação Temp. Pt100 (K)	Elevação Temp. Resist. (K)
	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (kW)			
Carga Direta	3300	100,0	510,0	50	95,3	91,0
Gráfico (1)	3300	70,0	335,0	50	93,9	88,0
Gráfico (2)	1650	100,0	258,0	50	92,1	87,1
Forward Short Circuit (1)	850	100,0	24,2	40	93,5	90,8
Forward Short Circuit (2)	1000	100,0	70,4	55	92,0	89,6
Dupla Frequência (1)	3300	100,0	-	50/45	100,6	89,6
Dupla Frequência (2)	3300	100,0	-	50/40	101,7	90,0

No que diz respeito à avaliação térmica das máquinas de indução todos os métodos apresentaram resultados bastante coerentes, obtendo-se valores próximos, e podem ser utilizados com segurança.

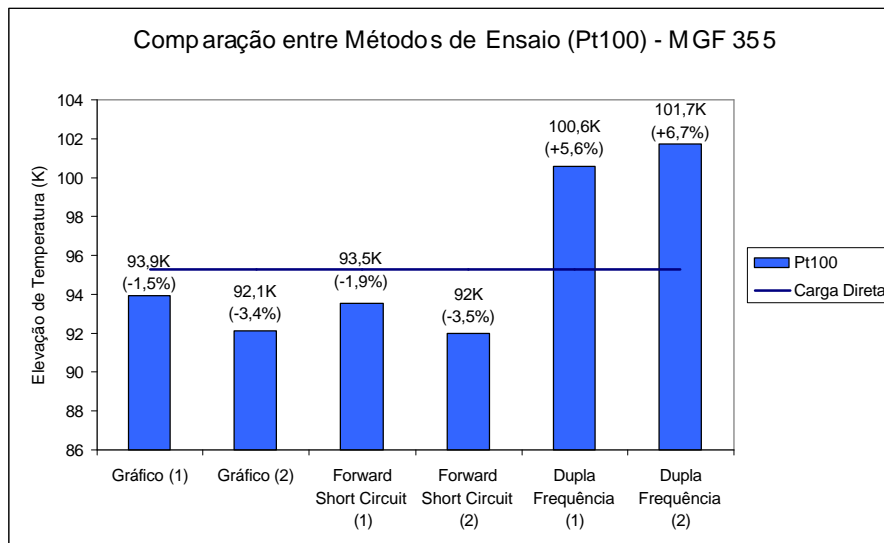


Figura 3.12 - Compara o entre Métodos de Eleva o de Temperatura – MGF 355

Do ponto de vista da potência necessária para realiza o do teste, o método *Forward Short Circuit*   o mais indicado.   possível avaliar termicamente uma máquina de indu o com 5% de sua potência ativa nominal. Este método foi realizado em duas condi es de escorregamento distintas. Na tabela 3.2 verifica-se que foi possível

realizar o método *Forward Short Circuit* exigindo da fonte 24,2kW ou 70,4kW de potência ativa, apenas alterando a frequência da fonte de alimentação.

Como exemplo, testou-se nos laboratórios da WEG Energia uma máquina de indução de 27MW, utilizando somente 1MW de potência ativa na realização do ensaio.

Se a maior dificuldade para realização de um teste estiver em acoplar a máquina ou suportar sua velocidade nominal, sem dúvida o método mais indicado é o método da dupla frequência, sem falar no ganho de produtividade que se pode ter no laboratório com o fato de não haver necessidade de acoplar a máquina em teste.

O método Gráfico apresentou bons resultados e é recomendado para laboratórios que possuem pelo menos 50% da capacidade de carga nominal da máquina instalada. Sua vantagem é de não submeter a máquina a um escorregamento elevado e poupar o rotor de um valor excessivo de perdas joule. Apresenta a desvantagem de necessitar de mais de um ensaio de elevação de temperatura para determinar a elevação de temperatura nominal, exigindo mais tempo na execução do método

O raciocínio que se pode seguir na escolha do método a ser utilizado é o seguinte: se o laboratório de testes possui capacidade instalada maior ou igual ao do motor em teste pode ser utilizado o método Carga Direta ou *Back-to-Back*, dependendo somente do tipo de equipamentos disponível (dinamômetro, *epicycle gearbox*, etc...); se a capacidade do laboratório é inferior à da máquina em teste, mas suficiente para obter 70% da corrente do motor em teste sem que este entre em uma condição de conjugado máximo, o método Gráfico é uma opção adequada; o método *Forward Short Circuit* é uma opção quando o torque disponível para realização do teste é muito menor que o da máquina em teste, mas algumas perdas adicionais podem ser embutidas à máquina, principalmente no rotor devido ao alto escorregamento a que é submetido; quando a maior dificuldade na realização do teste é o de acoplar a máquina ou se está buscando um tempo menor de preparação e realização do teste, o método Dupla Frequência é o mais indicado.

Outra observação que deve ser feita é que os métodos Carga Direta, *Back-to-Back*, Gráfico e *Forward Short Circuit* são similares em sua metodologia e um laboratório de ensaio corretamente especificado será capaz de realizar qualquer um deles. Por outro lado, o método da Dupla Frequência requer equipamentos com algumas características especiais nas máquinas que constituem o laboratório. Definir quais as metodologias de teste se pretende realizar é determinante na correta especificação de um laboratório de ensaios.

CAPÍTULO 4 - O MÉTODO DA DUPLA FREQUÊNCIA

4.1 Introdução

O Método da Dupla Frequência foi proposto por Ytterberg em 1921 e vem sendo usado por muitos fabricantes desde então. Surgiu como uma opção para avaliação de motores verticais, ou de difícil acoplamento mecânico, e como uma alternativa de menor custo para ensaios de motor de grande porte. Pode ser aplicado em motores com rotor de gaiola ou bobinado (de anéis).

É comumente chamado de Método da Dupla Frequência [14] (*Two-Frequency*) [4], mas é citado também como Carga Equivalente (*Equivalent Load*) [2][9][12] ou somente em publicações em inglês como *Mixed Frequency* [6][7][11] e *Dual Frequency* [1][13].

4.2 Princípio de Funcionamento

Considere um motor de indução em teste funcionando em vazio com tensão, frequência e rotação com valores nominais. Se a fonte de alimentação deste motor aumentar a frequência gerada, o motor aumentará a sua velocidade e, após este tempo de aceleração, continuará funcionando em vazio, mas agora com uma velocidade maior. Durante o período de aceleração, o motor consumirá potência da fonte de alimentação em quantidade suficiente para acelerar a massa do rotor, aumentando conseqüentemente sua corrente. A variação de frequência da fonte deve ser adequadamente rápida o suficiente para drenar a corrente nominal no estator deste motor durante o período de aceleração. Se subseqüentemente a frequência da fonte de alimentação for alterada, mas desta vez reduzindo seu valor, a velocidade do motor será reduzida e o rotor devolverá a energia de rotação para a fonte de alimentação durante o período de desaceleração, agora funcionando, neste período, como um gerador de indução.

Se houver continuidade na alteração da frequência da fonte de alimentação da baixa para alta rotação e novamente para baixa de maneira sucessiva e adequada, a máquina irá operar em vazio, com tensão e corrente nominais, alternando sua operação entre motor e gerador. É possível obter esta condição de funcionamento aplicando-se simultaneamente duas frequências no motor a ser testado. Uma fonte principal com tensão e frequência nominais e uma segunda fonte (auxiliar) com frequência e tensão

diferentes da principal (geralmente menores) conectada em série com a fonte principal. Uma combinação de 60Hz para fonte principal e 50Hz para a auxiliar oferece um bom exemplo [1][2][9][14].

Mesmo não havendo nenhuma carga externa acoplada ao eixo do motor, a aplicação simultânea de duas frequências pode simular uma condição de carga buscando realizar um ensaio de elevação de temperatura.

Uma maneira de entender o funcionamento da máquina durante o teste de dupla frequência é considerar o campo magnético girante no entreferro gerado pela aplicação das duas frequências. Este campo é uma resultante de dois campos independentes criados por cada fonte (primária e secundária). O campo resultante varia em velocidade e magnitude enquanto circula pelo entreferro. Segundo [1] a velocidade do campo girante w varia entre os limites dados pela equação 1:

$$\frac{w_1(1+x)}{1+l} < w < \frac{w_1(1-x)}{1-l} \quad (1)$$

$$l = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

$$x = \frac{w_2}{w_1} \quad (3)$$

Onde, V_1 e V_2 e w_1 e w_2 são, respectivamente, tensão e frequência por unidade das fontes principal e auxiliar, conectadas à máquina em teste.

