

TESE

1148

Escola Federal de
Engenharia de Itajubá

Manutenção Preditiva em
Motores de Indução Trifásicos
Através do Espectro da
Corrente do Estator

Erik Leandro Bonaldi

Itajubá, 2002



Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

**MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATRAVÉS DO
ESPECTRO DA CORRENTE DO ESTATOR**

Dissertação apresentada à Escola
Federal de Engenharia de Itajubá para
a obtenção do grau de Mestre em
Ciências em Engenharia Elétrica.

Erik Leandro Bonaldi

Itajubá, Fevereiro de 2002

CLASS. 621.313.333(043.2)
CUTTER. 8697 m
TOMBO. 1148



Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

ESPECTRO DA CORRENTE DO ESTATOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATRAVÉS DO MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES

Dissertação apresentada à Escola
Federal de Engenharia de Itajubá para
a obtenção do grau de Mestre em
Ciências em Engenharia Elétrica.

Erik Leandro Bonaldi

Itajubá, Fevereiro de 2002

Erik Leandro Bonaldi

MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATRAVÉS DO ESPECTRO DA CORRENTE DO ESTATOR

Dissertação apresentada à Escola
Federal de Engenharia de Itajubá para
a obtenção do grau de Mestre em
Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Automação e Sistemas Elétricos
Industriais

Orientador:
Luiz Eduardo Borges da Silva

Co-orientador:
Germano Lambert Torres

Itajubá, Fevereiro de 2002

Aos professores Luiz Carlos de Souza e Antônio Carlos de Souza
resultados deste trabalho.

Aos professores Germano e Paulo por terem me ajudado a resolver
diferentes problemas.

Aos meus pais que sempre me incentivaram a estudar e a buscar
melhores resultados.

Aos amigos do Programa de Pós-graduação em Física, especialmente
Cláudia Assunção, André Bertalmio e outros.

Ao Sérgio Alexandre por ter me ajudado a resolver alguns
problemas.

Aos professores Paulo, Sérgio, Antônio Carlos de Souza,
Dante, Valério e Raul por terem me ajudado a resolver alguns
problemas.

A Deus que sempre me ajudou.

À minha querida esposa Joana e ao
meu filho Paulinho

Agradecimentos

Ao professor Luiz Eduardo pela orientação, incentivo e amizade que resultaram deste trabalho.

Ao professor Germano pela co-orientação e apoio para solução dos mais diferentes problemas.

Aos meus pais que sempre me incentivaram e apoiaram minhas decisões, torcendo pelo meu sucesso.

Aos amigos do Programa Especial de Treinamento (PET), Frederico de Oliveira Assunção, André Bertolini e Vagner Lúcio pelos trabalhos realizados.

Ao amigo Alexandre Aoki pelo inestimável apoio.

Aos professores Pontin, Márcio Tadeu, Ricardo Damião, Antônio Tadeu, Cortez, Valberto e Rezek pela colaboração neste trabalho.

A Deus que sempre me ilumina no momento certo.

Agradecimentos	iii
Sumário	iv
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 _ Considerações Iniciais	1
1.2 _ Objetivo	3
1.3 _ Motivação	3
1.4 _ Organização da Dissertação.....	3
CAPÍTULO 2	5
MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	5
2.1 _ Introdução	5
2.2 _ Classificação das Atividades de Manutenção	6
2.3 _ Anormalidades em Motores de Indução Trifásicos.....	7
2.3.1 _ A Relação entre Especificação da máquina e o Mecanismo de Falha	8
2.3.2 – Falhas do Estator, Rotor e Mancais de Motores de Indução Trifásicos	10
2.4 – Elementos de um Sistema de Monitoração para Manutenção Preditiva.....	12
2.5 – Principais Técnicas de Manutenção Preditiva.....	15
2.5.1 – Técnicas Químicas para Monitoração	15
2.5.1.1 – Detectando a Degradação do isolamento.....	15
2.5.1.2 – Detectando a degradação do Rolamento e Óleo lubrificante.....	16
2.5.2 – Análise de Vibração	17
2.5.2.1 – A Monitoração da Vibração	18
2.5.3 – Monitoração Térmica	21
2.5.4 – Monitoração do Espectro de Corrente do Estator.....	22
CAPÍTULO 3	23
O PROCESSAMENTO DIGITAL DO SINAL	23
3.1 _ Fast Fourier Transform [B8].....	23
3.1.1 _ Notação e Formato da DFT Real	23
3.1.2 _ Variável Independente do Domínio da Freqüência.....	24
3.1.3 _ Funções Fundamentais da DFT.....	26
3.1.4 _ Cálculo da DFT Inversa	26
3.1.5 _ Cálculo da DFT Direta.....	28
3.1.6 _ Notação Polar	33

3.1.7 _ Propriedades da Transformada de Fourier Discreta.....	35
3.1.7.1 – Linearidade	35
3.1.7.2 – Características da Fase	36
3.1.7.3 – Natureza Periódica da DFT	36
3.1.8 _ Análise Espectral de Sinais.....	38
3.1.9 _ A FFT no Sistema de Monitoração Proposto.....	41
CAPÍTULO 4.....	42
ANÁLISE DE FALHAS ATRAVÉS DA CORRENTE DO ESTATOR	42
4.1 _ Introdução	42
4.2 _ Falhas Mecânicas a Serem Diagnosticadas	43
4.3 _ Considerações Relevantes	55
CAPÍTULO 5.....	58
O SISTEMA DE MONITORAÇÃO PROPOSTO	58
5.1 _ Introdução	58
5.2 _ O Sistema de Monitoração	59
5.2.1 _ O Hardware Utilizado	59
5.2.2 _ O Programa Desenvolvido	63
5.3 _ Considerações Finais	65
CAPÍTULO 6.....	67
RESULTADOS.....	67
6.1 _ Considerações Iniciais.....	67
6.2 _ A Montagem Utilizada em Laboratório.....	68
6.3 _ Identificação de Falhas Mecânicas em Motores de Indução Trifásicos Conectados Diretamente à Rede	69
6.3.1 _ Excentricidade do <i>Air-gap</i>	69
6.3.1.1 – Desalinhamento Horizontal	70
6.3.1.2 – Desalinhamento Vertical	74
6.3.1.3 – Considerações sobre o Ensaio.....	76
6.3.2 _ Desbalanceamento de Carga.....	78
6.3.2.1 – Considerações sobre o Ensaio.....	81
6.3.3 _ Quebra de Barras	82
6.3.3.1 – Considerações sobre o Ensaio.....	87
6.3.4 _ Defeitos no Rolamento.....	87
6.3.4.1 – Considerações sobre o Ensaio.....	92
CAPÍTULO 7.....	93
CONCLUSÃO.....	93
7.1 _ Trabalhos Futuros.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

Resumo

Atualmente existe uma grande preocupação com a redução dos custos de produção e aumento da produtividade no setor industrial. Além disso, a confiabilidade dos equipamentos que compõem o processo produtivo ganha cada vez mais importância nas indústrias. Isso é decorrência da nova realidade global que não permite desperdício e comprometimento da qualidade do produto final. Visando atender a essa nova tendência mundial, muitas empresas têm buscado aumentar a confiabilidade de seu processo produtivo através de novas técnicas de manutenção.

O grande destaque do momento são as técnicas de manutenção preditiva. Essas técnicas consistem na utilização de sistemas de monitoramento contínuo do equipamento, e se justificam na presença de falhas, em geral aleatórias, de equipamentos complexos com número elevado de componentes. Normalmente, essas falhas têm conseqüências econômicas ou humanas graves. A manutenção preditiva é baseada numa análise dos dados fornecidos pelo sistema de monitoração contínua do estado do equipamento para se definir se uma manutenção é necessária ou não.

Como os motores de indução trifásicos são, muitas vezes, componentes críticos de muitos processos industriais, eles merecem uma atenção especial por parte do departamento de manutenção da planta. Este trabalho consiste na aplicação de uma das técnicas de manutenção preditiva existentes para motores de indução. A técnica escolhida é a análise do espectro da corrente de uma das fases do estator. A escolha por esta técnica se deve ao destaque que a mesma vem tendo em publicações internacionais e também as vantagens obtidas com a utilização do método.

O sistema de monitoração desenvolvido neste trabalho é dividido em quatro partes:

- Aquisição do sinal de corrente de uma das fases do estator;
- Tratamento do sinal coletado, ou seja, amplificação, filtragem analógica, etc;
- Processamento digital do sinal;
- Apresentação dos dados de saída: espectros, freqüências de interesse, curvas de tendência, etc.

A ferramenta mais importante utilizada no processamento digital do sinal é a *Fast Fourier Transform* (FFT) e as freqüências características de falha já se encontram definidas nas publicações sobre o tema. Isto torna a técnica muito atraente para ser implementada.

Foram monitoradas as seguintes falhas mecânicas: excentricidade do *air-gap*, desbalanceamento da carga, quebra de barras, e falhas no rolamento. O sucesso dos testes realizados em laboratório comprovou a eficiência da técnica na monitoração da saúde de motores de indução trifásicos e abriu o caminho para diversos estudos futuros.

Abstract

Nowadays there is great concern about the reduction of production costs and the increase of productivity in the industrial area. In addition, the reliability of the pieces of equipment that are part of the productive process becomes more and more important in industrial plants. This is result of the new global reality that doesn't permit waste and compromise in the quality of the final product. In order to keep up with this new global tendency, many companies have been trying to increase the reliability of their productive process through new maintenance techniques.

The highlights of the moment are predictive maintenance techniques. These techniques consist of using continuous monitoring systems. Their use is justified in the presence of general randomly failures of complex equipment with a large amount of components. Such failures usually have serious economical or human consequences. The predictive maintenance is based on analysis of data supplied by a continuous monitoring system. Depending on the condition of the equipment, some kind of corrective maintenance can be applied.

Since induction motors are often critical components in industrial process, they deserve special attention from the plant maintenance department. This work consists of applying a specific technique of predictive maintenance in three-phase-induction motors among several other existent techniques. The chosen technique is the stator current signature analysis to detect induction motor faults.

The choice of this approach stems from the success that it has been having in international publications and also from the advantages obtained with the use of this method.

The developed monitoring system in this work is divided in four parts:

- Acquisition of the stator one-phase current signal;
- Treatment of the acquired signal, e. g., amplification, analog filtering, etc;
- Digital signal processing;
- Presentation of the output data: spectrums, frequencies of interest, tendency graphs, etc.

The most important tool used in the digital signal processing is the Fast Fourier Transform (FFT). The characteristic frequencies of failures are very well known. All this makes this technique very attractive to be implemented and tested.

The following mechanical faults have been monitored: air gap eccentricity, load unbalances, broken bars, and bearings failures. The success of laboratory tests has confirmed the technique efficiency in monitoring the health of three-phase-induction motors and has opened the way to several future studies.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Estatística dos problemas em MIT	7
Figura 2.2: Estatística dos problemas no estator	8
Figura 2.3: Estatística dos problemas no rotor.....	8
Figura 2.4: Etapas de um Processo de Monitoração	12
Figura 2.5: Exemplo de um Sistema de Monitoração	14
Figura 3.1: Saída da DFT direta e inversa.....	24
Figura 3.2: Primeira forma de saída dos dados para o eixo das abscissas.....	24
Figura 3.3: Segunda forma de saída dos dados para o eixo das abscissas	25
Figura 3.4: Terceira forma de saída dos dados para o eixo das abscissas	25
Figura 3.5: Quarta forma de saída dos dados para o eixo das abscissas.....	25
Figura 3.6: Ajuste de Amplitude.....	27
Figura 3.7: DFT real x DFT complexa.....	29
Figura 3.8: Espectro de freqüência da DFT complexa.....	30
Figura 3.9: Elemento básico de cálculo da FFT	31
Figure 3.10: Decomposição de um sinal de 16 pontos.....	32
Figura 3.11: Exemplo do processo de síntese de uma FFT de 16 pontos.....	34
Figura 3.12: Propriedade da homogeneidade	35
Figura 3.13: Propriedade da superposição	35
Figura 3.14: Característica da fase	36
Figura 3.15: Sinal digital amostrado com N amostras.....	36
Figura 3.16: Periodicidade da DFT no domínio do tempo	37
Figura 3.17: Periodicidade da DFT no domínio da freqüência	37
Figura 3.18: Problema de resolução espectral.....	39
Figura 3.19: Comportamento do espectro na presença de freqüências sem raia espectral	40
Figura 3.20: Exemplo da aplicação de uma FFT com janelamento.....	40
Figura 4.1: Componentes que caracterizam a quebra de barras	45
Figura 4.2: Desalinhamento do rolamento	48
Figura 4.3: Dimensões envolvidas no cálculo das freqüências de falha	49
Figura 4.4: Partes componentes de um rolamento.....	49
Figura 4.5: Falha na pista externa.....	50
Figura 4.6: Falha na pista interna.....	51
Figura 4.7: Espectro simulado de falha em elemento rolante.....	53
Figura 4.8: Espectro simulado de falha na pista interna.....	54

Figura 4.9: Espectro simulado de falha na pista externa	54
Figura 4.10: Estimacão do escorregamento através da componente de excentricidade	57
Figura 5.1: Sistema para Monitoraco do Sinal de Corrente.....	59
Figura 5.2: Sonda Hall utilizada.....	61
Figura 5.3: Circuito Sallen-Key modificado.....	61
Figura 5.4: Algoritmo para cálculo do espectro de freqncia.....	64
Figura 5.5: Algoritmo para estimacão do escorregamento	65
Figura 5.6: Sistema portátil	66
Figura 5.7: Sistema em rede.....	66
Figura 6.1: Grupo motor-gerador utilizado nos ensaios	68
Figura 6.2: Esquema de ligaco	69
Figura 6.3: Laser acoplado a parte posterior do motor para garantir o aumento da severidade do desalinhamento	70
Figura 6.4: Procedimento para se determinar o grau de severidade do desalinhamento horizontal.....	71
Figura 6.5: Espectro de referência (motor "saudável").....	72
Figura 6.6: Espectro com desalinhamento horizontal de 1.36 mm (d_1).....	72
Figura 6.7: Espectro com desalinhamento horizontal de 2.18 mm (d_2).....	73
Figura 6.8: Espectro com desalinhamento horizontal de 2.73 mm (d_3).....	73
Figura 6.9: Procedimento para se determinar o grau de severidade do desalinhamento vertical	74
Figura 6.10: Espectro de referência (motor "saudável").....	75
Figura 6.11: Espectro com desalinhamento vertical de 2 mm (d_1)	75
Figura 6.12: Espectro com desalinhamento horizontal de 4 mm (d_2).....	76
Figura 6.13: Curva de tendência para o desalinhamento horizontal	77
Figura 6.14: Curva de tendência para o desalinhamento vertical.....	77
Figura 6.15: Disco com as três distâncias utilizadas para aumento da severidade da falha	78
Figura 6.16: Espectro de referência (motor "saudável").....	79
Figura 6.17: Espectro com desbalanceamento devido apenas ao disco	79
Figura 6.18: Espectro com desbalanceamento da massa M na distância 1 (M_1D_1)	80
Figura 6.19: Espectro com desbalanceamento da massa M na distância 2 (M_1D_2)	80
Figura 6.20: Espectro com desbalanceamento da massa M na distância 3 (M_1D_3)	81
Figura 6.21: Curva de tendência para o desbalanceamento de carga.....	82
Figura 6.22: Rotor com as barras em boas condies	83

Figura 6.23: Rotor com uma barra quebrada (equivalente ao primeiro grau de severidade imposto)	83
Figura 6.24: Espectro de referência (rotor sem barras quebradas).....	84
Figura 6.25: Espectro com rotor com uma barra quebrada	84
Figura 6.26: Espectro com rotor com duas barras quebradas	85
Figura 6.27: Zoom do espectro de referência (30~90 Hz).....	85
Figura 6.28: Zoom do espectro com rotor com uma barra quebrada (35~80 Hz)	86
Figura 6.29: Zoom do espectro com rotor com duas barras quebradas (35~85 Hz)	86
Figura 6.30: Curva de tendência para quebra de barras	87
Figura 6.31: Rolamento com furo na pista externa.....	88
Figura 6.32: Espectro da corrente com rolamento normal.....	90
Figura 6.33: Espectro da corrente com rolamento com furo na pista externa.....	90
Figura 6.34: Espectro da corrente com rolamento normal (Zoom de 100 a 165Hz).....	91
Figura 6.35: Espectro da corrente com rolamento com furo na pista externa (zoom de 100 a 165Hz).....	91
Figura 6.36: Curva de tendência para defeito na pista externa.....	92

.....	91
.....	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Freqüências vibracionais relacionadas às falhas específicas da máquina	20
Tabela 3.1: Operação de bit reverso	33
Tabela 5.1: Especificações da sonda PR200	60
Tabela 6.1: Freqüências de interesse e respectivas amplitudes respondendo ao mecanismo de falha de desalinhamento horizontal	74
Tabela 6.2: Freqüências de interesse e respectivas amplitudes respondendo ao mecanismo de falha de desalinhamento vertical.....	76
Tabela 6.3: Nível global da falha	77
Tabela 6.4: Freqüências de interesse e respectivas amplitudes respondendo ao mecanismo de falha de desbalanceamento de carga.....	81
Tabela 6.5: Nível global da falha de desbalanceamento.....	82
Tabela 6.6: Freqüências de interesse e respectivas amplitudes respondendo ao mecanismo de falha de quebra de barras	86
Tabela 6.7: Nível global da falha de barras quebradas.....	87
Tabela 6.8: Freqüências de interesse e respectivas amplitudes respondendo a defeito na pista externa.....	91
Tabela 6.9: Nível global da falha de defeito em rolamento.....	92

INTRODUÇÃO

1.1 _ Considerações Iniciais

Nos países de primeiro mundo, notadamente nos Estados Unidos, é bastante nítida a preocupação, que todos têm, em situar suas empresas no primeiro quartil, ou seja, entre as empresas excelentes ou melhores do mundo. Em conseqüência, a área de manutenção dessas empresas procura também a excelência. Não há empresa excelente sem que seus diversos segmentos também não o sejam [B1]. Essa consciência vem se disseminando e tornando realidade na maioria dos países industrializados do mundo.

Essa cultura da excelência na área de manutenção aliada as necessidades de redução dos custos de produção e aumento da produtividade fazem com que a confiabilidade do processo produtivo se torne cada vez mais importante, abrindo espaço para o aparecimento de novas técnicas de manutenção.

O grande destaque do momento são as técnicas de manutenção preditiva. Essas técnicas consistem na utilização de sistemas de monitoramento contínuo do equipamento, e se justificam na presença de falhas, em geral aleatórias, em equipamentos complexos com número elevado de componentes. Normalmente, essas falhas têm conseqüências econômicas ou humanas graves. A manutenção preditiva é baseada numa análise dos dados fornecidos pelo sistema de monitoração contínua do estado do equipamento para se definir se uma manutenção é necessária ou não [B2].

Como os motores de indução são as locomotivas das indústrias e são as máquinas elétricas mais largamente utilizadas [B3], esses motores merecem preocupações adicionais para aumentar a confiabilidade do processo produtivo. Com essa função, muitas técnicas têm sido desenvolvidas com o propósito de se monitorar *on-line* o comportamento e a performance do motor.

Dentre as técnicas de manutenção preditiva aplicadas a motores de indução trifásicos, uma vem obtendo destaque especial. É a técnica de análise do espectro da corrente de uma das fases do estator. Muitas são as vantagens de um sistema de manutenção preditiva que se utiliza desta técnica. Dentre elas se destacam:

- Análise de falhas através de técnicas não invasivas
- Aumento da vida útil da máquina

- Redução de manutenção corretiva
- Redução de paradas não-programadas de produção
- Redução do consumo de energia
- O equipamento de aquisição pode ser instalado no painel de alimentação, fazendo com que seja possível a monitoração de máquinas de difícil acesso
- Menor dificuldade na implementação de um sistema de diagnóstico automático de falhas baseado em técnicas de inteligência artificial, eliminando a necessidade de um especialista.

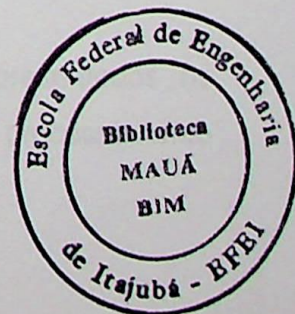
É importante ressaltar que as duas últimas vantagens se referem apenas a técnica de análise do espectro da corrente do estator, enquanto que as demais vantagens são comuns a todas as técnicas de manutenção preditiva que não necessitam de acesso ao interior da máquina.

Este trabalho consiste na implementação da técnica de análise do espectro da corrente de uma das fases do estator, visando a elaboração futura de um sistema de monitoração *on-line* com diagnóstico automático. O sistema de monitoração desenvolvido neste trabalho é dividido em quatro partes:

- Aquisição do sinal de corrente de uma das fases do estator;
- Tratamento do sinal coletado, ou seja, amplificação, filtragem analógica, etc;
- Processamento digital do sinal: filtros digitais, FFT, etc;
- Apresentação dos dados de saída: espectros, freqüências de interesse, curvas de tendência, etc.

Por fim, um sistema de manutenção preditiva para MIT deve ser capaz de:

- Detectar a falha o mais cedo possível;
- Estabelecer os níveis de alarme para os quais o funcionamento da máquina deixa de ser seguro;
- Ser flexível para que novas entradas de dados sejam incorporadas ao sistema, permitindo que novas anomalias no funcionamento sejam detectadas.



1.2 _ Objetivo

O objetivo dessa dissertação é aplicar a técnica de análise do espectro da corrente de uma das fases do estator à manutenção preditiva de motores de indução trifásicos. Os resultados obtidos e o domínio da técnica deverão ser empregados em trabalhos futuros para a elaboração de um sistema completo de monitoração que cubra desde a aquisição do sinal até na classificação automática da falha através de um classificador robusto.

1.3 _ Motivação

O crescente interesse na utilização de técnicas de manutenção preditiva pela indústria vem despertando grande interesse da comunidade acadêmica para o estudo de novos métodos que auxiliem no diagnóstico de falhas ainda no início do processo de degeneração das máquinas. Isso abre um imenso campo de trabalho, pois muito ainda deve ser feito com o intuito de se atingir sistemas robustos que detectem e classifiquem corretamente o tipo de falha que vem se desenvolvendo no interior da máquina ou na carga a ela conectada.

1.4 _ Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em sete capítulos. O capítulo II descreve os tipos de manutenção existentes, as anormalidades mais comuns em motores de indução, os elementos que constituem um sistema de monitoração contínua, e as técnicas de manutenção preditiva mais comumente aplicadas.

No capítulo III, é apresentado um estudo da principal ferramenta utilizada no processamento digital do sinal coletado, a Fast Fourier Transform (FFT). Este estudo tem como principal finalidade oferecer ao leitor uma rápida fonte de consulta sobre algumas propriedades importantes da FFT como, por exemplo, sua natureza periódica, vetor frequência, ajuste de amplitude, etc.

O capítulo IV apresenta os tipos de falhas mecânicas a serem monitoradas e as frequências características dessas falhas. O mecanismo de falha e suas principais características também são descritos neste capítulo.

O capítulo V traz o sistema de monitoração proposto. São apresentados os componentes de hardware utilizados e os algoritmos dos programas de processamento digital do sinal usados para se obter os resultados de interesse.

O capítulo VI traz todos os ensaios realizados, apresentando os resultados obtidos através dos espectros de frequência, curvas de tendência, etc. Este capítulo traz também todas as características do processo de falha observadas durante os ensaios.

O capítulo VII apresenta as conclusões e discussão de trabalhos futuros que poderiam orientar novas pesquisas que possam dar continuidade aos resultados obtidos nessa dissertação.

Os motores de tração são muito usados, especialmente através de muitos processos industriais. Devido a essa característica, eles recebem uma atenção especial por parte do departamento de manutenção de planta. Este capítulo pretende relacionar conceitos de manutenção preditiva visando a melhor manutenção de estado do motor e, conseqüentemente, o aumento da produtividade da unidade de produção e de vida útil da máquina.

2.1 - Introdução

Os motores são o centro de muitos dos processos de produção. Por isso vários métodos foram desenvolvidos e aplicados para manter a confiabilidade do processo produtivo. Com essa função, muitas técnicas têm sido desenvolvidas com o objetivo de se monitorar on-line o comportamento e a performance do motor.

Entende-se por monitoração de condição de máquinas elétricas o processo contínuo de avaliação de estado do equipamento durante toda sua vida útil. A principal função de um sistema de monitoração preditiva é reconhecer o desenvolvimento de falhas ainda em um estado inicial. Quanto mais cedo for a detecção da falha, mais fácil será o departamento de manutenção agendar uma parada programada para a correção do problema.

O processo de monitoração contínua de condição de máquinas elétricas visa para o processo de produção traz benefícios significativos para a empresa. Os principais benefícios são: maior eficiência do processo produtivo, redução das perdas por paradas não-programadas, aumento da vida útil do equipamento, e eliminação de um histórico de falhas.

Um sistema de monitoração também deve monitorar constantemente sua própria condição de manutenção, informações necessárias para a tomada de decisões. Os parâmetros que costumam ser monitorados são:

- Tensão e corrente do estator;
- Temperatura do núcleo;
- Nível de vibração;

MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os motores de indução são, muitas vezes, componentes críticos de muitos processos industriais. Devido a essa característica, eles merecem uma atenção especial por parte do departamento de manutenção da planta. Este capítulo pretende relacionar conceitos de manutenção preditiva, visando a melhor monitoração da saúde do motor e, conseqüentemente, o aumento da produtividade do processo de produção e da vida útil da máquina.

2.1 _ Introdução

Os motores são o centro da maioria dos processos de produção. Por isso essas máquinas merecem preocupações adicionais para aumentar a confiabilidade do processo produtivo. Com essa função, muitas técnicas têm sido desenvolvidas com o propósito de se monitorar *on-line* o comportamento e a performance do motor.

Entende-se por monitoração da condição de máquinas elétricas o processo contínuo de avaliação da saúde do equipamento durante toda sua vida útil. A principal função de um sistema de monitoração preditivo é reconhecer o desenvolvimento de falhas ainda em um estado inicial. Quanto mais prematura for a detecção da falha, mais fácil para o departamento de manutenção agendar uma parada programada para a correção do problema.

O processo de monitoração contínua da condição de máquinas elétricas vitais para o processo de produção traz benefícios significantes para a empresa. Os principais benefícios são: maior eficiência do processo produtivo, redução das perdas por paradas não-programadas, aumento da vida útil do equipamento, e criação de um histórico de falhas.

Um sistema de monitoração contínua deve monitorar parâmetros que propiciem à equipe de manutenção, informações confiáveis para a tomada de decisões. Os parâmetros mais comumente monitorados são:

- Tensão e corrente do estator;
- Temperatura do núcleo;
- Nível de vibração;

- Potência instantânea;
- Nível de contaminação nos lubrificante do rolamento;
- Velocidade de rotação;
- Fluxo de fuga;
- Outras técnicas.

Desta forma, pode-se notar que esta área da tecnologia exige conhecimentos do funcionamento de máquinas elétricas, instrumentação, microprocessadores, processamento de sinal, análise de materiais, análise química, análise de vibrações, etc.

2.2 _ Classificação das Atividades de Manutenção

O termo manutenção entendido como a ação de reparar ou executar serviços em equipamentos e sistemas, pode ter suas atividades classificadas em quatro grupos principais:

- a) Manutenção corretiva:** é a forma mais primária de manutenção, pois só é realizada após a ocorrência do defeito, que de uma forma geral, torna o equipamento indisponível para uso. As desvantagens oriundas deste tipo de manutenção são evidentes. Como exemplos, pode-se citar a ocorrência sistemática de paradas não-programadas; menor tempo de vida útil para a máquina que apenas recebe este tipo de manutenção; maior consumo de energia, já que com a presença da falha o motor necessita de mais corrente para manter o torque constante; etc.
- b) Manutenção preventiva:** é o nome que se dá ao conjunto de ações desenvolvidas com o intuito de se evitar a ocorrência de condições insatisfatórias, e conseqüentemente, se reduzir o número de ações corretivas. Ao se elaborar um plano de manutenção preventiva deve-se criar um conjunto de medições tecnicamente adequadas e selecionadas visando a confiabilidade e o custo do programa. O programa de manutenção preventiva pode ainda optar por três tipos de atividades:
 - Monitoramento contínuo;
 - Medições periódicas;
 - Técnicas preditivas.

c) **Manutenção preditiva:** como deve ter sido observado, a manutenção preditiva pode ser vista como uma sub-área da manutenção preventiva. Contudo, a manutenção preditiva apresenta características próprias como:

- Apoio em técnicas não invasivas, ou seja, não é necessário parar a operação da máquina para sua aplicação;
- Eliminação de manutenção corretiva;
- Não consideração de informações como a durabilidade de componentes;
- Pode ser efetuada através de técnicas *on-line* ou *off-line*.

d) **Manutenção sistemática:** caracterizada pela substituição de componentes dos equipamentos ou pela substituição do equipamento como um todo [B4].