O rotor tenta acompanhar a variação de velocidade, limitado apenas por seu atrito e inércia, desde que nada esteja conectado em seu eixo. Contudo, a velocidade média é muito próxima da velocidade síncrona, com o rotor acelerando e desacelerando alternadamente, de modo que a máquina retira e devolve energia à fonte de alimentação.

As fontes de alimentação têm sua tensão e frequências ajustadas até que a máquina em teste opere com tensão e corrente nominais.

Uma relação entre as perdas joule no rotor quando operando em carga ou com dupla frequência não é tão simples. A média dos valores de escorregamento durante o ensaio com dupla frequência costuma ser menor que o obtido no ensaio de carga, mas

valores instantâneos de escorregamento normalmente excedem os valores médios em varias vezes.

De acordo com [2], uma análise rigorosa do desempenho da máquina operando em dupla frequência só é possível com uma solução numérica das equações gerais de corrente, torque e velocidade da máquina. Contudo, é possível obter uma solução aproximada da operação da máquina alternando entre motor e gerador analisando a onda de fluxo. Para tensões senoidais, o fluxo é uma relação entre tensão e frequência (todas as quantidades por unidade).

Ainda segundo [2], com duas tensões em série, o fluxo total da equação 4 é dado pela soma de duas ondas de fluxo de diferentes magnitude e frequência. A figura 4.1 mostra estes vetores rodando em diferentes velocidades angulares. Resolvendo em componentes e combinando termos, o módulo e o ângulo da soma são dados pela equação (4).

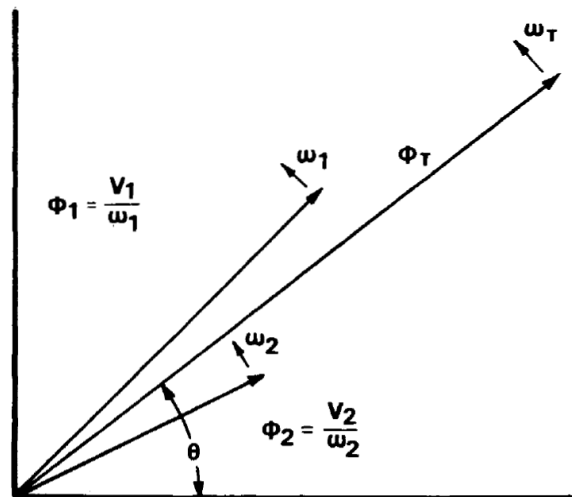


Figura 4.1 - Diagrama Fasorial da Ondas de Fluxo

$$\Phi_T^2 = \left[\frac{V_1}{\omega_1} \cos(\omega_1 t) + \frac{V_2}{\omega_2} \cos(\omega_2 t) \right]^2 + \left[\frac{V_1}{\omega_1} \sin(\omega_1 t) + \frac{V_2}{\omega_2} \sin(\omega_2 t) \right]^2 \quad (4)$$

$$q = \sin^{-1} \left[\frac{\frac{V_1}{\omega_1} \sin(\omega_1 t) + \frac{V_2}{\omega_2} \sin(\omega_2 t)}{\Phi_T} \right] \quad (5)$$

Derivando Φ_r em relação ao tempo e simplificando as expressões tem-se

$$\Phi_r = \frac{V_1}{\omega_1} [1 + a^2 + 2a \cos(\omega_1 t - \omega_2 t)]^{1/2} \quad (6)$$

$$\omega_r = \frac{\omega_1 + a\omega_2 + a(\omega_1 + \omega_2) \cos(\omega_1 t - \omega_2 t)}{\left(\Phi_r \frac{\omega_1}{V_1} \right)^2} \quad (7)$$

$$a = \frac{(\omega_1 V_2)}{(\omega_2 V_1)} \quad (8)$$

Estas equações representam uma onda de fluxo que varia em módulo e velocidade angular em função do tempo, fornecendo tensão e frequência à máquina em teste.

A figura 4.2 mostra a variação da velocidade angular da onda de fluxo para várias relações de tensão primária e secundária, baseado na alimentação com 60Hz e 50Hz. A velocidade média do rotor será muito próxima da nominal da máquina. Quando a velocidade da onda de fluxo é maior que a do rotor da máquina, esta atua como motor, e atua como gerador na situação reversa. Como esperado, quando a tensão da fonte auxiliar em 50Hz é aumentada, a variação da velocidade também aumenta. Isto significa que a variação de torques e correntes será maior. Contudo, a figura 4.2 mostra que a frequência de oscilação independe do valor relativo entre as duas tensões, e depende somente da diferença entre as frequências.

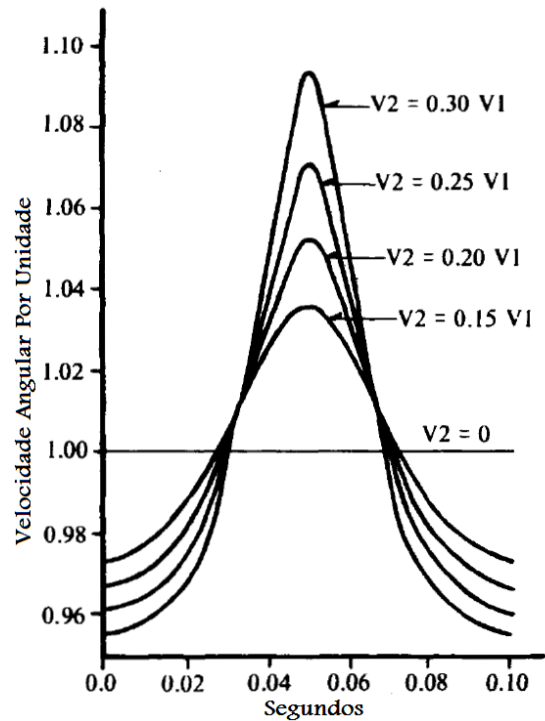


Figura 4.2 - Onda de Fluxo por Velocidade Angular (pu) Alimentado por Frequência de 60Hz e 50Hz.

Os efeitos de se alterar a frequência da fonte auxiliar, mantendo a relação entre as magnitudes das tensões são apresentados na figura 4.3.

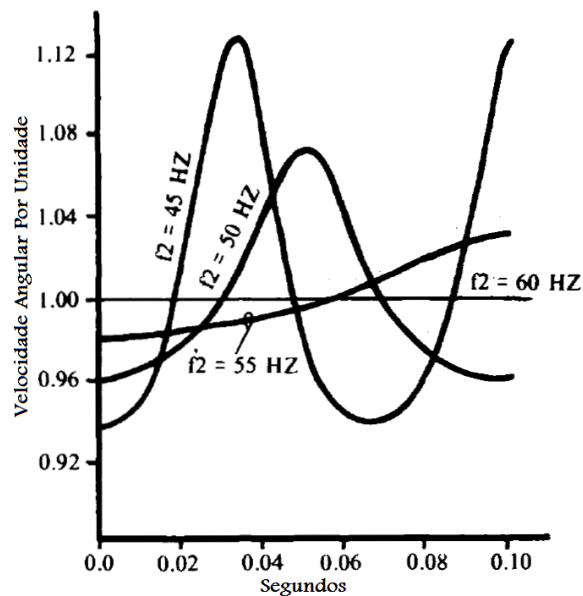


Figura 4.3 - Onda de Fluxo por Velocidade Angular (pu) Alimentado por Diferentes Frequências Auxiliares $v_2 = 0,25v_1$.

Uma idéia sobre a amplitude da oscilação da velocidade e do torque em uma máquina de indução durante os ensaios com Dupla Freqüência pode ser obtida a partir de uma aproximação da expressão da velocidade do rotor. Segundo [2], a velocidade por unidade assume-se ser:

$$w_r = 1 + Ksen(2pf_0t) \quad (9)$$

onde K é uma constante indicando a quantidade de oscilações por unidade da velocidade do rotor e f_0 é a diferença entre as duas freqüência de alimentação. Para causar este movimento, é necessário um torque dado pela equação (10).

$$T = 2HKw_0 \cos(w_0t) \quad (10)$$

$$P = Tw_r \quad (11)$$

$$P = 2HKw_0 \cos(w_0t)[1 + Ksen(2pf_0t)] \quad (12)$$

$$P = 2HKw_0[\cos(w_0t) + Ksen(w_0t)\cos(w_0t)] \quad (13)$$

sendo H a constante de inércia e $w_0 = 2pf_0$

A potência ativa transferida para o rotor pode ser expressa pela equação (14).

$$P = 2HKw_0 \left[\cos(w_0t) + \left(\frac{K}{2} \right) sen(2w_0t) \right] \quad (14)$$

Desprezando as perdas do rotor, a energia transferida para o rotor durante um ciclo completo é zero. Contudo, em um ciclo de $t = -\frac{p}{2w_0}$ até $t = +\frac{p}{2w_0}$, a energia é absorvida pelo rotor e de $t = \frac{p}{2w_0}$ até $t = \frac{3p}{2w_0}$, a energia é devolvida pelo rotor.

A figura 4.4 mostra a magnitude da variação da velocidade como função de H e de diversas frequências de oscilação. Foi assumido que a média de potência ativa transferida durante meio ciclo é 1 pu.

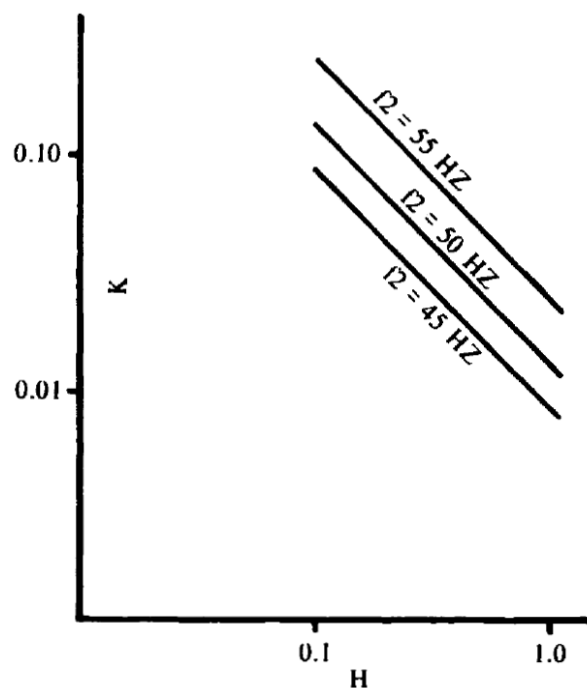


Figura 4.4 – Oscilação da Velocidade (pu) em Função do Fator H para Diversas Frequência Secundárias.

Para que os resultados de elevação de temperatura com o Método da Dupla Frequência sejam acurados, as perdas durante o ensaio devem ser próximas das nominais. Se a corrente do estator é ajustada para ser igual à corrente nominal da máquina as perdas Joule no estator devem ser as mesmas que as nominais.

Segundo [2], simulações numéricas mostram que as perdas no ferro podem ser de 2% a 9% maiores que as nominais, dependendo dos valores de ajuste das tensões e frequências das fontes principal e auxiliar.

Experimentos realizados em motores de rotor bobinado [1] mostraram que, durante o ensaio em Dupla Frequência, as correntes do rotor são ligeiramente maiores que as obtidas durante a operação normal à plena carga. Correntes parasitas e as perdas suplementares parecem ser também ligeiramente maiores devido às harmônicas geradas na Dupla Frequência.

Este aumento de perdas durante o ensaio em Dupla Frequência leva a concluir que as temperaturas obtidas a partir desta metodologia de teste são também maiores que as nominais da máquina sob operação normal. Este acréscimo de temperatura dependerá

dos ajustes de tensão e frequência durante o ensaio e de características construtivas da máquina em teste.

4.3 Equipamentos e Diagramas de Montagem

De maneira geral, o ensaio de dupla frequência exige uma fonte auxiliar, uma fonte principal e um transformador isolador com o mesmo kVA nominal do motor a ser testado, considerando-se a utilização de equipamentos usualmente encontrados (uso comercial). Esta generalização pode ser revista para cada caso individualmente, respeitando sempre as capacidades nominais de corrente e isolamento dos equipamentos envolvidos no teste.

A Figura 4.5 mostra um diagrama básico de montagem para realização do teste com dupla frequência. Na parte de medição foram instalados Analisadores de Potência na saída da fonte principal e auxiliar, e um voltímetro nos terminais de entrada da máquina sob teste. O valor da corrente de ensaio do motor foi medida pelo analisador de potência instalado na saída da fonte auxiliar.

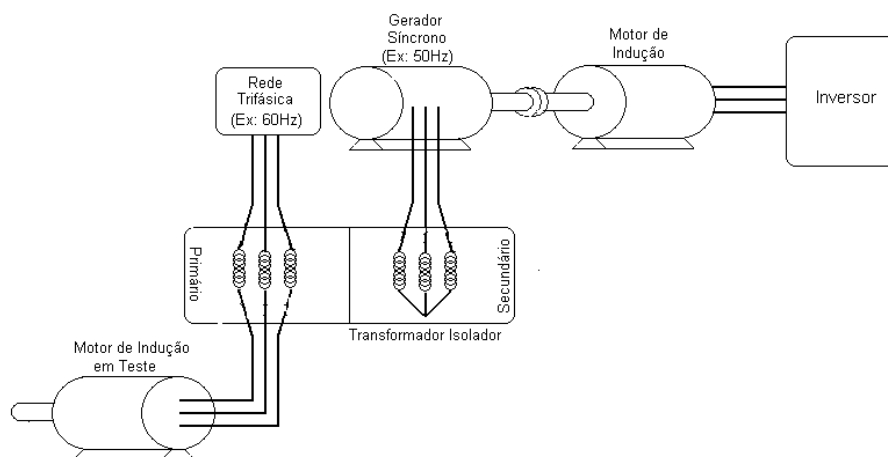


Figura 4.5 - Diagrama de Montagem (Dupla Frequência)

Uma das vantagens do método das duas frequências vem do fato de que somente são consumidas, durante o ensaio, as perdas do motor sob teste somadas com as perdas dos equipamentos utilizados. Contudo, uma grande quantidade de energia circula pelas fontes e transformador. A energia deve ser fornecida pela fonte para acelerar o motor, e esta energia menos as perdas, devolvida para a fonte enquanto o motor desacelera.

Um ciclo completo de energia ocorre a cada período da frequência de batimento, de aproximadamente 0,1 segundos para um teste em 60/50Hz. Isto tem um importante efeito no dimensionamento da fonte principal e auxiliar, bem como no transformador isolador.

Um diagrama de montagem alternativo pode ser obtido eliminando-se o transformador isolador e colocando-se em série as bobinas de um gerador, que irá operar como fonte auxiliar, como mostra a figura 4.6. É importante lembrar que, quando uma máquina de média ou alta tensão está sendo testada, o isolamento da armadura do gerador auxiliar deve suportar a tensão exigida no ensaio.

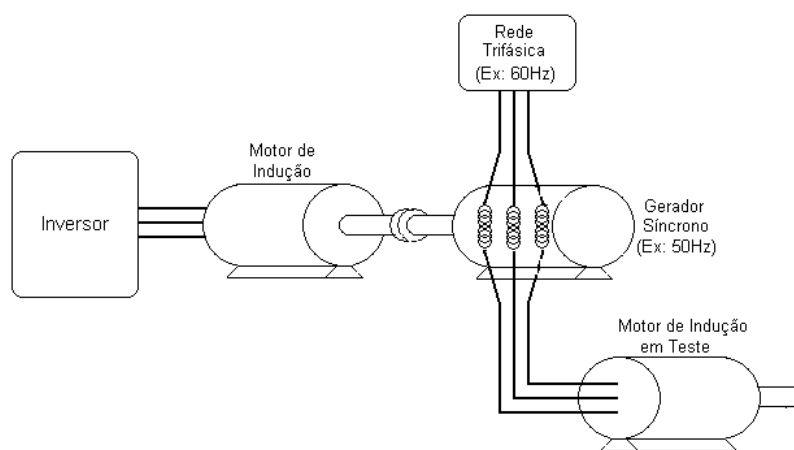


Figura 4.6 - Diagrama Alternativo de Montagem (Dupla Frequência)

4.4 Procedimento para Realização do Ensaio

Recomenda-se realizar o seguinte procedimento para iniciar o ensaio de temperatura com o método da dupla frequência:

- a) Verificar se a fonte principal e a auxiliar apresentam a mesma seqüência de fases;
- b) Partir o motor com a fonte principal (60 Hz) e aplicar tensão nominal;
- c) Acionar a fonte auxiliar (50 Hz) e aumentar tensão até obter corrente nominal nos terminais do motor sob teste;
- d) Com o aumento da tensão auxiliar os instrumentos de medição apresentarão uma pequena oscilação ($\approx 10\text{Hz}$) e é possível que a tensão nos terminais da máquina também sofram um pequeno acréscimo;
- e) Ajustar a tensão da fonte principal (60Hz) para obter tensão nominal nos terminais da máquina;

- f) Ajustar novamente a tensão da fonte auxiliar (50 Hz) buscando obter corrente nominal nos terminais da máquina;
- g) Repetir os passos “e” e “f” até que tanto a tensão como a corrente de linha da máquina sob teste apresentem os valores nominais de funcionamento.