2.3 _ Anormalidades em Motores de Indução Trifásicos

Os maiores focos de problemas em motores de indução trifásicos estão no estator e nos mancais. As principais causas são: sobreaquecimento, falhas no isolamento, quebras mecânicas e faltas elétricas. A figura 2.1 apresenta a divisão percentual das falhas em motores de indução trifásicos gaiola com potência de 100 HP ou maiores [B3]:

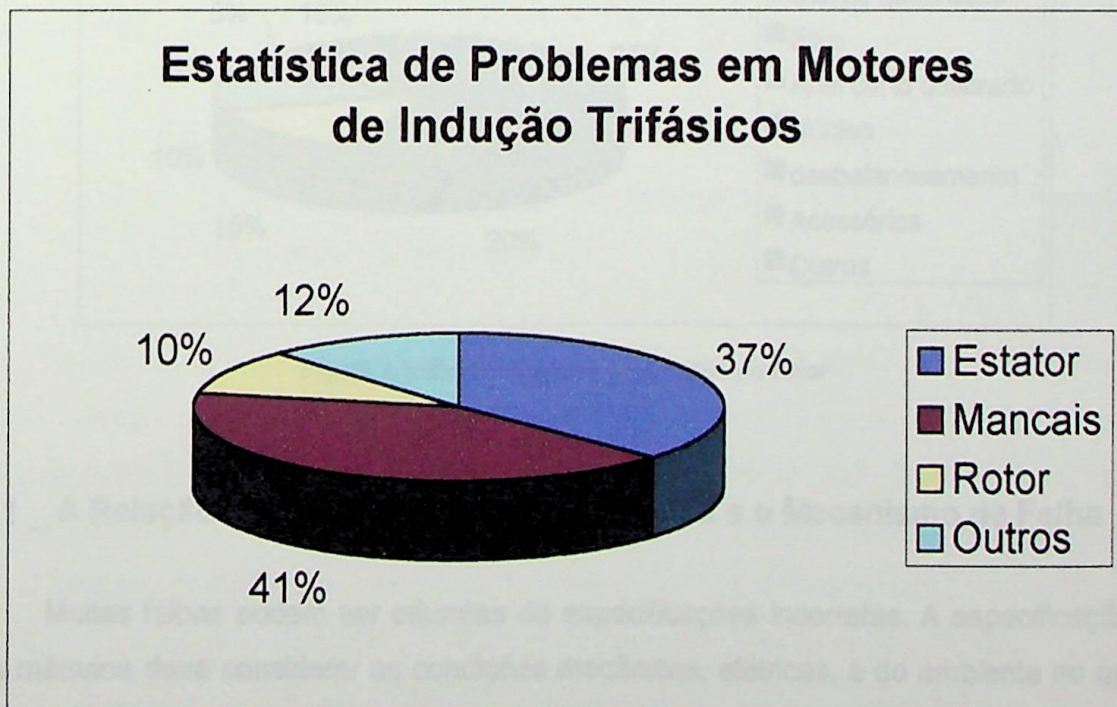


Figura 2.1: Estatística dos problemas em MIT

Os problemas decorrentes do estator, que totalizam 37% do total de falhas em motores de indução trifásicos, podem ser detalhados como apresentado na figura 2.2.

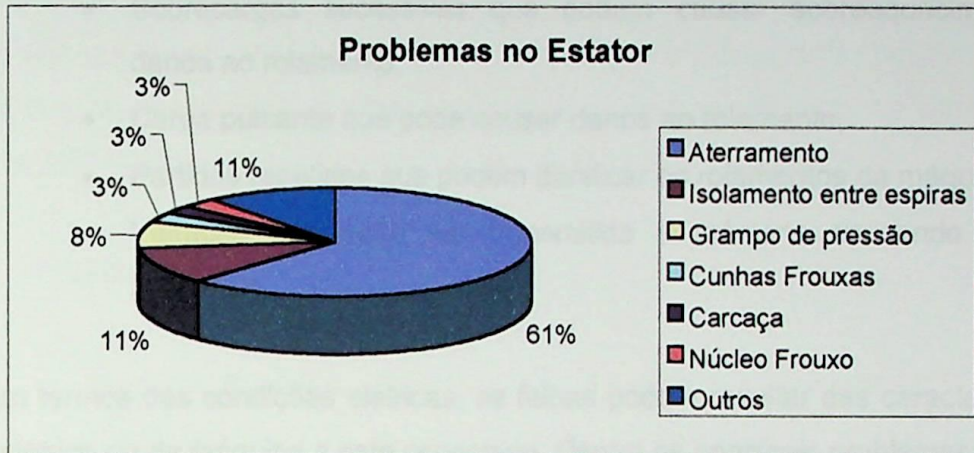


Figura 2.2: Estatística dos problemas no estator

Já os problemas decorrentes do rotor, que totalizam 10% do total de falhas em motores de indução trifásicos, podem ser detalhados como apresentado na figura 2.3.

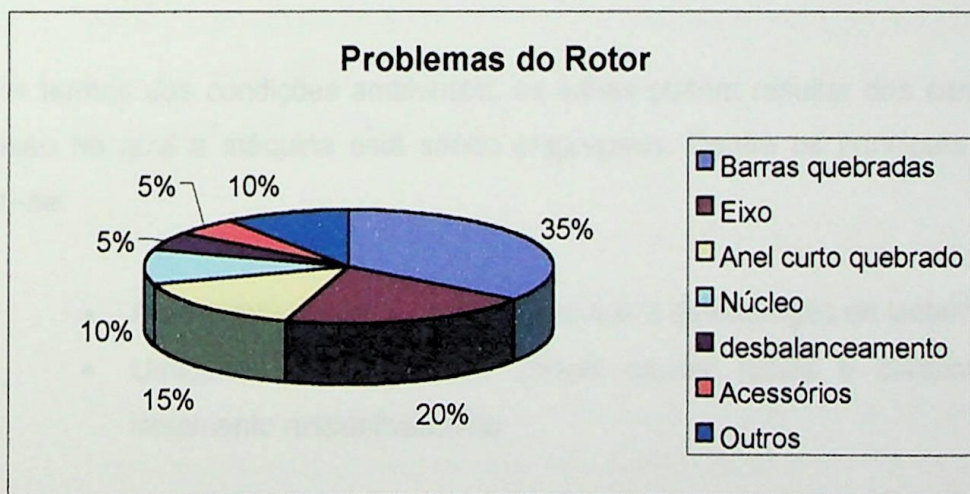


Figura 2.3: Estatística dos problemas no rotor

2.3.1 _ A Relação entre Especificação da máquina e o Mecanismo de Falha

Muitas falhas podem ser oriundas de especificações incorretas. A especificação de uma máquina deve considerar as condições mecânicas, elétricas, e do ambiente no qual a máquina vai trabalhar. A necessidade de monitoração e os parâmetros a serem monitorados serão afetados por estas condições operacionais.

Em termos das condições mecânicas, as falhas aparecerão como resultado do comportamento da carga. Dentre os principais problemas destacam-se:

- Sobrecargas sucessivas que podem causar sobreaquecimento e/ou danos ao rolamento;
- Carga pulsante que pode causar danos ao rolamento;
- Partidas repetidas que podem danificar os rolamentos da máquina;
- Vibração que pode ser transmitida à máquina causando danos ao rolamento.

Em termos das condições elétricas, as falhas podem resultar das características do sistema elétrico ou da máquina a este conectada. Dentre os principais problemas destacam-se:

- Flutuações lentas de tensão podendo causar perda de potência e parada da máquina.
- Flutuações bruscas de tensão podendo causar falhas no isolamento.

Em termos das condições ambientais, as falhas podem resultar das características do processo no qual a máquina está sendo empregada. Dentre os principais problemas destacam-se:

- Altas temperaturas que podem causar a deterioração de isolamento.
- Umidade e poluição que podem causar falhas e contaminação do isolamento respectivamente.

Assim, percebe-se que as falhas que ocorrem em máquinas elétricas dependem do tipo de máquina e do ambiente em que ela está trabalhando. O que é realmente importante observar é que o mecanismo de falha acontece de modo progressivo, partindo de um defeito inicial e chegando a falha propriamente dita. O tempo de propagação da falha depende de vários fatores. Contudo, a maioria das falhas apresenta indicadores iniciais de suas presenças e é justamente nessas indicações iniciais que a manutenção preditiva deve atuar [B5].

2.3.2 – Falhas do Estator, Rotor e Mancais de Motores de Indução Trifásicos

A estatística apresentada na seção 2.3 mostra que o percentual de falha devido a problemas no estator, rotor e mancais totaliza 88% das falhas em motores de indução trifásicos. Por esta razão, analisam-se algumas das anormalidades mais comuns, bem como seus efeitos e causas básicas. É importante ressaltar que a maioria dessas falhas pode ser prevista através de um sistema de manutenção preditiva adequado.

i) **Problemas no Estator:**

- Aterramento: como apresentado na figura 2.2, o aterramento é a principal causa de danos ao estator. O termo aterramento se refere ao contato do condutor, que perdeu seu isolamento, com o núcleo ou a carcaça. Este tipo de problema ocorre normalmente na saída da ranhura devido ao desgaste do isolante em função da movimentação da cabeça de bobina.
- Queima generalizada: a queima das três fases dos enrolamentos do estator se deve basicamente a sobrecorrentes que levam ao superaquecimento dos enrolamentos. Essas sobrecorrentes são decorrentes de sobrecarga, ligação incorreta e sub ou sobretensões.
- Falta de fase: a ausência de corrente em uma das fases faz com que circule uma elevada corrente nas fases remanescentes, levando-as à queima.
- Tensões desbalanceadas: vários são os efeitos adversos provocados pela presença de tensões desbalanceadas. O efeito mais evidente é a deformação do campo girante. Ou seja, há o aparecimento de um desbalanceamento magnético produzindo esforços mecânicos sobre o eixo e o surgimento de vibrações, ruídos, batimento, desgaste e aquecimento excessivo dos mancais. Além disso, podem aparecer correntes parasitas circulando pelo sistema eixo-mancais-terra. Como resultados da presença de tensões desbalanceadas tem-se o aumento significativo das perdas, diminuição do rendimento, superaquecimento, e até queima de fases.
- Falha no Isolamento: curtos-circuitos internos ocorrem normalmente em função da existência de pontos onde a isolação se apresenta mais vulnerável,

havendo o contato entre dois desses condutores. Se a intensidade do curto for elevada, torna-se mais fácil a percepção do problema, já que as correntes das três fases se desequilibrarão levando a ovalização do campo e ao conseqüente aumento do nível vibracional. Por outro lado, se a intensidade do curto for reduzida, atingindo um pequeno número de espiras, as impedâncias das fases não se alterarão consideravelmente, podendo deixar oculto o defeito para o sistema de proteção.

- Outros problemas: podem resultar de condições ambientes e de instalação incorretas que levam ao aquecimento excessivo dos enrolamentos, ou ainda, serem decorrentes de vibrações excessivas e curtos-circuitos externos à máquina.

ii) **Problemas no Rotor em gaiola:**

Como apresentado na figura 2.3, barras quebradas ou trincadas constituem o principal tipo de falha em rotores tipo gaiola e é normalmente decorrente de sobreaquecimento ou esforços mecânicos. A quebra de barras resulta em um desbalanceamento do rotor, gerando vibrações e ruído.

É importante ressaltar que este tipo de falha ocorre geralmente em gaiolas de alumínio fundidas em molde ou sob pressão.

iii) **Problemas nos Mancais:**

Os problemas em mancais são responsáveis pelo maior percentual de falha em motores de indução trifásicos.

Os mancais de rolamento podem apresentar vários problemas e normalmente é difícil se determinar a causa real da falha já que muitos fatores inter-relacionados atuam. Os problemas mais comuns são:

- Arranhamento, ou seja, aparecimento de riscos nas superfícies das pistas, na face terminal do rolo, na nervura cicloidal de guia, etc.
- Desgaste das superfícies de atrito e aparecimento de dentes nas superfícies das pistas.
- Quebra do retentor, desgaste da guia, e afrouxamento ou quebra do rebite;

- Corrosão elétrica, ou seja, as superfícies apresentam manchas visíveis e a evolução do problema leva a uma superfície corrugada. A causa desse problema está no fato da corrente elétrica atravessar o rolamento, gerando faíscas e fundindo a superfície da pista.
- Desalinhamento da pista.
- Ferrugem e corrosão.
- Incrustação, ou seja, aderência de pequenas partículas tornando a superfície áspera.
- Divisões e trincas em anéis de rolamento e elementos de rolagem.
- Etc [B4].

2.4 – Elementos de um Sistema de Monitoração para Manutenção Preditiva

Um sistema de monitoração sofisticado pode executar a multiplexação de entradas de centenas de sensores, e executar operações matemáticas e de diagnóstico complicadíssimas para processar os dados colhidos. Atualmente, o diagnóstico é obtido, na maioria das vezes, através do emprego de técnicas de inteligência artificial.

Considerando as afirmações anteriores, pode-se dividir um sistema de monitoração em quatro principais etapas:

- Transdução dos sinais de interesse;
- Aquisição dos dados;
- Processamento dos dados colhidos;
- Diagnóstico.

De uma forma esquemática tem-se:

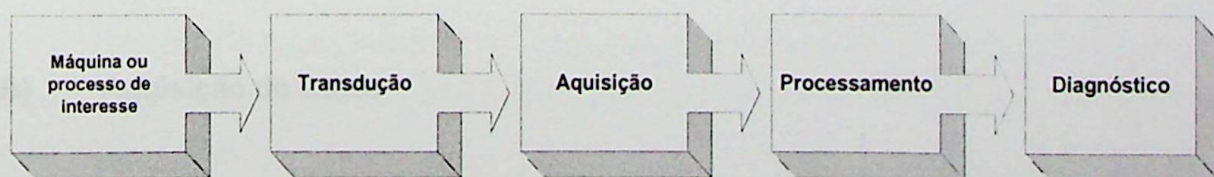


Figura 2.4: Etapas de um Processo de Monitoração

Seja cada uma das etapas do processo de monitoração:

A) Transdução

Um transdutor é um equipamento que tem na sua entrada uma grandeza a ser monitorada (corrente, tensão, aceleração, temperatura, etc), enquanto que na sua saída há um sinal que será condicionado e enviado ao sistema de aquisição e processamento.

Os principais transdutores utilizados na monitoração de máquinas elétricas são:

- Para medição de temperatura: são três os métodos principais de medição de temperatura: termopar, termistor, e RTD (*Resistance Temperature Detection*).
- Para a medição de vibração: existem dois tipos de transdutores para a análise de vibração: os transdutores absolutos ou com contato e os relativos ou sem contato. Os transdutores absolutos medem o movimento real da máquina, enquanto que os relativos medem o movimento de um elemento da máquina em relação ao outro elemento. O acelerômetro é o principal e mais usado sensor absoluto existente no mercado.
- Para medição de força: usa-se um *strain gauge*, que é um dispositivo que compreende uma resistência que terá seu tamanho e área transversal modificados em função da aplicação de uma força. Logo, a força pode ser medida através da variação da resistência.
- Para medição de grandezas elétricas e magnéticas: as grandezas elétricas são medidas a partir dos transformadores de tensão e corrente que sempre estão presentes como parte do sistema de proteção. Contudo, pode ainda haver a necessidade de se medir a densidade de fluxo magnético na máquina, utilizando-se um dispositivo de efeito Hall.

B) Aquisição de dados

A aquisição de dados é uma etapa de fundamental importância, pois cabe a ela garantir a integridade e precisão dos dados coletados. A precisão dos dados exigida da aquisição é determinada pelas futuras manipulações matemáticas que serão aplicadas ao conjunto de dados. A coleta e a transmissão dos dados devem ser feitas de modo a minimizar ao máximo o efeito do ruído, tornando os dados bastante consistentes. Em sistemas complexos com muitas entradas, orienta-se que o sistema de processamento seja

remoto, isto é, localizado a uma certa distância do processo inspecionado. A figura 2.5 apresenta um exemplo onde vários motores estão sendo monitorados. Um grupo de máquinas adjacentes é conectado a um ponto de coleta de dados que digitaliza o sinal e envia para a central remota de processamento e diagnóstico.

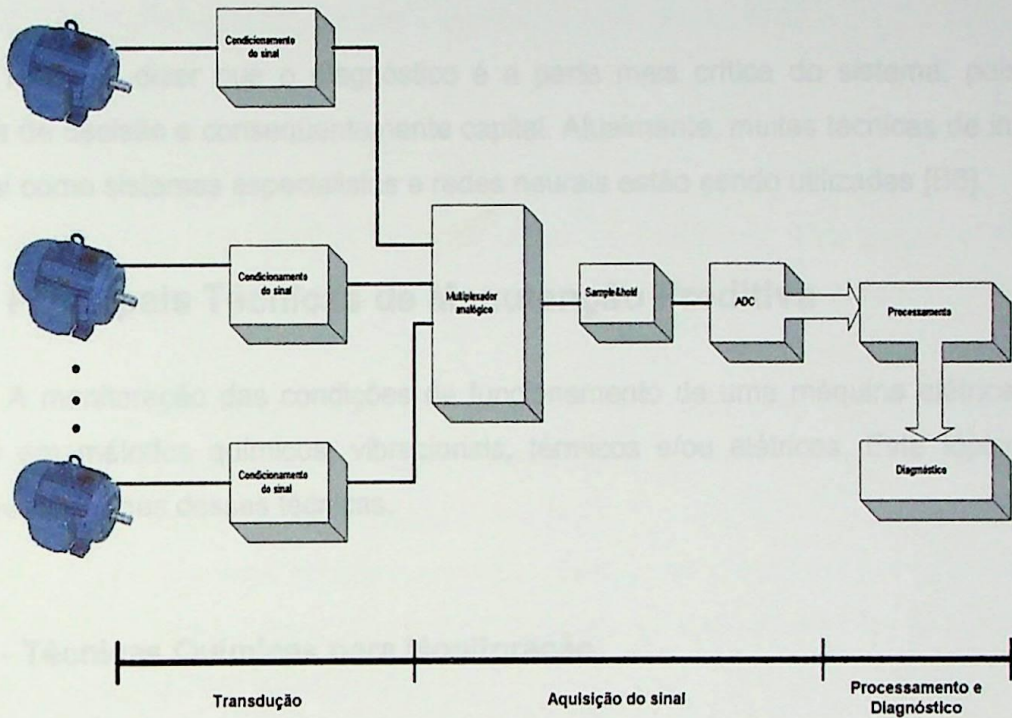


Figura 2.5: Exemplo de um Sistema de Monitoração

O multiplexador é essencial quando um grande número de canais deve ser monitorado. Além disso, ele também é recomendado para um pequeno número de canais, já que permite o uso de apenas um conversor A/D. Já o conversor A/D é o coração do sistema de aquisição e deve ser especificado em função do tempo de conversão e precisão.

C) Processamento

A tarefa do processamento deve ser a de pegar os dados coletados e manipulá-los e/ou transformá-los, visando o entendimento desses pelo sistema de diagnóstico de forma mais rápida e fácil.

O processamento pode ser feito *on-line* ou *off-line*. A escolha depende do processo que está sendo monitorado e da velocidade com que as características de interesse desse processo se modificam.

Existem diversas técnicas de processamento usadas para monitorar máquinas elétricas. A mais simples delas é a que examina a amplitude do sinal de entrada da função no tempo, comparando-a com um valor pré-determinado. Além disso, existem outras

técnicas mais elaboradas que ganharam espaço graças ao avanço conseguido pelos computadores tais como análise espectral, correlação, médias, análise cepstral, envoltória, etc.

D) Diagnóstico

Pode-se dizer que o diagnóstico é a parte mais crítica do sistema, pois envolve tomada de decisão e conseqüentemente capital. Atualmente, muitas técnicas de inteligência artificial como sistemas especialistas e redes neurais estão sendo utilizadas [B6].

2.5 – Principais Técnicas de Manutenção Preditiva

A monitoração das condições de funcionamento de uma máquina elétrica pode se basear em métodos químicos, vibracionais, térmicos e/ou elétricos. Este tópico procura descrever algumas dessas técnicas.

2.5.1 – Técnicas Químicas para Monitoração

Materiais isolantes e óleos lubrificantes são complexos orgânicos que se degradam pelo calor ou ação elétrica, produzindo vários produtos químicos nos estados sólido, líquido e gasoso. Os óleos lubrificantes possuem além dos produtos da própria degradação, resíduos do desgaste do rolamento e partículas externas. A técnica que mede a degradação desses elementos deve analisar a concentração desses produtos químicos no seu estado apropriado e na localização mais conveniente da máquina.

2.5.1.1 – Detectando a Degradação do isolamento

A degradação do isolamento de máquinas elétricas pode ser monitorada quimicamente detectando-se elementos particulares no gás refrigerante ou detectando-se a presença de gases simples como monóxido de carbono ou ozônio, ou gases mais complexos como etileno e acetileno.

A) Monitoração por câmaras de detecção:

Chama-se de *smoke* as partículas resultantes da condensação do vapor que deixa a área aquecida. Este vapor é resultado da degradação térmica do isolamento, ou seja, à

medida que a temperatura do isolamento aumenta além dos valores permitidos, alguns componentes atingem seu ponto de ebulição, havendo a formação de gases. A detecção desse *smoke* aparece como método mais simples de detecção. Os detectores de *smoke* usados nessa técnica se utilizam de câmaras de íons para detectar partículas nesse *smoke*. O principal problema dessa técnica é que a monitoração não é específica, ou seja, não é possível fazer a distinção dos materiais que foram sobreaquecidos.

B) Análise Química:

Existem técnicas destinadas a identificar as partículas e/ou gases presentes no *smoke*. Na distinção de partículas, dois métodos principais foram propostos:

- Análise cromatográfica do *smoke*: seus principais problemas são o grande número de diferentes compostos orgânicos e a dificuldade de se interpretar o resultado
- Técnicas menos sensíveis como o emprego de luz ultravioleta, que produz resultados menos complexos e conseqüentemente mais fáceis de serem interpretados.

Já os métodos de análise do gás podem ser para análise *on-line* ou *off-line*. Na análise *off-line*, amostras do gás são tomadas em intervalos regulares. Quando a concentração de produtos orgânicos do gás for maior que o nível de alarme estabelecido, a máquina é desligada para reparo. É importante ressaltar que a análise do gás pode ser usada como alternativa na detecção de partículas. Na análise *on-line*, pode-se conseguir um indicativo de falha mais cedo, pois o gás está sendo analisado continuamente. Contudo, a complexidade do equipamento de análise química contínua do gás é muito alta.

2.5.1.2 – Detectando a degradação do Rolamento e Óleo lubrificante

Nas máquinas que usam rolamentos com elementos rolantes lubrificadas a óleo e nas máquinas que necessitam de rolamentos com alimentação contínua de óleo, a monitoração contínua dessa alimentação de óleo pode advertir sobre falhas incipientes no óleo ou no rolamento.

O processo de falha comum em elementos rolantes é o de quebra por fadiga. Contudo outros problemas como abrasão ou desgaste podem ocorrer. Danos ao rolamento também podem acontecer quando pequenas descargas ocorrem em função da ruptura

momentânea do filme de óleo ou devido à sobrecarga transitória do rolamento. Muitas dessas falhas podem ser detectadas pela análise do óleo lubrificante. Para se detectar essas falhas deve-se investigar no óleo a presença de produtos da degradação do próprio óleo ou da degradação do rolamento.

Na detecção de falhas no rolamento, deve-se ter em mente que a alimentação do óleo para o rolamento é feita por um sistema de lubrificação em malha fechada que contém um equipamento de filtragem. Esse equipamento removerá uma quantidade de fragmentos toda vez que um problema ocorrer com o rolamento. A análise é feita sobre esses fragmentos [B6].

2.5.2 – Análise de Vibração

Vibração pode ser definida como a oscilação de um corpo em torno de uma posição de referência. Trata-se freqüentemente de um processo destrutivo, ocasionando falhas nos elementos das máquinas por fadiga. Além disso, a vibração é a resposta às forças dinâmicas que atuam na máquina, que por sua vez, vibra em várias freqüências que se propagam por toda a máquina. Estas freqüências podem ser identificadas e, na maioria das vezes, relacionadas a um tipo de falha.

A análise de sinais de vibração pode acusar eventuais problemas em uma máquina e orientar sobre a execução ou não de manutenção na mesma. Toda máquina apresenta ruído e vibração devido à própria operação e excitações externas. Contudo, uma parcela das vibrações se deve a pequenos defeitos que comprometem a performance do equipamento. O aumento do nível de vibração é reflexo do agravamento do defeito.

O que faz da análise de vibrações um processo eficiente é que cada elemento da máquina induz uma excitação própria, gerando formas específicas de vibração. É justamente por essa razão que os defeitos nesses elementos podem ser detectados.

Efetuar a medição de vibração é uma tarefa que requer uma série de cuidados, pois engloba um grande conjunto de conceitos e regras práticas, exigindo uma certa experiência do técnico encarregado pela medição. Sejam alguns desses conceitos:

- i) Escolha do ponto de medida: primeiramente é necessário saber o que se deseja medir, ou seja, quais são os componentes internos mais problemáticos. Solucionado este problema, deve-se agora buscar um ponto externo acessível durante o funcionamento da máquina que seja portador das informações desejadas. Isto porque a trajetória de vibração da fonte ao ponto de medição deve ser a mais sólida e curta possível, garantindo a fidelidade da transmissão.

Normalmente, pontos de medição são marcados nas máquinas para permitir comparação entre as sucessivas medições, pois pontos diferentes de medição podem ter vibrações com características diferentes.

- ii) Escolha dos parâmetros a medir: o movimento vibratório pode ser expresso na forma de deslocamento, velocidade ou aceleração. Evidentemente, cada um desses parâmetros tem sua utilidade dentro da análise vibracional. Por exemplo, na análise do espectro de vibração se utiliza o espectro de deslocamento quando o interesse é por falhas de componentes de frequência mais baixas. Quando se deseja observar um espectro mais equilibrado, procurando medir eventuais problemas em qualquer frequência, se utiliza o espectro de velocidade. Por fim, quando se deseja que as componentes de frequências mais altas tenham um maior destaque ou maior influência na análise global, utiliza-se o espectro de aceleração.

- iii) Instrumentação: são encontrados no mercado diversos tipos de instrumentos para a aquisição e análise do sinal de vibração. As opções vão de aparelhos extremamente simples a sistemas computadorizados com várias ferramentas de análise. A escolha da instrumentação a ser utilizada deve levar em consideração o ambiente (temperatura, contaminação, umidade, campo magnético, etc), o nível da equipe que executa o trabalho, e a importância da medida.

2.5.2.1 – A Monitoração da Vibração

Várias são as formas de monitoração da condição de máquinas rotativas utilizando análise de vibração. Neste texto destacam-se: monitoração do nível global e monitoração do espectro de frequência.

A) Monitoração do nível global:

Esta é a forma mais simples de monitoração da “saúde” de máquinas elétricas. A única medida a ser efetuada é o valor RMS do nível de vibração sobre uma faixa de frequência pré-selecionada. Normalmente, o parâmetro escolhido é a velocidade de vibração e as faixas de frequência mais comuns são de 10 Hz a 1 kHz ou de 10 Hz a 10 kHz.

Com o passar dos anos, uma base estatística respeitável foi desenvolvida, propiciando o aparecimento das cartas de severidade, ou seja, tabelas que estabelecem os níveis de alarme ou as condições da máquina em função do nível de vibração medido.

É importante ressaltar que esta técnica não dá um diagnóstico detalhado, informando em que elemento da máquina ocorreu a falha, mas sim uma indicação da saúde geral da máquina. Outro ponto importante é a utilização da monitoração do nível global como um primeiro diagnóstico e depois fazer a análise espectral para se saber onde provavelmente a falha está se desenvolvendo.

Como se pôde observar, a força desta técnica está na sua simplicidade. Ela requer uma instrumentação simples, contudo uma alta demanda de pessoal técnico. A principal desvantagem é que a sensibilidade da técnica é baixa, comprometendo a detecção de falhas ainda no estágio inicial.

B) Monitoração do espectro de freqüência:

Esta é a principal técnica de detecção de falhas usando análise de vibração, principalmente após a sofisticação das técnicas e da instrumentação para análise espectral.

A análise espectral não identifica apenas a condição geral da máquina. Ela tem como objetivo apontar problemas específicos, sendo necessário investigar certas componentes de freqüência, ou até mesmo, certos grupos de freqüência. No caso particular de motores de indução, a resolução espectral deve ser bastante alta, pois a velocidade de rotação é bastante próxima da freqüência de alimentação. Isto faz com que as falhas apareçam com bandas laterais espaçadas de s ou $2s$ da freqüência de alimentação, onde s é o escorregamento da máquina.

O processo da análise espectral se inicia com a aquisição do sinal de vibração por intermédio de um acelerômetro. Este sinal, no domínio do tempo, será transformado para o domínio da freqüência realizando-se uma FFT (*Fast Fourier Transform*). Já no domínio da freqüência, analisa-se o sinal procurando pelos picos mais protuberantes que podem constituir um indicativo de falha de um elemento da máquina em particular. A tabela 2.1 apresenta as freqüências vibracionais relacionadas às falhas específicas da máquina [B7].