Caso a fonte auxiliar seja uma fonte com frequência variável, e recomenda-se que seja, é possível realizar pequenas variações na frequência buscando reduzir as oscilações dos instrumentos de medição e corrigir a tensão e a corrente de linha da máquina sob teste.

Na tabela 4.1 é possível verificar valores obtidos na prática durante o ensaio em Dupla Frequência de um motor de indução de 2 pólos, 4000V, 60Hz e 250kW. O teste foi realizado com a configuração apresentada na figura 4.1, utilizando um transformador com uma tensão no primário de 4160V e secundário de 440V.

Tabela 4.1 - Valores de ajuste das fontes durante ensaio em Dupla Frequência

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (kVA)	Frequência (Hz)
Fonte Principal	4235	41,7	305,9	60
Fonte Auxiliar	171	359,3	106,4	50
Motor em Teste	4000	41,7	288,9	60/50

É importante verificar que foi utilizada a relação padrão de frequência 60/50Hz e que a tensão necessária para realização do teste na fonte auxiliar foi aproximadamente 40% da nominal do transformador.

4.5 Vibração

Um dos problemas associado ao ensaio com dupla frequência é o aumento da amplitude de vibração da máquina sob teste.

A tabela 4.2 mostra o aumento da vibração da máquina de indução de 2 pólos (3600 rpms / 60 rps) quando alimentada por duas frequências, onde foram realizadas medições nos mancais dianteiro e traseiro conforme diagrama da figura 4.7.

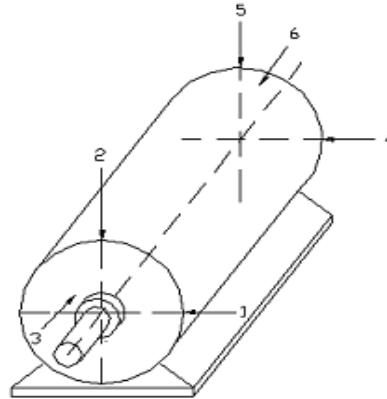


Figura 4.7 - Pontos de Medição de Vibração

É importante destacar que os dois ensaios foram realizados na mesma condição de operação e montagem da máquina. Durante o ensaio em 60 Hz puro apenas foi desligada a fonte auxiliar.

Tabela 4.2 - Vibração durante o ensaio em Dupla Freqüência

Vibração (mm/s rms)						
Ponto	1	2	3	4	5	6
60 Hz	0,7	0,9	0,6	0,7	0,7	0,3
50/60 Hz	2,7	2,0	1,2	4,0	1,4	1,4

Analisando o espectro de vibração do ensaio com dupla freqüência, apresentado na figura 4.8, verifica-se o aparecimento de uma componente predominante de 10Hz, a qual não estava presente durante o ensaio com alimentação em 60Hz pura. Esta componente de 10Hz é o valor da freqüência de batimento do ensaio com dupla freqüência quando alimentado com as freqüências de 50/60Hz. A amplitude de vibração claramente indica o efeito da dupla freqüência.

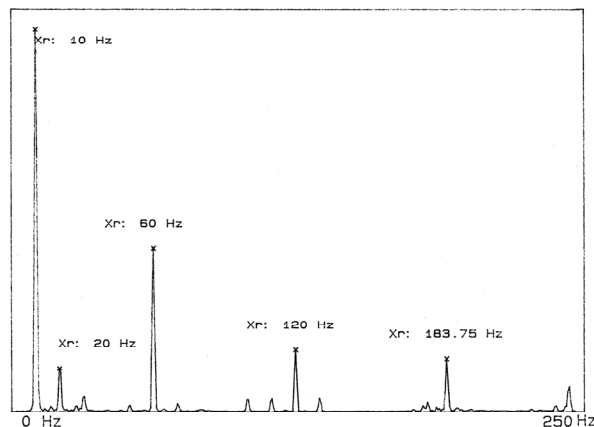


Figura 4.8 - Espectro de Vibração Durante Ensaio em Dupla Freqüência

Acredita-se que normalmente este aumento da vibração não causará problemas para os motores. Entretanto, é importante monitorar seu comportamento ao longo do teste, principalmente para motores com mancais de deslizamento, onde a severidade da vibração pode comprometer a formação do filme de óleo.

Não só a máquina em teste sofre os efeitos da vibração elevada. Por exemplo, em uma das tentativas de realizar o teste em Dupla Freqüência no desenvolvimento deste trabalho, também os grupos geradores, principal e auxiliar, apresentaram um aumento em sua amplitude de vibração. Durante o teste, se estava utilizando o diagrama alternativo conforme a figura 4.6. O grupo gerador principal apresentava níveis de vibração inferiores a 3 mm/s quando estava alimentando ensaios em carga do método direto. Verificaram-se valores de 22 mm/s quando acionando o ensaio em Dupla Freqüência. O gerador auxiliar, durante o mesmo teste, teve os parafusos de fixação do cardan de acoplamento quebrados.

4.6 Método da Dupla Freqüência Utilizando Inversores de Freqüência.

Com a crescente evolução da eletrônica de potência, com inversores de freqüência com potência e tensões de operação cada vez maiores, e custos cada vez menores, propõe-se [7] a realização do ensaio com Dupla Freqüência utilizando inversores de freqüência regenerativos.

Conforme [7], a utilização de inversores de freqüência nos ensaios de Dupla Freqüência permite, diferentemente do realizado com máquinas girantes, ter um controle total da distribuição de perdas da máquina em teste. Existem configurações utilizando exclusivamente inversores de freqüência e outras onde o inversor atua

somente como fonte auxiliar. É importante ressaltar que, mesmo permitindo um maior controle sobre o ensaio, muitas perdas são adicionadas devido às características de comutação dos inversores. Acredita-se que a utilização de inversores pode ser sim uma opção na montagem de uma bancada de testes de Dupla Frequência, principalmente para motores até 2 MW e média tensão. A partir daí os custos ainda seriam proibitivos.

CAPÍTULO 5 - BANCADA PROTÓTIPO

5.1 Proposta

Neste capítulo busca-se entender o ensaio com Dupla Frequência de maneira experimental sem focar em sua eficácia na avaliação térmica da máquina em teste, buscando informações quanto a sua dinâmica de operação.

Montar uma bancada de ensaios, obtendo-se em tempo real as formas de onda de correntes e de tensões, e ainda determinar o fluxo de potência entre todas as máquinas que participam do ensaio, ajudou no entendimento do processo de ensaio de elevação de temperatura utilizando o método da dupla frequência.

Ao se montar uma bancada de testes é imprescindível definir como se dará o fluxo de potência durante o seu funcionamento. Apesar dos equipamentos que utilizam a eletrônica de potência, como inversores de frequência, conversores CA/CC, que vêm reduzindo seus custos de maneira bastante acentuada, mesmo para utilizações que envolvem grandes potências ou alta tensão, deve-se tomar o cuidado ao dimensionar estes equipamentos. Em configurações normais, os inversores de frequência são unidirecionais em seu fluxo de potência. Na maioria das aplicações pode não representar um problema, mas certamente em uma bancada de ensaios, principalmente para o Método da Dupla Frequência, pode inviabilizar seu funcionamento.

Disponer de inversores e conversores bidirecionais é sem dúvida a primeira idéia na montagem de uma bancada, mas estes equipamentos costumam custar até o dobro dos unidirecionais com as mesmas características. Quando a idéia é testar máquinas a partir de 3MW, cada inversor ou conversor de frequência podem custar centenas de milhares de reais. É, então, de grande importância econômica propor soluções que minimizem ou otimizem a utilização deste tipo de equipamento.

A bancada de ensaio proposta é baseada no esquema alternativo da figura 4.6, sem a utilização de um transformador isolador. Utiliza-se dois grupos geradores compostos por motores de indução acionados por inversores regenerativos acoplados a geradores de 4 pólos, Baixa Tensão e de 500kVA. Assim tem-se como ajustar com exatidão as frequências das fontes de alimentação e obter as formas de onda sem a necessidade de transformadores de potenciais, o que seria impossível se fossem utilizadas máquinas de média ou alta tensão.

Foi escolhida como máquina de indução para ser submetida à dupla frequência um motor de 4 pólos, 60Hz, 380V e 70A.

Foram adquiridas formas de onda das tensões e correntes conforme apresentado na figura 5.1 e ainda o fluxo de potência que passará pelos inversores de frequência, nestes últimos, mais importante que se conhecer o valor de pico da potência, é determinar qual o sentido de fluxo em cada ciclo de aceleração e desaceleração da máquina em teste.

Na avaliação do fluxo de potência na saída dos grupos geradores utiliza-se transdutores de potência, equipamentos que, a partir da medição da corrente, tensão e fator de potência, fornecem um valor proporcional de tensão contínua.