Natureza da Falha	Freqüência de vibração
Desbalanceamento do rotor	1xf _r
Desalinhamento do eixo	1xf _r , 2xf _r , 3xf _r , 4xf _r
Elementos de mancais de rolamentos com defeitos ou desgastados	<p>Pista externa:</p> $f_E = \frac{n}{2} \cdot f_{rm} \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \quad (2.1)$ <p>Pista interna:</p> $f_i = \frac{n}{2} \cdot f_{rm} \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \quad (2.2)$ <p>Elemento rolante</p> $f_{eg} = \frac{PD}{BD} \cdot f_{rm} \cdot \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right)^2 \right] \quad (2.3)$ <p>Onde: β = ângulo de contacto BD = diâmetro do elemento rolante PD = diâmetro primitivo n = número de elementos rolantes f_{rm} = freqüência relativa entre as pistas em Hz.</p>
Roçamento em mancais de deslizamento. Folgas em carcaças.	Sub-harmônicas da rotação do eixo: 1/2 e 1/3 de f _r
Rodopio ou chicoteamento do filme de óleo em mancais de deslizamento	Pouco menor que a rotação do eixo: 42% a 48%
Danos ou desgaste em engrenagens	$f_{eng} = f_r \cdot Z \cdot i \quad (2.4)$ <p>Onde: Z = número de dentes da engrenagem i = 1,2,3,4...</p>
Folgas mecânicas	$f_{fm} = i \cdot 2 \cdot f_r \quad (2.5)$ <p>1.2x, 2.5x, 3.5x</p> <p>Onde: i = 1, 2,3...</p>
Falhas em correias de acionamento	$f_{correia} = i \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60 \cdot L} \quad (2.6)$ <p>Onde: D = diâmetro da polia N =RPM da polia L = perímetro da correia i = 1, 2, 3 ...</p>
Vibrações induzidas por problemas elétricos	<p>1xf_r ix60 Hz; i = 2,3, ...</p> <p>No caso de motores de indução:</p> $f = i \cdot RPM \pm j \cdot s \quad (2.7)$ <p>Onde: s = escorregamento da máquina j = 2, 4, 6, ...</p>

Tabela 2.1: Freqüências vibracionais relacionadas às falhas específicas da máquina

2.5.3 – Monitoração Térmica

As máquinas elétricas possuem limites de temperatura, sendo que a máxima temperatura permitida é aquela que o isolamento pode suportar. A medição de temperatura desempenha um papel importante na monitoração de máquinas elétricas. Cita-se neste texto dois métodos de monitoração por temperatura.

A) Medição da temperatura local:

Esta técnica consiste em se monitorar a temperatura de certos pontos considerados pontos-chaves da máquina, através de detectores de temperatura colocados dentro do equipamento. Isto pode ser feito através de termopares ou RTD's, que com o propósito de se monitorar a parte ativa da máquina são geralmente instalados no enrolamento ou no núcleo do estator. Contudo, eles também podem estar localizados no rolamento. O ponto fraco dessa técnica está no fato de que os termopares e os RTD's não podem estar localizados no componente de temperatura mais elevada, o enrolamento de cobre, pois eles requerem isolamento elétrico. Assim, os sensores são colocados no isolamento ficando, às vezes, um pouco distante do cobre.

No caso específico de motores de indução, especialmente os grandes motores, torna-se interessante monitorar as condições tanto do estator como do rotor. Sob condições de parada, as perdas no rotor são bastante altas, e a temperatura pode atingir valores que podem danificar o isolamento do rotor. Se o motor parte e para repetidas vezes, pode ocorrer um enfraquecimento das barras e/ou anéis, podendo resultar em falhas mecânicas prematuras.

B) Medição de pontos quentes e *thermal images*:

A medição de temperatura local dá ao operador uma certa garantia de que ele realmente conhece a temperatura de alguns pontos-chaves da máquina, contudo sempre há uma certa incerteza quanto a localização dos sensores, isto é, se eles estão ou não localizados nos pontos mais quentes.

A técnica de *thermal image* encontrou bastante aplicação em transformadores e nem tanto para máquinas rotativas. Uma das propostas feitas para motores de indução consiste em ter-se o modelo térmico do motor em um microprocessador, alimentado com sinais proporcionais à temperatura ambiente e à corrente do estator. Desta forma, o modelo pode calcular a temperatura de uma variedade de pontos importantes da máquina [B6].

2.5.4 – Monitoração do Espectro de Corrente do Estator

Esta é a técnica de interesse para o trabalho em questão e por esta razão será tratada em detalhes nos próximos capítulos.

Diferentes são as técnicas de processamento de sinais empregadas com o objetivo de analisar e reconhecer uma possível falta presente no sinal de corrente do estator. Dentre as técnicas utilizadas neste trabalho destacam-se a FFT (Fast Fourier Transform) e a Transformada Digital. Este capítulo tem como principal finalidade esclarecer ao leitor uma rápida lista de consultas sobre algumas propriedades importantes da FFT como: por exemplo: sua natureza periódica, valor frequência, escala de amplitude, etc.

Fast Fourier Transform [88]

A FFT é o termo genérico que cobre diversos algoritmos para calcular transformadas. Entretanto, todos os algoritmos têm a mesma finalidade, isto é, calcular o espectro de saída de uma DFT (Discrete Fourier Transform). Desta forma, o estudo de qualquer algoritmo da FFT deve se iniciar pelo entendimento da transformada discreta de Fourier.

2.1.1 – Notação e Formato da DFT Real

Uma DFT real transforma um sinal de entrada de N pontos no domínio do tempo em um sinal de saída de $N/2 + 1$ pontos no domínio da frequência. Os pontos de saída representam as amplitudes das componentes senoidais e cosenoidais separadas de uma forma a ser discutida adiante. A figura 4.1 ilustra este processo.

Recomenda-se ainda que o número de amostras de entrada seja uma potência de dois. Os motivos são:

- O tamanho da amostra em termos de bits no fluxo amostrado representa dados digitais que se utilizam de empacotamento fixo;
- Os algoritmos de FFT normalmente trabalham com 2, sendo necessário de dois para acessar o processo de transformação;

O PROCESSAMENTO DIGITAL DO SINAL

Diversas são as técnicas de processamento de sinal empregadas com o objetivo de explicitar e reconhecer uma possível falha presente no sinal de corrente do estator. Dentre as técnicas utilizadas neste trabalho destacam-se a FFT (*Fast Fourier Transform*) e a filtragem digital. Este capítulo tem como principal finalidade oferecer ao leitor uma rápida fonte de consulta sobre algumas propriedades importantes da FFT como, por exemplo, sua natureza periódica, vetor freqüência, ajuste de amplitude, etc.

3.1 _ Fast Fourier Transform [B8]

FFT é o termo genérico que cobre diferentes algoritmos com diferentes características. Entretanto, todos os algoritmos têm a mesma finalidade, isto é, acelerar o cálculo de saída de uma DFT (*Discrete Fourier Transform*). Desta forma, o estudo de qualquer algoritmo de FFT deve se iniciar pelo entendimento da transformada discreta de Fourier.

3.1.1 _ Notação e Formato da DFT Real

Uma DFT real transforma um sinal de entrada de N pontos no domínio do tempo em dois sinais de saída de $N/2 + 1$ pontos no domínio da freqüência. Os sinais de saída contêm as amplitudes das componentes senoidais e co-senoidais escalonadas de uma forma a ser descrita adiante. A figura 4.1 ilustra este processo.

Recomenda-se ainda que o número de amostras da entrada (N) seja uma potência de dois. Os motivos são:

- O tamanho da amostra em potência de dois facilita o armazenamento de dados digitais que se utilizam de endereçamento binário.
- Os algoritmos de FFT normalmente operam com N sendo potência de dois para acelerar o processo da transformação.

Normalmente N é escolhido entre 32 e 4096. Contudo, em aplicações como a detecção de falhas em motores de indução, onde se necessita de alta resolução, o número de amostras é consideravelmente maior.

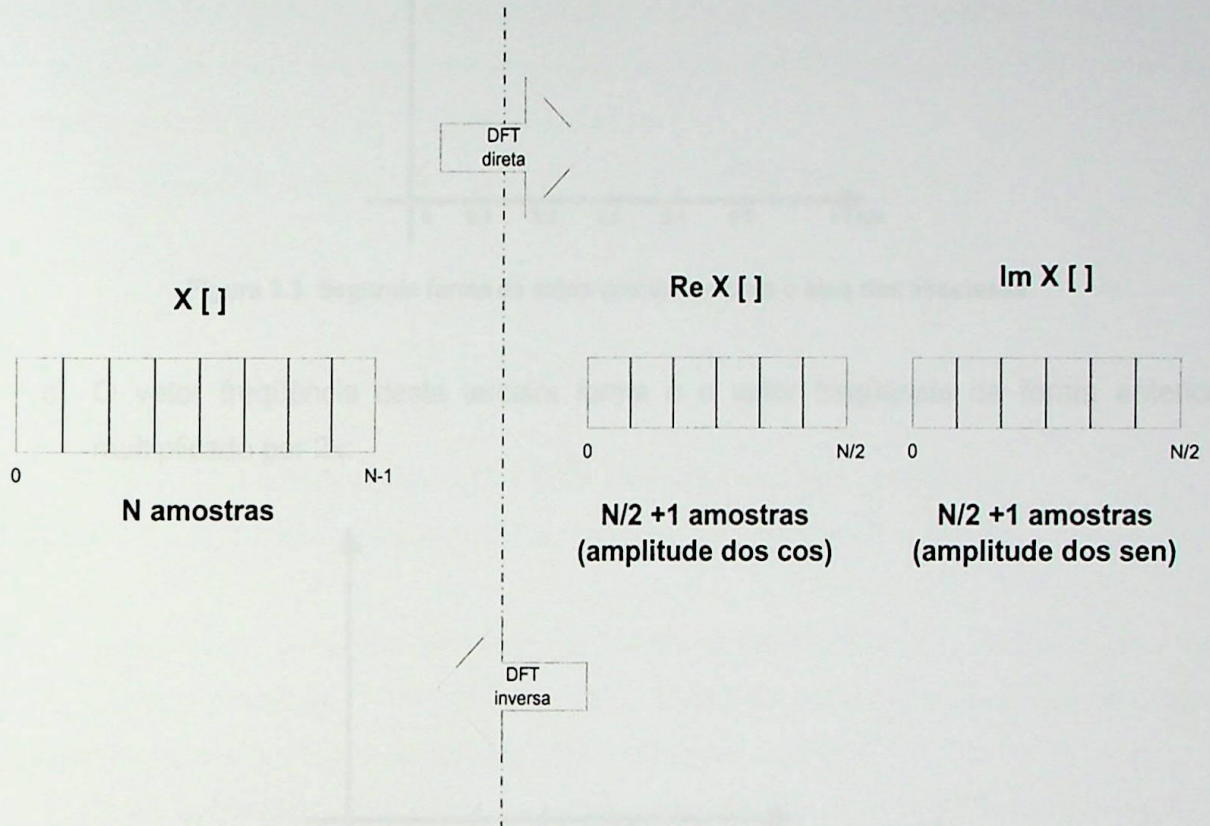


Figura 3.1: Saída da DFT direta e inversa

3.1.2 _ Variável Independente do Domínio da Freqüência

O eixo horizontal no domínio da freqüência pode ser referenciado de quatro formas distintas:

- a) O eixo horizontal, que será chamado de vetor freqüência varia de 0 a $N/2$:

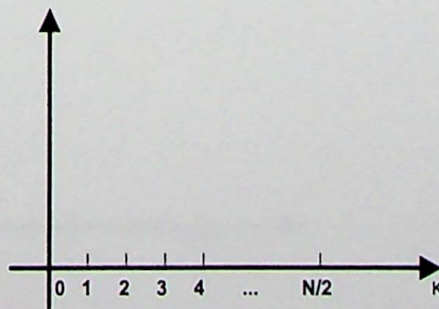
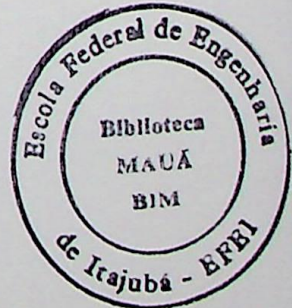


Figura 3.2: Primeira forma de saída dos dados para o eixo das abscissas



- b) O vetor freqüência varia de 0 a 0.5, já que os dados discretos podem conter apenas freqüências entre DC e a metade da taxa de amostragem:

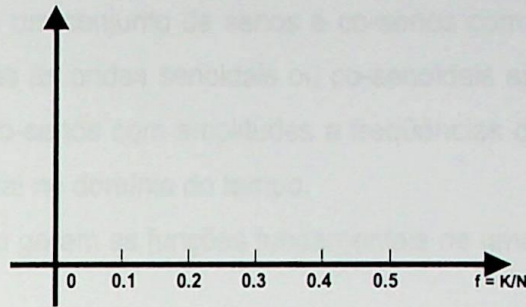


Figura 3.3: Segunda forma de saída dos dados para o eixo das abscissas

- c) O vetor freqüência desta terceira forma é o vetor freqüência da forma anterior multiplicado por 2π :

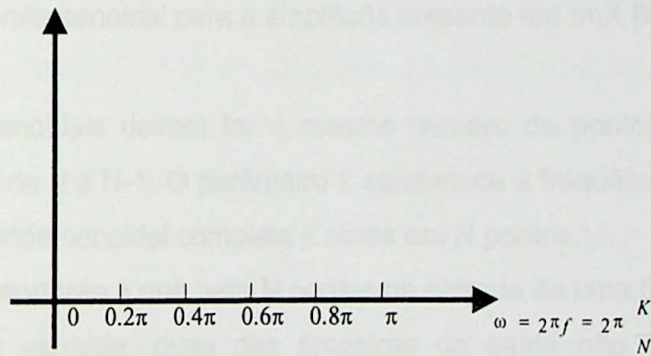


Figura 3.4: Terceira forma de saída dos dados para o eixo das abscissas

- d) O vetor de freqüência é escrito em termos das freqüências analógicas usadas em uma aplicação particular. Por exemplo, se a freqüência de amostragem (f_s) for 1 kHz, o vetor freqüência varia de 0 a 500 Hz. A vantagem deste método é que ele apresenta os dados na freqüência com significado para o mundo real. A desvantagem é que este método fica amarrado a uma freqüência de amostragem.

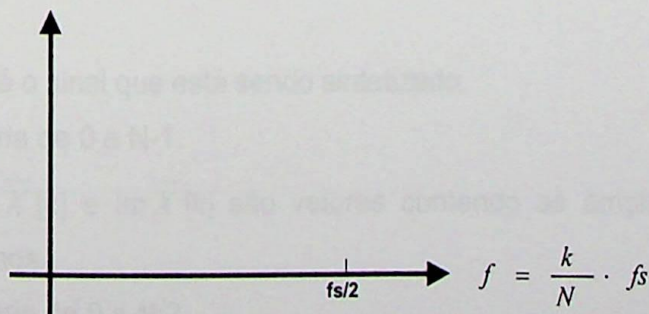


Figura 3.5: Quarta forma de saída dos dados para o eixo das abscissas

3.1.3 _ Funções Fundamentais da DFT

A saída de uma DFT é um conjunto de números que representam amplitudes. As funções fundamentais são um conjunto de senos e co-senos com amplitudes unitárias. Se amplitudes forem atribuídas às ondas senoidais ou co-senoidais apropriadas, o resultado é um conjunto de senos e co-senos com amplitudes e freqüências diferentes que podem ser somados para formar o sinal no domínio do tempo.