Na medição e captura dos sinais medidos é utilizado um osciloscópio multicanal modelo Fluke 196C.

As leituras de vibração são realizadas utilizando um analisador de vibração modelo VB2000, que realiza leituras a partir de acelerômetros acoplados na máquina em teste. Neste caso específico, só se fez a leitura da vibração horizontal do mancal dianteiro. A intenção neste teste é mostrar como se comporta a vibração da máquina durante o ensaio, operando com alimentação pura e com a dupla frequência.

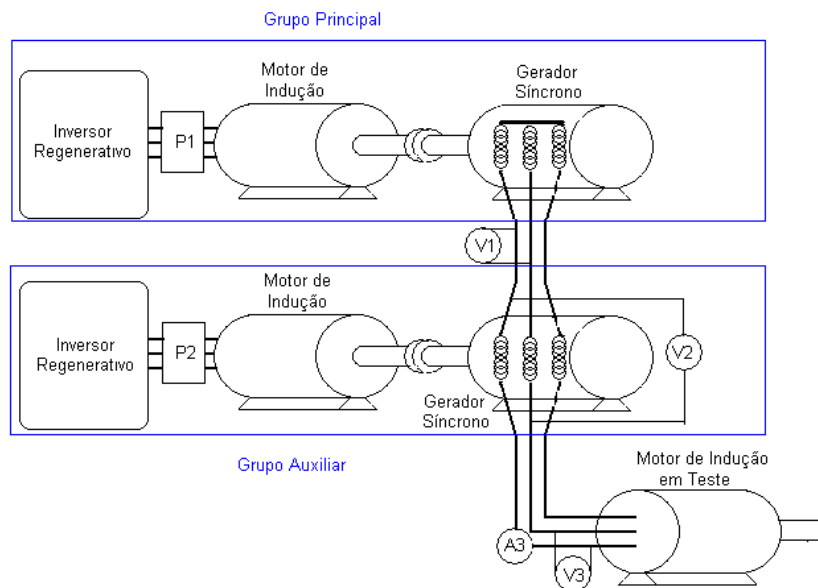


Figura 5.1 - Bancada Protótipo para Ensaio de Dupla Frequência

Com esta metodologia e procedimentos experimentais, será possível entender de maneira detalhada o funcionamento de uma bancada de ensaios de Dupla Frequência e,

assim, propor possíveis configurações futuras de bancadas, otimizando investimentos e garantindo sua funcionalidade e operacionalidade adequadas.

5.2 Resultados Obtidos

Os ensaios foram iniciados seguindo os procedimentos descritos no capítulo 4, aplicando as frequências indicadas e utilizadas nos trabalhos de referência [1][2][9][14], ou seja, 60Hz para a Fonte Principal e 50Hz para fonte auxiliar. Entretanto, não foi possível manter na bancada implementada esta condição de operação devido a um aumento significativo da vibração do grupo principal e uma variação muito grande nos valores de tensão e corrente do motor em teste. Foi alterada a frequência da fonte auxiliar e ajustada em 55Hz, onde conseguiu-se reduzir a vibração do grupo gerador principal, e melhorando também a oscilação dos valores lidos nos instrumentos de medição.

A figura 5.2 apresenta a forma de onda de tensão da máquina em teste, onde é possível identificar a existência de duas frequências: 60Hz gerada pelo grupo gerador principal, e um batimento de frequência de 5Hz, causado pela diferença de frequências entre o grupo gerador principal e o auxiliar (60/55Hz). O valor eficaz da tensão altera entre 318V e 432V, com um valor médio de 375V, apenas 1,3% abaixo do valor nominal do motor em teste.

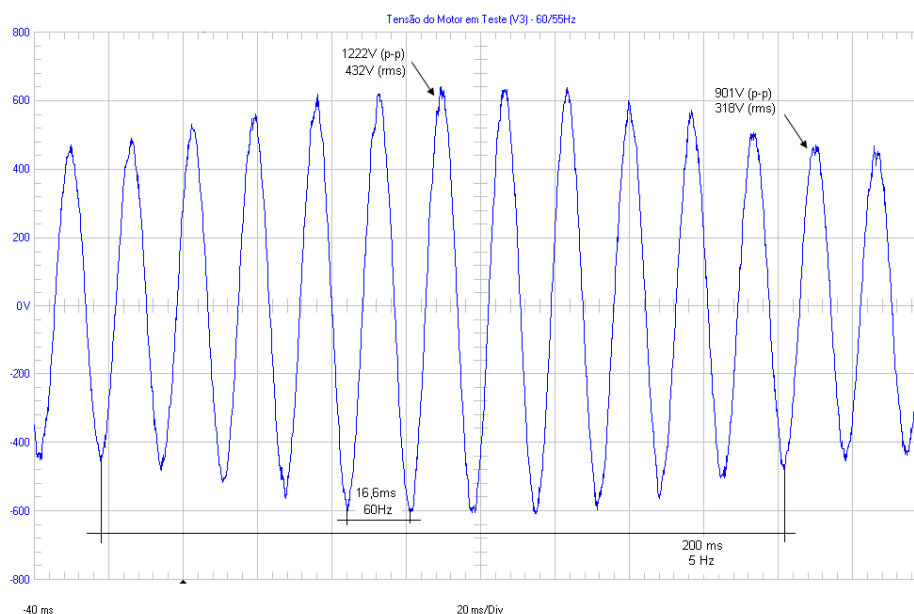


Figura 5.2 - Tensão do Motor em Teste (V3) - 60/55Hz

A figura 5.3 mostra a forma de onda da corrente da máquina durante o teste, onde é possível identificar a frequência de 60Hz gerada pelo grupo gerador principal, e também uma componente em baixa frequência. Os valores eficazes de corrente variam entre 20A e 127A, tendo um valor médio de 73,5A, ou seja, 5% acima do valor nominal.

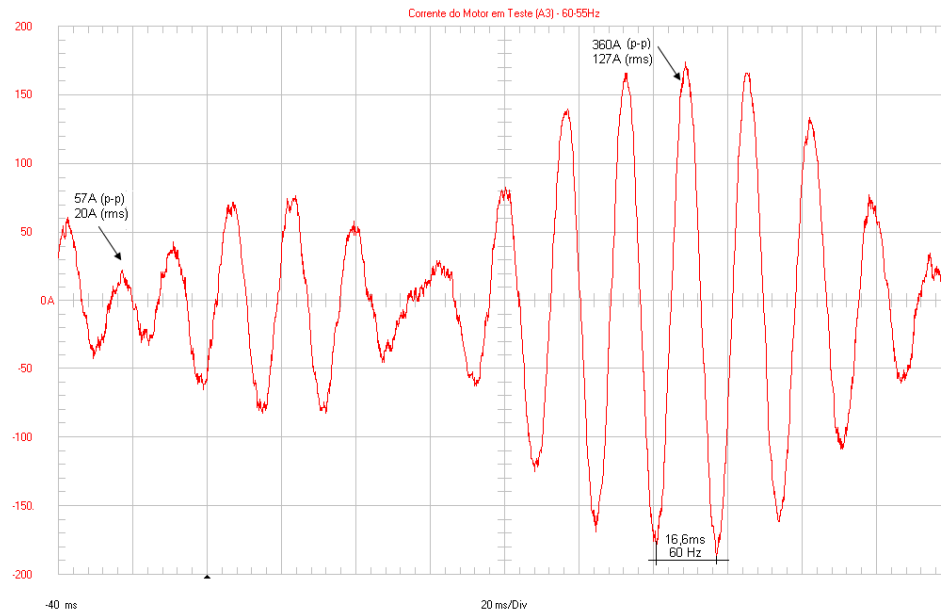


Figura 5.3 - Corrente do Motor em Teste (A3) - 60/55Hz

A queda de tensão sobre uma fase do grupo gerador auxiliar é apresentada na figura 5.4. A oscilação encontrada foi bastante baixa e o valor eficaz de 106V é aproximadamente 28% da tensão nominal da máquina.