As equações abaixo geram as funções fundamentais de uma DFT:

$$C_k[i] = \cos(2\pi ki/N) \quad (3.1)$$

$$S_k[i] = \sin(2\pi ki/N) \quad (3.2)$$

Onde:

C_k é a onda co-senoidal para a amplitude presente em $\text{Re}X[k]$

S_k é a onda senoidal para a amplitude presente em $\text{Im}X[k]$

Estes sinais senoidais devem ter o mesmo número de pontos N que o sinal de entrada. Assim i varia de 0 a $N-1$. O parâmetro k estabelece a freqüência de cada senóide, ou seja, indica que a onda senoidal completa k ciclos em N pontos.

Outro ponto importante é que para N pontos na entrada de uma DFT real têm-se $N+2$ pontos na saída. Na verdade, duas das amostras de saída não contêm informação, permitindo que as outras N amostras sejam completamente independentes.

3.1.4 _ Cálculo da DFT Inversa

A equação de síntese é dada por:

$$x[i] = \sum_{k=0}^{N/2} \text{Re} \bar{X}[k] \cdot \cos(2\pi ki/N) + \sum_{k=0}^{N/2} \text{Im} \bar{X}[k] \cdot \text{sen}(2\pi ki/N) \quad (3.3)$$

Onde:

$x[i]$ é o sinal que está sendo sintetizado.

i varia de 0 a $N-1$.

$\text{Re} \bar{X}[k]$ e $\text{Im} \bar{X}[k]$ são vetores contendo as amplitudes dos senos e co-senos.

k varia de 0 a $N/2$.

É importante observar que as amplitudes necessárias para se efetuar o processo de síntese, $\text{Re } \bar{X}[k]$ e $\text{Im } \bar{X}[k]$, diferem das amplitudes no domínio da frequência $\text{Re} X[k]$ e $\text{Im} X[k]$. A conversão é dada por:

$$\text{Re } \bar{X}[k] = \frac{\text{Re } X[k]}{N/2} \quad (3.4)$$

$$\text{Im } \bar{X}[k] = \frac{-\text{Im } X[k]}{N/2} \quad (3.5)$$

Exceto para:

$$\text{Re } \bar{X}[0] = \frac{\text{Re } X[0]}{N} \quad (3.6)$$

$$\text{Re } \bar{X}[N/2] = \frac{\text{Re } X[N/2]}{N} \quad (3.7)$$

A diferença nas amplitudes ocorre já que o domínio da frequência é definido como uma densidade espectral que, por sua vez, descreve quanto do sinal está presente por unidade de largura de faixa. Para converter as amplitudes senoidais em densidade espectral, basta multiplicar cada amplitude pela largura de faixa correspondente. É importante ressaltar que a largura de faixa pode ser definida construindo-se linhas divisórias entre as amostras. De forma gráfica, tem-se:

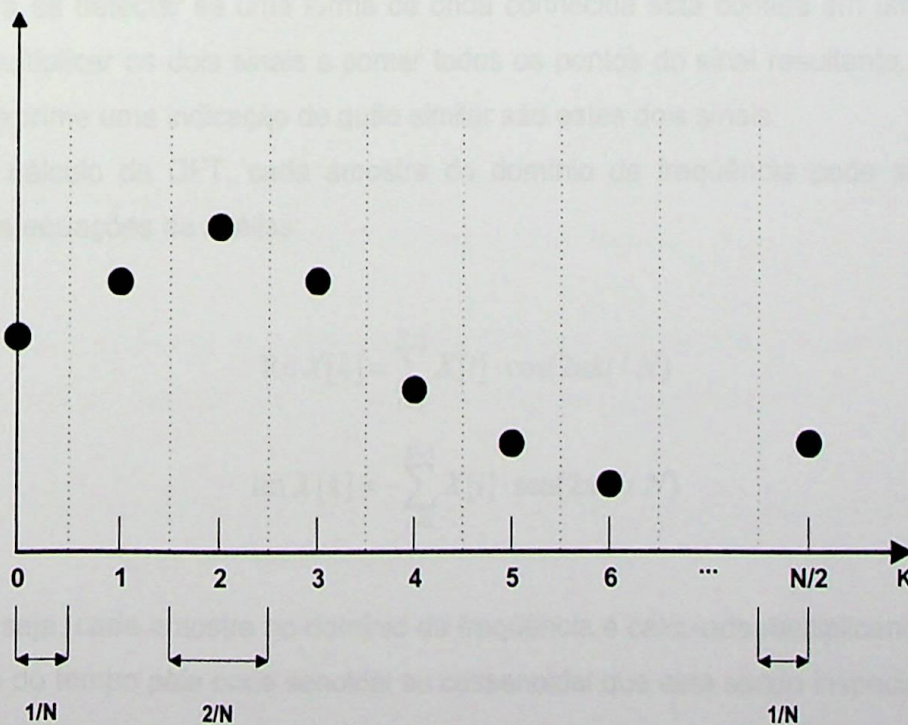


Figura 3.6: Ajuste de Amplitude

Observa-se na figura anterior que em termos da largura de faixa total ($N/2$), a largura de faixa de cada amostra é $2/N$. Exceto para a primeira e a última amostras nas quais as larguras de faixa são de $1/N$.

3.1.5 _ Cálculo da DFT Direta

Existem três formas de se calcular uma DFT: equações simultâneas, correlação, ou FFT. Como a FFT é centenas de vezes mais rápida que os outros métodos, ela será adotada e estudada adiante. Entretanto, se a DFT tem menos de 32 pontos, costuma-se utilizar o método da correlação para se calcular a DFT.

A) DFT por Equações Simultâneas

Por este método, o que se deseja é partir de N valores tomados no domínio do tempo e obter os N valores no domínio da frequência. Para a obtenção dos N valores desconhecidos deve-se estabelecer N equações linearmente independentes. Para tal, deve-se tomar a primeira amostra de cada senoide e somá-las. O resultado deve ser igual a primeira amostra no domínio da frequência. O processo se repete para as demais amostras.

B) DFT por Correlação

Para se detectar se uma forma de onda conhecida está contida em um outro sinal, deve-se multiplicar os dois sinais e somar todos os pontos do sinal resultante. O resultado da soma exprime uma indicação de quão similar são estes dois sinais.

No cálculo da DFT, cada amostra do domínio da frequência pode ser calculada através das equações de análise:

$$\text{Re } X[k] = \sum_{i=0}^{N-1} X[i] \cdot \cos(2\pi ki / N) \quad (3.8)$$

$$\text{Im } X[k] = -\sum_{i=0}^{N-1} X[i] \cdot \text{sen}(2\pi ki / N) \quad (3.9)$$

Ou seja, cada amostra no domínio da frequência é calculada multiplicando-se o sinal no domínio do tempo pela onda senoidal ou cossenoidal que está sendo inspecionada.

Para este método funcionar, as funções fundamentais que serão inspecionadas, objetivando se determinar qual a contribuição delas no sinal total, devem ser independentes entre si, ou seja, devem ter a propriedade da ortogonalidade.

C) FFT (Fast Fourier Transform)

O terceiro método para se calcular uma DFT é a transformada rápida de Fourier que produz os mesmos resultados dos métodos anteriores, mas com uma performance muito maior, reduzindo consideravelmente o tempo de processamento.

A FFT está baseada na DFT complexa, ou melhor, a FFT é um algoritmo para se calcular uma DFT complexa. Por essa razão é importante saber como se transferir os dados de uma DFT real, discutida até o momento, para uma DFT complexa. Como visto, a DFT real transforma um sinal de N pontos no domínio do tempo em dois sinais de $N/2 + 1$ pontos no domínio da frequência. Já a DFT complexa transforma dois sinais de N pontos no domínio do tempo em dois sinais de N pontos no domínio da frequência. A figura 3.7 apresenta as diferenças entre DFT real e complexa:

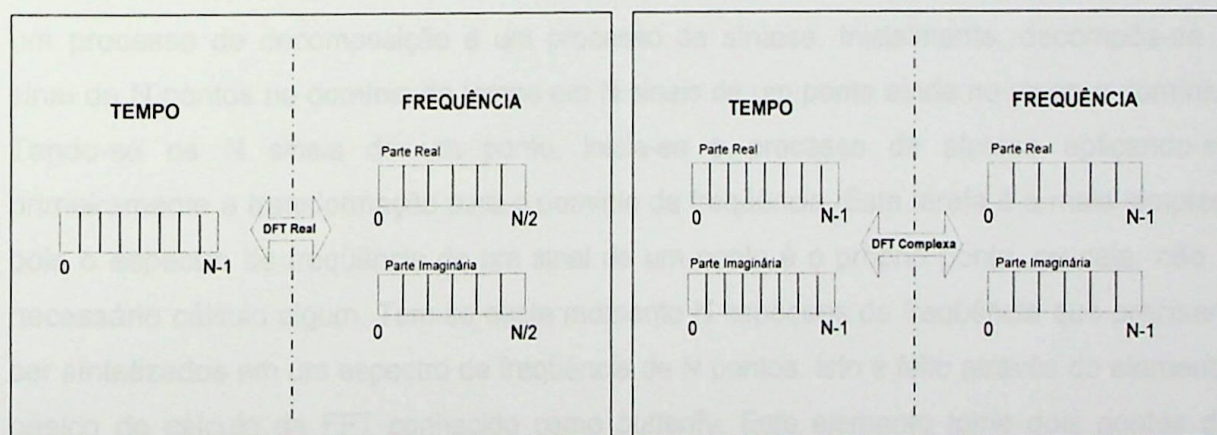


Figura 3.7: DFT real x DFT complexa

Se a necessidade é de se calcular uma DFT real por meio da DFT complexa, ou seja, se empregando um algoritmo de FFT, deve-se proceder da seguinte forma:

- Mover os N pontos do sinal em estudo para a parte real do domínio do tempo da DFT complexa.
- Zerar todas as N amostras da parte imaginária.
- Na saída da DFT complexa, extrair as amostras de 0 a $N/2$ da parte real e da parte imaginária. Isso corresponde ao espectro da DFT real.

O terceiro passo é realizado em virtude da DFT complexa incluir as frequências negativas. Graficamente tem-se:

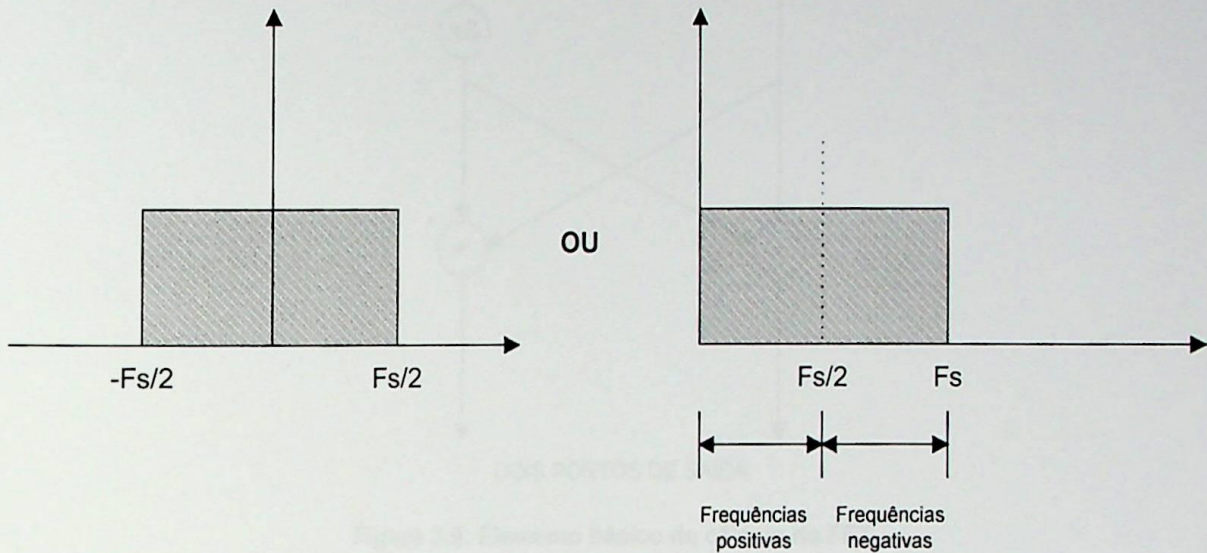


Figura 3.8: Espectro de frequência da DFT complexa

Normalmente, os algoritmos de FFT a serem implementados são simples. Entretanto, a teoria associada é extremamente complicada. A FFT tem seu funcionamento baseado em um processo de decomposição e um processo de síntese. Inicialmente, decompõe-se o sinal de N pontos no domínio do tempo em N sinais de um ponto ainda no mesmo domínio. Tendo-se os N sinais de um ponto, inicia-se o processo de síntese aplicando-se primeiramente a transformação para o domínio da frequência. Esta tarefa é a mais simples, pois o espectro de frequência de um sinal de um ponto é o próprio ponto, ou seja, não é necessário cálculo algum. Tem-se neste momento N espectros de frequência que precisam ser sintetizados em um espectro de frequência de N pontos. Isto é feito através do elemento básico de cálculo da FFT conhecido como *butterfly*. Este elemento toma dois pontos de entrada e gera dois pontos de saída já executando a síntese no domínio da frequência. Tal elemento está representado na figura 3.9.

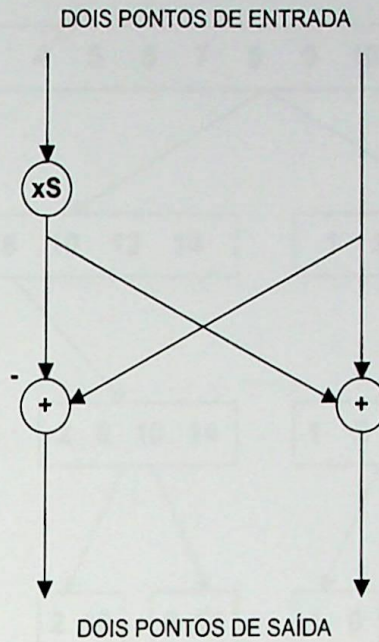


Figura 3.9: Elemento básico de cálculo da FFT

Onde xS representa a multiplicação por uma senóide com uma frequência apropriada.

Resumidamente, para se executar uma FFT deve-se seguir os seguintes passos:

- Decompor um sinal de N pontos no domínio do tempo em N sinais de um ponto no mesmo domínio.
- Calcular os N espectros de frequência correspondentes a esses N sinais temporais.
- Sintetizar os N espectros em um único espectro de frequência.

É importante salientar que o processo de decomposição do sinal nada mais é que a reordenação das amostras do sinal. Ou seja, separam-se os sinais em amostras pares e ímpares até que se tenham N sinais de um ponto. Esta operação pode ser mais bem entendida pelo exemplo seguinte que apresenta o processo de decomposição de um sinal com dezesseis amostras.

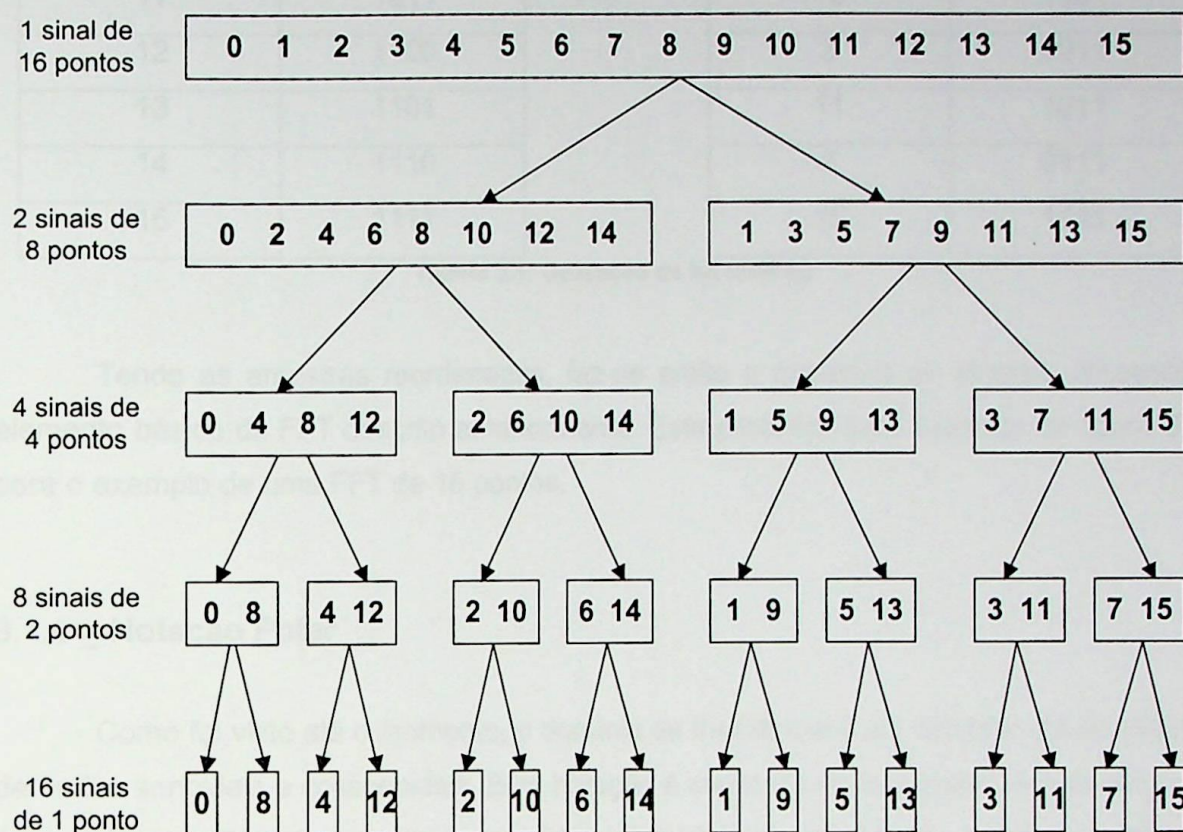


Figure 3.10: Decomposição de um sinal de 16 pontos

Entendido o processo de decomposição, tem-se que ele pode ser executado de uma forma bastante simples utilizando a operação de bit reverso que está apresentada na tabela 3.1.

Amostras na ordem normal	
Amostra (decimal)	Amostra (binário)
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001
10	1010

Amostras na ordem reversa	
Amostra (decimal)	Amostra (binário)
0	0000
8	1000
4	0100
12	1100
2	0010
10	1010
6	0110
14	1110
1	0001
9	1001
5	0101

11	1011	13	1101
12	1100	3	0011
13	1101	11	1011
14	1110	7	0111
15	1111	15	1111

Tabela 3.1: Operação de bit reverso

Tendo as amostras reordenadas, faz-se então o processo de síntese utilizando o elemento básico da FFT descrito anteriormente. Este processo está ilustrado na figura 3.11 para o exemplo de uma FFT de 16 pontos.

3.1.6 _ Notação Polar

Como foi visto até o momento, o domínio da frequência é um conjunto de amplitudes de ondas senoidais e cossenoidais. Esta notação é chamada de retangular. A notação polar é uma forma alternativa de se representar o domínio da frequência. Nesta notação, os vetores $\text{Re}X[k]$ e $\text{Im}X[k]$ são substituídos pelos vetores magnitude ($\text{Mag}X[k]$) e fase ($\text{Phase}X[k]$). A conversão é feita através das seguintes equações:

$$\text{Mag}X[k] = \sqrt{(\text{Re} X[k])^2 + (\text{Im} X[k])^2} \quad (3.10)$$

$$\text{Phase}X[k] = \arctan\left(\frac{\text{Im} X[k]}{\text{Re} X[k]}\right) \quad (3.11)$$

Já a conversão de polar para retangular é dada por:

$$\text{Re} X[k] = \text{Mag}X[k] \cdot \cos(\text{Phase}X[k]) \quad (3.12)$$

$$\text{Im} X[k] = \text{Mag}X[k] \cdot \text{sen}(\text{Phase}X[k]) \quad (3.13)$$

Apesar de conterem a mesma informação, existem ocasiões em que o uso de uma delas é mais apropriado. A notação retangular é a melhor escolha se a idéia é se fazer cálculos (equações e programas). Querendo-se representar a idéia graficamente, a melhor opção é a notação polar.

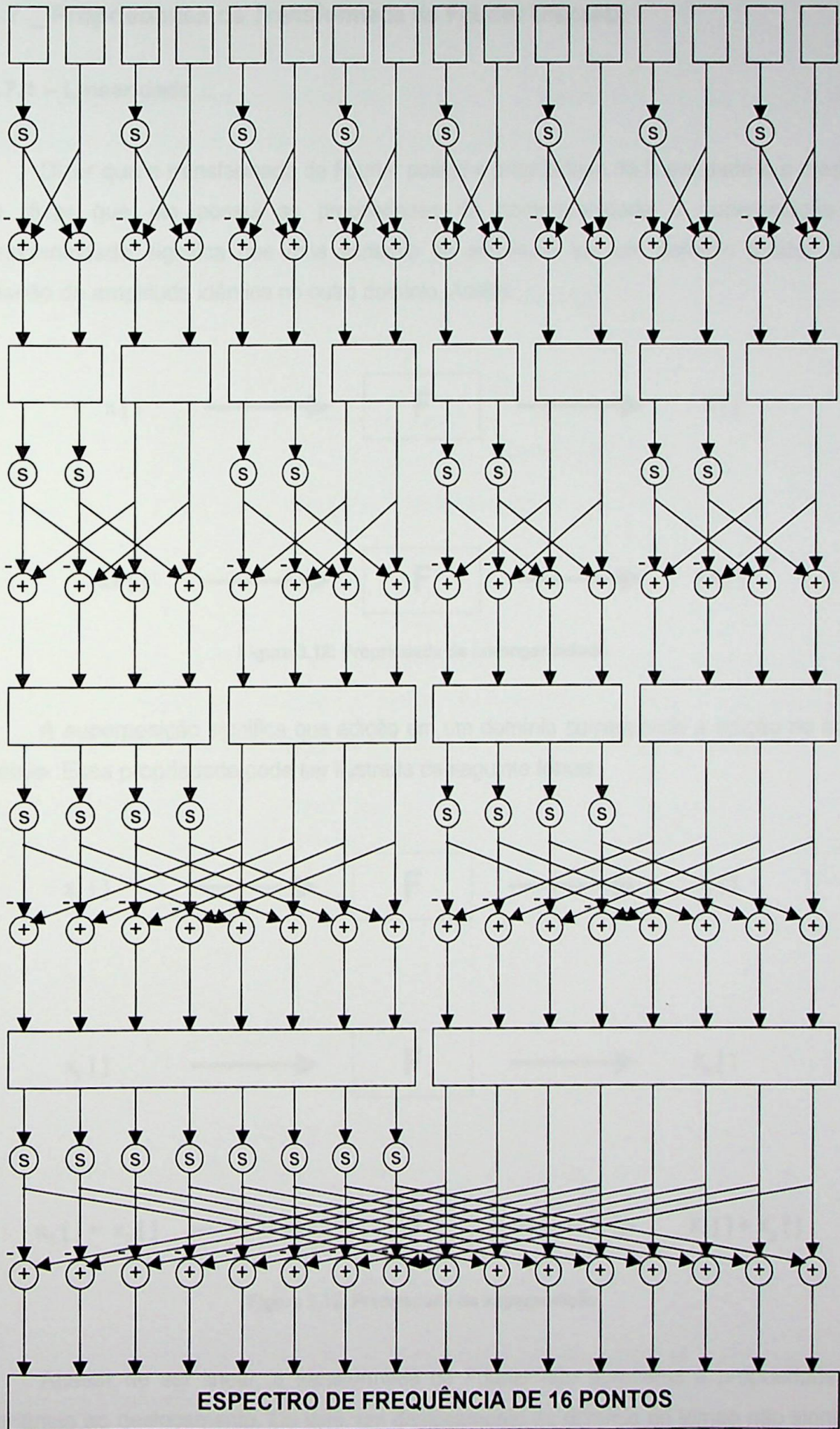


Figura 3.11: Exemplo do processo de síntese de uma FFT de 16 pontos

3.1.7 _ Propriedades da Transformada de Fourier Discreta

3.1.7.1 – Linearidade

Dizer que a transformada de Fourier possui a propriedade da linearidade é o mesmo que dizer que ela possui as propriedades da homogeneidade e superposição. A homogeneidade significa que uma variação de amplitude em um domínio produz uma variação de amplitude idêntica no outro domínio. Assim:

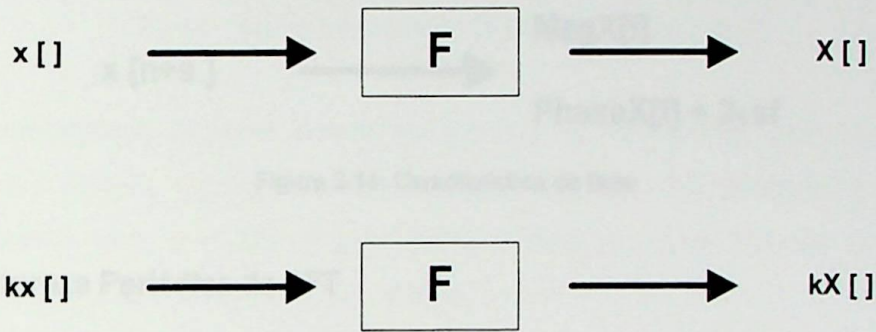


Figura 3.12: Propriedade da homogeneidade

A superposição significa que adição em um domínio corresponde a adição no outro domínio. Essa propriedade pode ser ilustrada da seguinte forma:

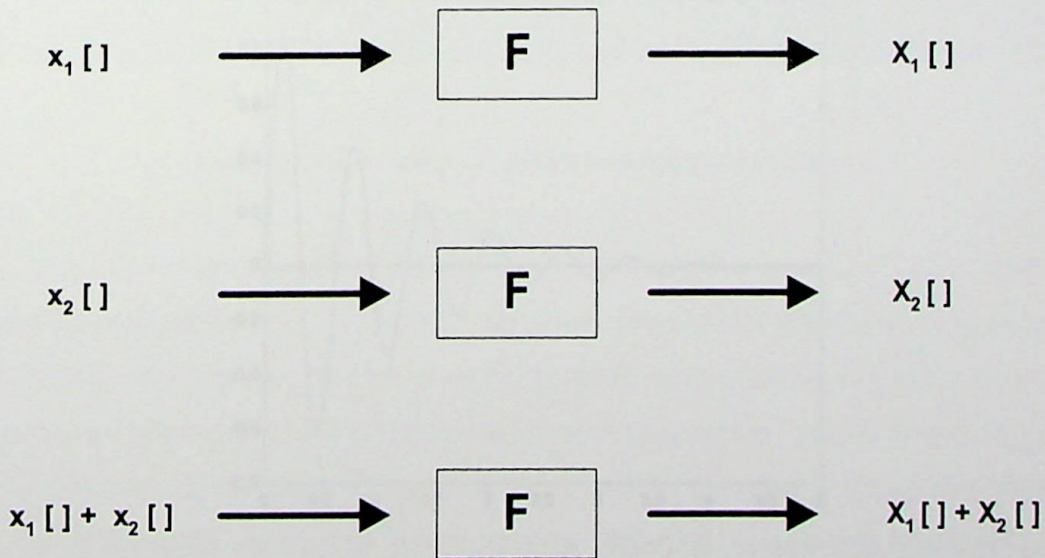


Figura 3.13: Propriedade da superposição

Apesar de ser linear, a transformada de Fourier não apresenta a propriedade da invariância ao deslocamento. Ou seja, um deslocamento no domínio do tempo não significa um deslocamento no domínio da frequência.

3.1.7.2 – Características da Fase

Um deslocamento no domínio do tempo de S amostras não provoca mudanças na amplitude no domínio da frequência, mas altera a fase somando $2\pi sf$. Assim:

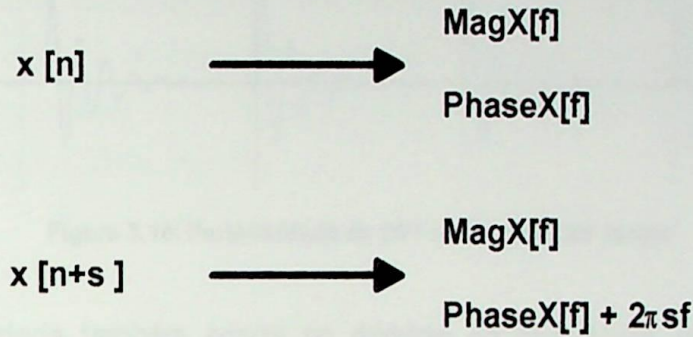


Figura 3.14: Característica da fase

3.1.7.3 – Natureza Periódica da DFT

Para a DFT, os domínios do tempo e da frequência são periódicos. Isto pode trazer alguns problemas já que a maioria dos sinais não é periódica ou deixa de ser quando se digitaliza esses sinais que passam a ter um domínio finito. Seja o sinal da figura 3.15:

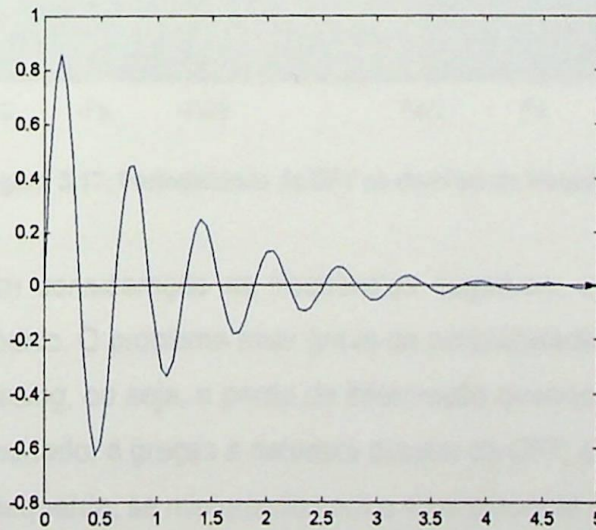


Figura 3.15: Sinal digital amostrado com N amostras

O sinal acima representa um sinal tipicamente digital amostrado com N amostras tomadas em intervalos regulares de tempo.