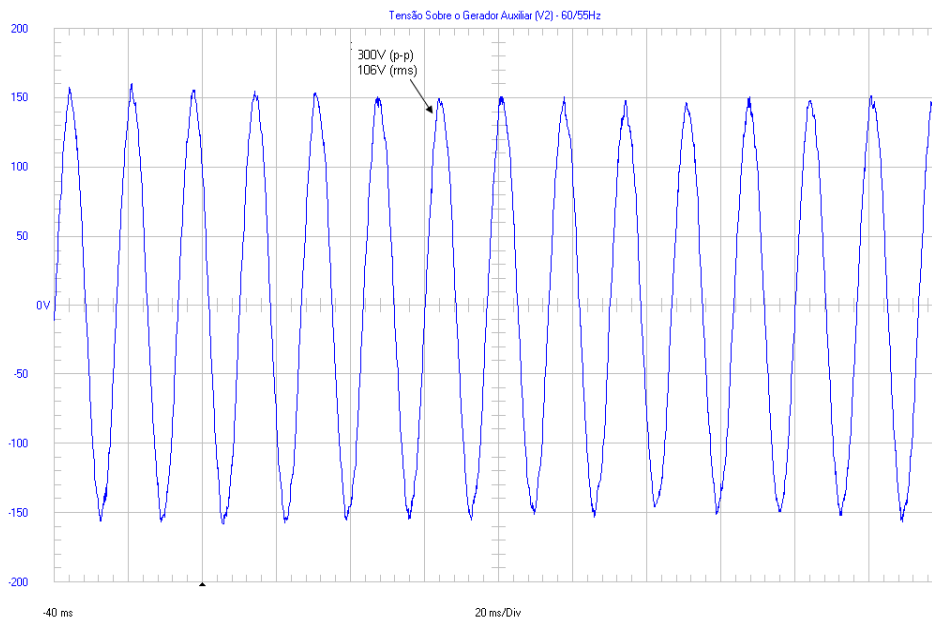


Figura 5.4 - Tensão Sobre o Gerador Auxiliar (V2) - 60/55Hz

Outra informação que é possível coletar durante o teste, diz respeito ao fluxo de potência nos grupos geradores. A figura 5.5 mostra o fluxo de potência de cada um dos grupos geradores. Na figura 5.5 é possível perceber que o sentido do fluxo oscila a uma frequência de 5 Hz, que é a frequência de batimento da Dupla frequência neste caso. Outra informação importante é que a variação do fluxo acontece em oposição de fase, ou seja, enquanto, por exemplo, o grupo gerador principal absorve energia da rede (curva de potência P1) o auxiliar devolve esta energia (potência P2), sendo que no grupo principal a amplitude é 4 vezes maior que no auxiliar. É importante verificar na figura 5.5 que a potência do grupo gerador auxiliar foi multiplicada por dois para facilitar a visualização da duas ondas.

Não foi possível obter a potência absorvida e devolvida pelo motor em teste durante o ciclo de aceleração e desaceleração. Entretanto, o analisador de potência digital indicou um valor de 25kW durante o ensaio. Certamente parte desta potência é absorvida pelos grupos e não chega até os inversores de frequência para ser trocada com a rede. Teoricamente, só irão passar pelos inversores, a potência ativa que não for absorvida pelos grupos geradores.

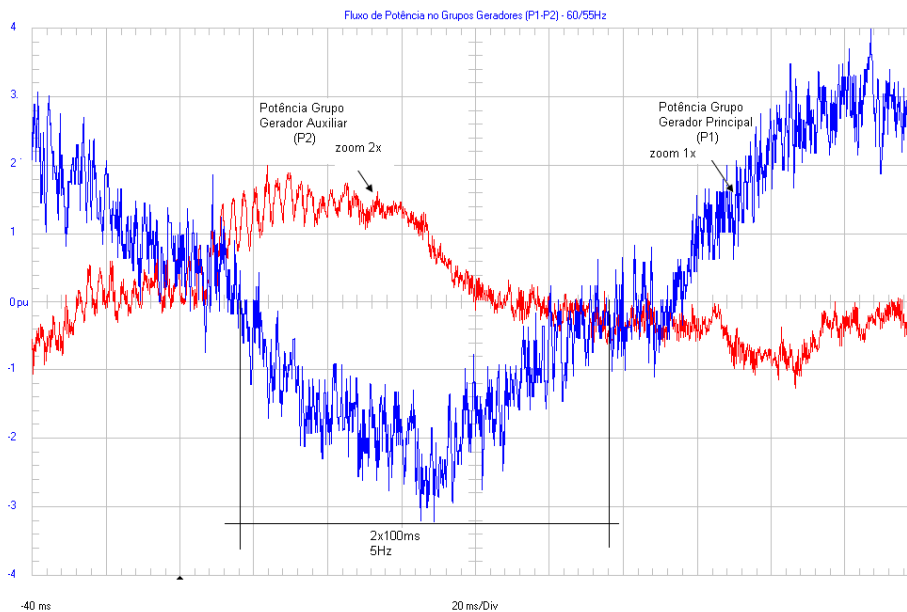


Figura 5.5 - Fluxo de Potência nos Grupos Geradores (P1-P2) - 60/55Hz

Para testar uma nova relação de frequências entre os grupos geradores, alterou-se a frequência no grupo auxiliar buscando outro ponto onde seria possível realizar o ensaio sem risco de danificar o grupo gerador principal devido à vibração elevada. A nova condição encontrada foi de 60Hz para o grupo principal e 40Hz para o grupo auxiliar. O que chamou bastante atenção foi que nesta nova condição, a oscilação das leituras nos instrumentos de medição digital diminuiu consideravelmente, tendo um desempenho semelhante a uma medição realizada com alimentação senoidal pura.

A forma de onda da tensão para esta condição de relação de frequências é apresentada na figura 5.6. É possível perceber que a frequência de batimento aumentou, diminuindo seu efeito na forma de onda de tensão. O batimento possui uma frequência de 20Hz, que é a diferença de frequência entre os dois grupos geradores (60/40Hz). A tensão eficaz nos terminais do motor em teste variou entre 366V e 399V, com um valor médio de 382V, sendo apenas 0,6 % acima da tensão nominal. Neste caso, a variação dos valores eficazes de tensão reduziu cerca de 46% em relação ao caso utilizando a relação de frequências de 60/50Hz.

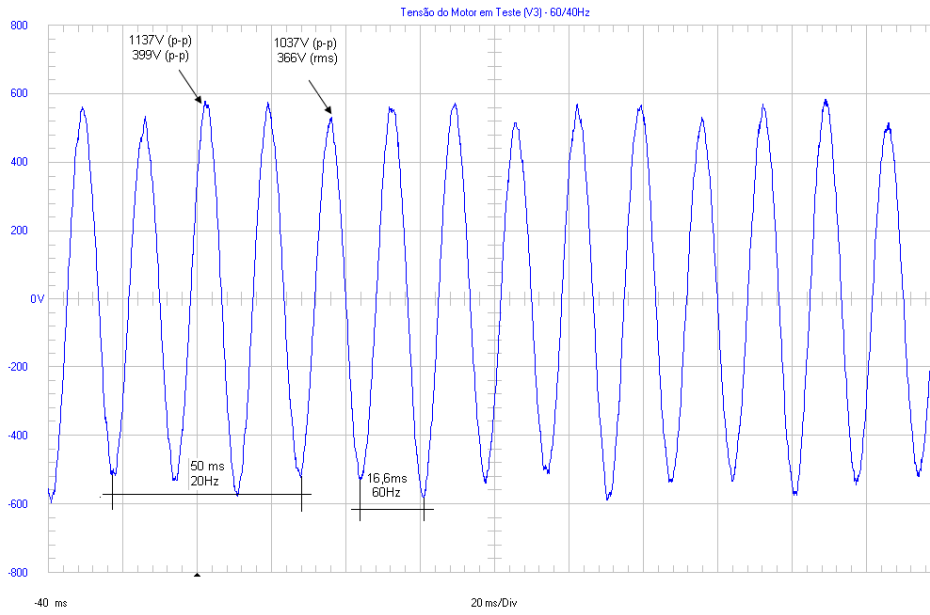


Figura 5.6 - Tensão do Motor em Teste (V3) - 60/40Hz

Na figura 5.7 temos a forma de onda da corrente no ensaio com Dupla Frequência 60/40Hz. Os valores eficazes de corrente do motor em teste variam entre 60A e 91A, tendo 75A de média, 7% acima da corrente nominal. Neste caso, a variação dos valores eficazes de corrente reduziu em cerca de 28% em relação ao caso utilizando a relação de frequências de 60/50 Hz

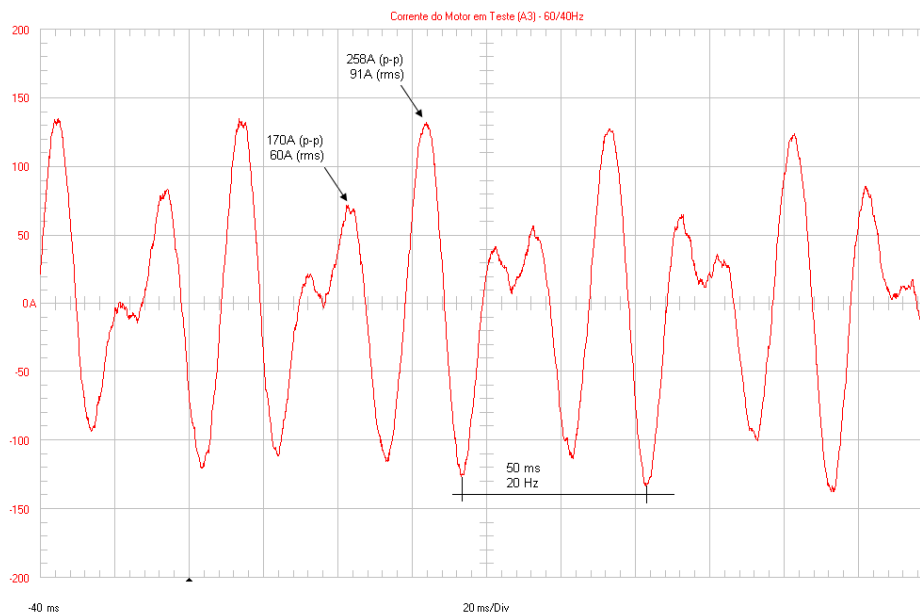


Figura 5.7 - Corrente do Motor em Teste (A3) - 60/40Hz

O aumento da vibração mostrou-se um problema que deve ser cuidadosamente avaliado durante o ensaio com Dupla Frequência. A figura 5.8 apresenta dois espectros de vibração do motor em teste em duas situações: em vazio com tensão e frequência nominais (figura 5.8a) e após alimentando com Dupla Frequência (60/40Hz) (figura 5.8b). No ensaio com alimentação pura senoidal o motor apresentou um valor de velocidade de vibração de 0,5mm/s, na sua frequência de rotação, 30Hz. Quando alimentado com a Dupla Frequência, estes valores aumentaram para 5,6mm/s, aparecendo também em destaque uma vibração na frequência de 20Hz, que é a frequência de batimento do ensaio com Dupla Frequência na relação 60/40Hz.

Quando os testes com dupla frequência foram concluídos, percebeu-se que a chaveta de acoplamento do grupo gerador principal havia sido danificada, provavelmente pela oscilação de torque durante o ensaio.

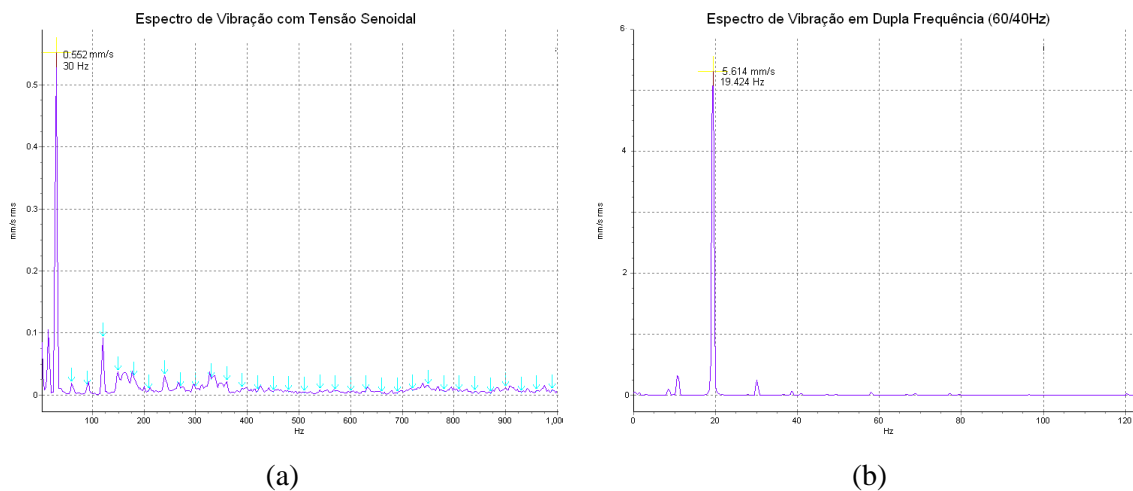


Figura 5.8 - Espectros de Vibração Senoidal (a) e Dupla Frequência 60/40Hz (b)

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

6.1 Conclusão

Apresentou-se sumariamente neste trabalho a máquina de indução, onde foi abordado seu funcionamento, generalidades e a importância da temperatura em sua especificação e funcionamento.

Os principais métodos utilizados na avaliação térmica de máquinas de indução, abordando suas vantagens, desvantagens e equipamentos necessários para sua realização foram apresentados.

O Método da Dupla Frequência foi estudado e discutido, mostrando suas particularidades. Uma bancada protótipo foi proposta e montada com o objetivo de avaliar o Método da Dupla Frequência. Resultados foram apresentados de maneira gráfica, com análise dos resultados e valores de elevação de temperatura.

Os métodos alternativos de avaliação térmica apresentados neste trabalho atendem, sem dúvidas, os objetivos a que se propõem; garantindo que a máquina testada está atendendo à classificação térmica a que foi projetada e permitindo esta avaliação com a menor quantidade de investimentos possível na compra de equipamentos para laboratório de ensaios.

As máquinas utilizadas no laboratório de ensaios devem ter seus acoplamentos e bases projetados para suportar oscilações de torque, garantindo que não ocorram quebras e acidentes durante a realização do ensaio.

A informação de que os fluxos de potência nos grupos geradores acontecem com oposição de fase é, sem dúvida, uma informação importante no dimensionamento de novos equipamentos e bancadas de ensaios. Fontes de recuperação menores podem ser suficientes para realização da metodologia. A figura 6.1 mostra uma configuração de montagem do laboratório utilizando máquinas de corrente contínua nos grupos geradores. Como os motores dos grupos geradores estão ligados ao mesmo ponto de alimentação, a energia que estaria sendo devolvida para a rede por um grupo, poderia ser absorvida pelo outro grupo gerador antes de chegar ao conversor CA/CC, reduzindo o fluxo de energia através deste.

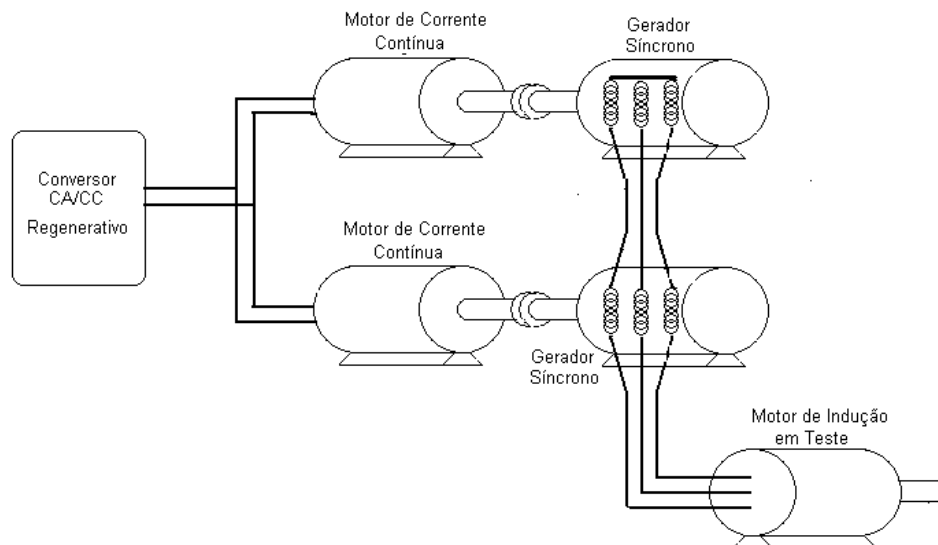


Figura 6.1 - Bancada de Dupla Frequência Utilizando Motores de Corrente Contínua

Percebe-se que a vibração dos grupos geradores tem pouca relação com o tamanho da máquina em teste. Chegou-se a esta conclusão comparando a potência do motor que foi utilizado no experimento em relação aos grupos geradores utilizados na bancada de ensaio. O motor em teste tem menos de 10% da potência nominal dos grupos geradores e, mesmo assim, o aumento da vibração inviabilizava a continuação do ensaio.

A utilização de volantes de inércia nos grupos geradores pode servir como “filtro” de potência ativa, garantindo que uma quantidade menor de potência ativa seja trocada com a rede em cada ciclo. Se toda a energia usada para alternar a rotação do motor em teste passa através dos grupos geradores, os volantes de inércia podem ser uma boa alternativa para armazenar esta energia. A potência ativa seria armazenada nos volantes de inércia durante a desaceleração do motor em teste e reutilizada no instante seguinte durante a aceleração do mesmo.

Percebeu-se que com pequenos ajustes na frequência do grupo gerador auxiliar é possível reduzir bastante a vibração dos grupos geradores, reduzindo inclusive a oscilação das leituras dos instrumentos de teste.

Durante os ensaios foi possível utilizar equipamentos com indicadores digitais. Inicialmente esta era uma dúvida, uma vez que as oscilações nas medições poderiam inviabilizar seu uso. Entretanto mostrou-se que tais tipos de instrumentos podem ser utilizados com bom desempenho desde que a frequência do grupo auxiliar esteja regulada para o ponto de menor oscilação. Este procedimento de busca da menor

oscilação também contribui para que haja menor estresse nos componentes mecânicos da bancada de ensaios e também no motor em teste.

Uma vantagem do método da Dupla Frequência diz respeito à medição da vibração. Uma vez a máquina estabilizada termicamente é possível realizar uma avaliação de sua vibração apenas desligando o grupo gerador auxiliar, ou seja, medir a vibração na condição térmica nominal. Em alguns motores, principalmente de alta rotação, o aquecimento pode influenciar substancialmente nos valores de vibração. Em outras metodologias de teste, é necessário frear a máquina em teste e desacoplar da máquina auxiliar ou dinamômetro. Em máquinas de grande porte este procedimento pode levar até mais de uma hora, tempo suficiente para que a máquina reduza sua temperatura.

Nos ensaios realizados, evidenciou-se que o Método da Dupla Frequência pode aumentar em muito a produtividade de um laboratório de testes. O tempo necessário entre o final de um teste e o início de outro é consideravelmente menor quando comparado a outras metodologias de ensaios que requerem o acoplamento mecânico da máquina a ser testada, permitindo a realização do ensaio de vibração de maneira imediata.

6.2 Proposta para Trabalhos Futuros

Durante a preparação desta dissertação de mestrado, surgiu uma proposta alternativa de montagem de uma bancada de ensaios para Dupla Frequência, conforme figura 6.2. A grande vantagem desta configuração seria a utilização de apenas uma máquina acionante com dupla ponta de eixo, acoplada a dois geradores com 10 e 12 pólos. Quando acionados a uma mesma rotação, as frequências geradas teriam uma diferença de 20%, que é a recomendada pela maioria dos artigos estudados. Até a necessidade de um inversor de grande porte pode ser questionada, uma vez que este poderia ser utilizado somente na partida do sistema e retirado (*by pass*) no instante seguinte, quando a rotação nominal do conjunto fosse atingida. A flexibilidade de se ter 50 Hz ou 60 Hz poderia ser obtida alternando os grupos entre principal e auxiliar, bastando apenas reconectar os cabos. Infelizmente, os testes realizados mostraram que esta combinação de frequências gera uma vibração significativa no grupo gerador principal. Porém, não se pode garantir se este fato não foi agravado por alguma relação específica entre os equipamentos utilizados em nossa simulação ou até por limitação

mecânica na montagem dos grupos geradores utilizados. A figura 6.2 mostra o diagrama alternativo para a possibilidade de continuidade em futuros trabalhos.

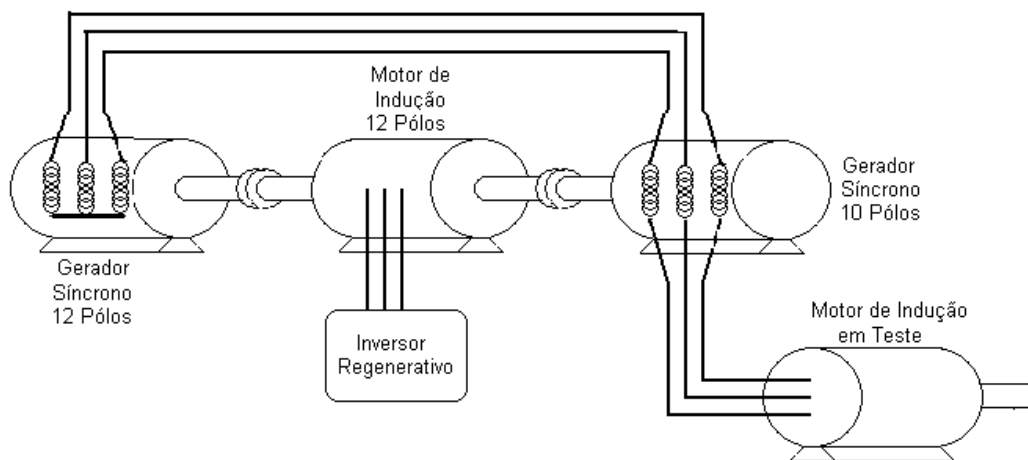


Figura 6.2 - Diagrama Proposto para o Método da Dupla Frequência

Sem dúvida esta configuração de bancada seria muito interessante economicamente, pois se teria parte da potência ativa circulando como energia mecânica pelo eixo das máquinas, reduzindo o fluxo de potência através do inversor de frequência, além do número de equipamentos necessários em sua montagem ser menor que nas demais configurações apresentadas neste trabalho, reduzindo o custo de implantação. Outra utilidade que se vislumbra para esta configuração proposta é a avaliação de vida útil em máquinas de pequeno porte, pois, uma vez acionado o sistema, este pode permanecer operando e consumindo apenas as perdas das máquinas envolvidas.

Acredita-se que um estudo de viabilidade desta configuração seria muito útil, principalmente na compra de equipamentos para bancadas de teste para máquinas de grande porte.

Outro trabalho, não menos importante, é a utilização do Método da Dupla Frequência na determinação do rendimento da máquina em teste.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] JORDAN, H. E.; COOK, J. H.; SMITH, R. L.; 1975. Synthetic Load Testing of Induction Machines. *IAS'75 annual*, Cleveland, v. 96, no. 1101 July 1977.
- [2] SCHWENK, H. R.; 1977. Equivalent Loading of Induction Machines for Temperature Tests. *IEEE transactions on Power apparatus Systems*. East Pittsburgh, v. PAS-96, no.4 July/August 1977.
- [3] BOLDEA, I.; TUTELEA, L.; KLUMPNER, C.; 2001. Artificial Loading of Induction Machines: a review. *Workshop on Electrical Machines Parameters*, Technical University of Cluj-Napoca, may 2001.
- [4] MEYER, A.; LORENZEN, H. W. Two frequency Heat run – A Method of Examination for Three Phase Induction Motors. *IEEE transactions on Power apparatus Systems*. New York, v. PAS-98, No.6 Nov./Dec. 1979.
- [5] PLEVIN, D. H.; GLEW, C. N.; DYMOND, J. H.. Equivalent Load Test for Induction Machines – The forward Short circuit Test. *IEEE transactions on Energy Conversions*. V. 14, No. 419, Sep. 1999.
- [6] ÇOLAK, I.; BAL, G.; ELMAS, Ç.; 1996. Review of the Testing Methods for Full-Load Temperature Rise Testing of Inducton Machines. *EPE Journal*, vol. 6 no 1, 1996.
- [7] ÇOLAK, I.; GARVEY, S.; WRIGHT, M. T.; 1993. Mixed frequency ;testing of induction machines using Inverters . *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*. V. 5, No. 317, Sep. 1993.
- [8] FITZGERALD, A. E. *Máquinas Elétricas – Conversão Eletromecânica de Energia, Processos, Dispositivos e Sistemas*. São Paulo: McGraw –Hill, 1975.
- [9] SOLTANI, J.; SZABADOS, B.; HOOLBOOM, J. A New Synthetic loading for Large Induction Machines With No Feedback into the Power System. *IEEE transactions on Energy Conversion*, v. 17, no. 3, September 2002.
- [10] GROSZ, H. W.; BORGHERESI, E. L. Ensaio de Motores Elétricos Verticais. *Revista Siemens*, São Paulo, 1982.

- [11] ÇOLAK, I.; GARVEY, S.; WRIGHT, M. T. Estimation of the Induction Machines Parameters for Simulation of a Mixed-Frequency Test. *6th International Conference on Electrical Machines and Drives*. No. 208, Oxford, Sep. 1993.
- [12] MIHALCEA, A.; SZABADOS, B.; HOOLBOOM, J. Determining Total losses and Temperature Rise in Induction Motors Using Equivalent Loading Methods. *IEEE transactions on Energy Conversion*, v. 16, no. 3, September 2001.
- [13] MCKINNON, D. J.; GRANTHAN, C.; Modeling of Synthetic Loading for Efficiency Evaluation of Three-Phase Induction Motors. *AUPEC 2003*. New Zealand, Sep. 2003.
- [14] ALVAREZ, E. P.; LOBOSCO, O. S. Os Métodos Alternativos para Ensaio de Carga. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, junho, 1982.
- [15] IEEE. *Test procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, IEEE 112. New York, 2006.