A DFT enxerga o sinal acima como um simples período de um longo sinal periódico. Desta forma, o lado direito do sinal é conectado ao lado esquerdo do sinal e vice-versa. Assim:

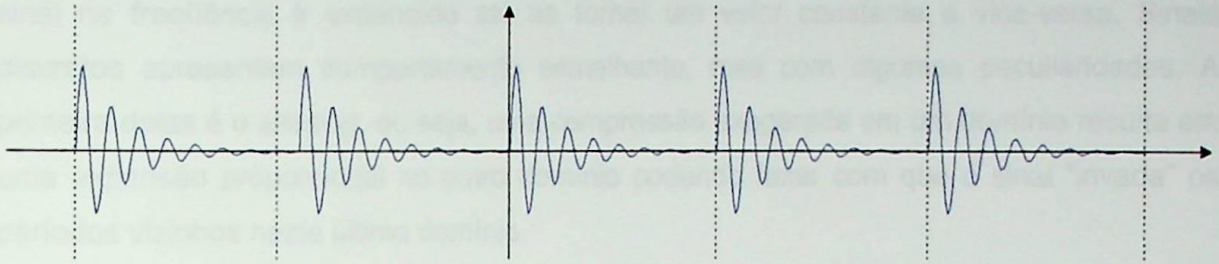


Figura 3.16: Periodicidade da DFT no domínio do tempo

A periodicidade também ocorre no domínio da frequência, contudo há algumas diferenças com relação a periodicidade no tempo. Na frequência, o espectro entre 0 e $f_s/2$ aparece refletido entre 0 e $-f_s/2$. E essa característica se repete quando se considera a periodicidade do espectro de frequência. Assim:

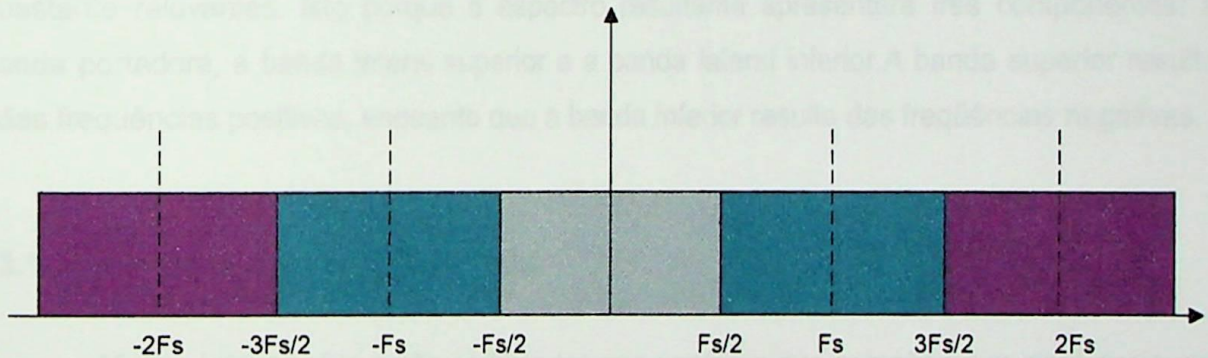


Figura 3.17: Periodicidade da DFT no domínio da frequência

Levando-se em consideração as frequências negativas, a DFT vê o domínio da frequência como periódico. O problema mais grave da periodicidade, tanto no tempo quanto na frequência, é o *aliasing*, ou seja, a perda de informação quando o sinal no tempo ou na frequência excede o período, e graças a natureza circular da DFT, o que excede a direita do período reaparece a esquerda, se misturando com o sinal presente no início do período.

Para algumas aplicações (como análise espectral e resposta em frequência) é suficiente observar o domínio do tempo de 0 a $N-1$, e o domínio da frequência de 0 a $f_s/2$. Contudo, em outras aplicações (como convolução circular e conversão A/D) deve-se considerar como os sinais se excedem nos seus períodos. Sejam alguns exemplos onde a natureza periódica da DFT é importante:

A) Compressão e Expansão

A compressão de um sinal em um domínio implica na expansão do sinal no outro domínio. Os extremos são: se o sinal no tempo é comprimido até se tornar um impulso, o sinal na frequência é expandido até se tornar um valor constante e vice-versa. Sinais discretos apresentam comportamento semelhante, mas com algumas peculiaridades. A primeira delas é o *aliasing*, ou seja, uma compressão exagerada em um domínio resulta em uma expansão proporcional no outro domínio podendo fazer com que o sinal “invada” os períodos vizinhos neste último domínio.

B) Multiplicando Sinais

Sabe-se da teoria da transformada de Fourier que convolução em um domínio corresponde a multiplicação no outro domínio. No caso específico da modulação em amplitude, a multiplicação no domínio do tempo corresponde a convolução no domínio da frequência. Neste caso, as frequências negativas, outrora sem importância, tornam-se bastante relevantes. Isto porque o espectro resultante apresentará três componentes: a onda portadora, a banda lateral superior e a banda lateral inferior. A banda superior resulta das frequências positivas, enquanto que a banda inferior resulta das frequências negativas.

3.1.8 _ Análise Espectral de Sinais

Muitas informações estão codificadas nas senóides que compõem um sinal qualquer. A forma do sinal no domínio do tempo não é importante, pois a informação principal está na frequência, fase e amplitude das componentes senoidais. Desta forma, a FFT é usada para extrair estas informações.

A primeira ação a ser tomada após a amostragem do sinal é a multiplicação do sinal amostrado com N pontos por uma curva suave como, por exemplo, uma janela de Hamming ou Blackman. Após a multiplicação tem-se um sinal de N pontos onde as amostras do início e do final do sinal foram reduzidas em amplitude. Isto é feito com o propósito de se eliminar “saltos” no início e fim do período do sinal amostrado, fazendo com que não ocorra a falsa interpretação de presença de componentes de alta frequência no sinal em estudo.

Realizando-se agora a FFT, tem-se o espectro do sinal amostrado. Evidentemente, o aparecimento de ruído é inevitável. Para se minimizar o problema pode-se proceder de duas formas:

- i) Dividir o sinal de entrada em muitos segmentos de N pontos. Cada segmento é multiplicado por uma janela de Hamming ou blackman, passado por uma FFT de N pontos e depois convertido para a forma polar. Finalmente, extrai-se a média dos espectros resultantes para se formar um único espectro.
- ii) Fazer uma FFT de muitos pontos, por exemplo, 16.384 pontos. O espectro resultante será de alta resolução e bastante ruidoso. Um filtro digital passa-baixa é usado para “suavizar” o espectro, reduzindo o nível de ruído.

O primeiro método é mais fácil, contudo o segundo método apresenta uma melhor performance. Entretanto, esta melhor performance é raramente vantajosa para o problema em questão, preferindo-se utilizar a facilidade do primeiro método.

Outro problema que ocorre na análise espectral é a presença de picos muito próximos no espectro. Seja a figura 3.18.

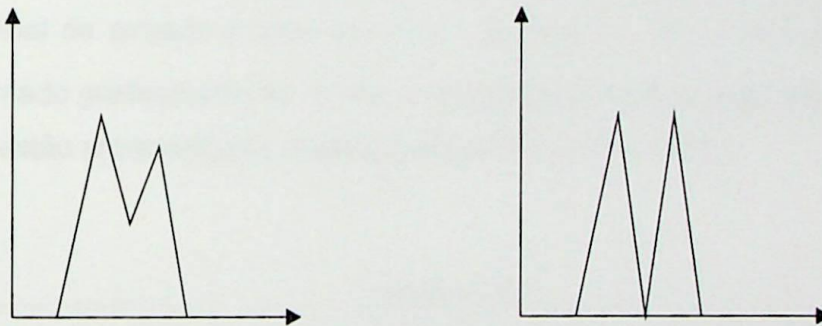


Figura 3.18: Problema de resolução espectral

No primeiro caso, a resolução espectral não é suficiente para separar os dois picos. O mesmo problema não ocorre no segundo caso que possui maior resolução.

Existem dois fatores que limitam a resolução espectral. O primeiro fator é o tamanho da DFT. Uma DFT de N pontos produz um espectro de $N/2 + 1$ pontos igualmente espaçados de 0 a $F_s/2$. Para separar picos bastante próximos, o espaçamento entre as amostras deve ser menor, ou seja, o número de pontos da DFT deve ser maior. O segundo fator limitante ocorre quando dois sinais têm freqüências muito próximas. Isto porque quanto mais próximas são as freqüências, maior deve ser o segmento inspecionado para se concluir que há mais de um sinal envolvido.

Um recurso para se aumentar a resolução sem ampliar o número de amostras do sinal temporal é preencher o sinal amostrado no tempo com zeros e aplicar a DFT.

Além disso, quando o sinal de entrada contém uma senóide com freqüência entre as freqüências de duas raias espectrais, seu pico no espectro de freqüência aparece com um

rastro que se estende por uma distância considerável. Seja a representação deste conceito de forma gráfica:

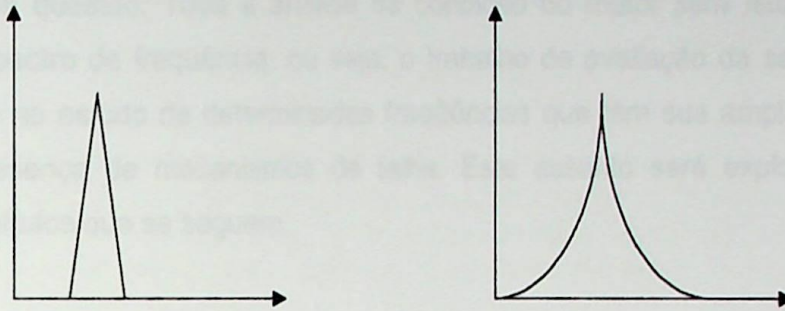


Figura 3.19: Comportamento do espectro na presença de freqüências sem raia espectral

No primeiro caso existe uma raia espectral para a freqüência presente no sinal de entrada. Já no segundo caso a freqüência presente no sinal de entrada está entre duas raias espectrais resultando num espalhamento do pico ao longo do espectro de freqüência.

Considerando os conceitos expostos anteriormente, seja um exemplo da aplicação da FFT. O sinal de entrada é dado por $f(t) = 20 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot t) + 40 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 65 \cdot t)$ e está representado graficamente em 3.17a. A multiplicação do sinal pela janela de Blackman e o espectro estão representados respectivamente em 3.17b e 3.17c.

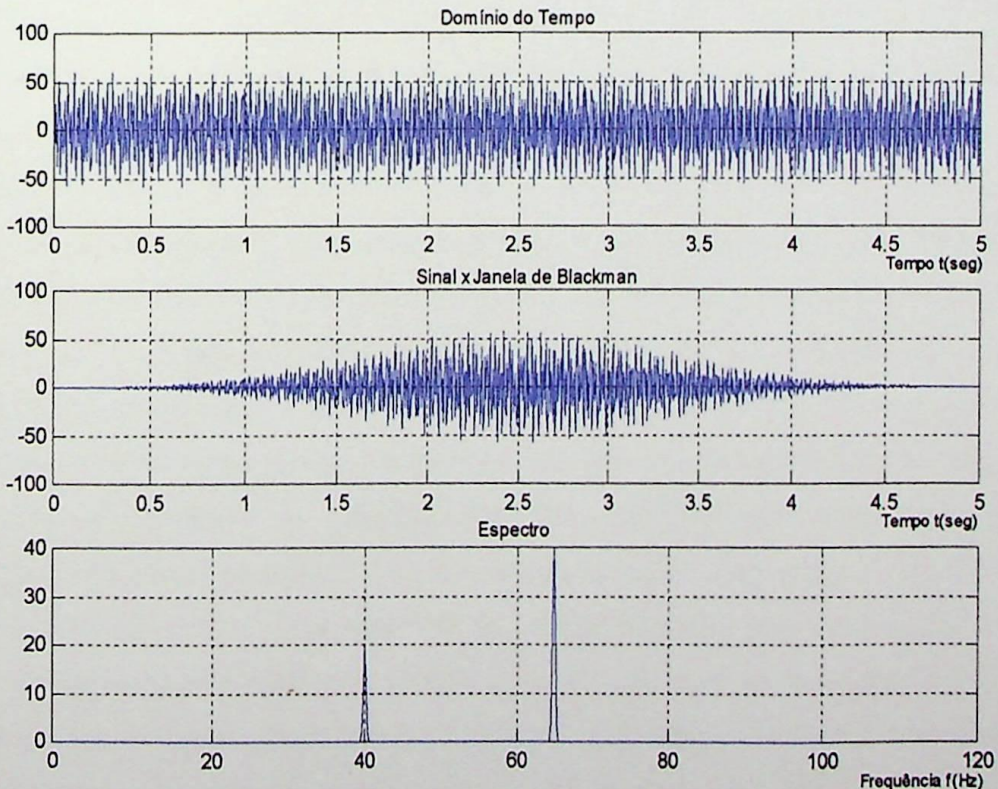


Figura 3.20: Exemplo da aplicação de uma FFT com janelamento

3.1.9 _ A FFT no Sistema de Monitoração Proposto

A FFT se constitui como a ferramenta mais importante para o sistema de monitoração em questão. Toda a análise da condição do motor será feita em função do aspecto do espectro de freqüência, ou seja, o trabalho de avaliação da saúde do motor é feito com base no estudo de determinadas freqüências que têm sua amplitude modificada quando da presença de mecanismos de falha. Este assunto será explorado com mais ênfase nos capítulos que se seguem.

4. Introdução

Este trabalho trata sobre a análise dos dados de monitoração de máquinas de tração elétrica de alta potência, onde se nota de um funcionamento anormal a presença desses motivos relativos ao aspecto de vibração. Nestes últimos anos, uma nova técnica de monitoração revelou grande potencial no diagnóstico de falhas em máquinas de tração elétrica. Trata-se da monitoração do espectro de corrente de uma das fases do motor de tração, onde se consegue detectar falhas elétricas e mecânicas, tais como: quebra de barras de cobre, desconexão do eixo e falhas em rolamentos.

Relevantes estudos vêm sendo desenvolvidos acerca de monitoração e localização de falhas em motores de tração, especialmente no que diz respeito aos seguintes aspectos: rotor e rolamentos. Qualquer falha em algum desses componentes afeta consideravelmente o bom funcionamento da máquina e consequentemente a sua vida útil. Como falhas nesses componentes são comuns [1], sugere-se então que métodos simples sejam feitos em busca de métodos cada vez mais eficazes para detecção e localização de falhas nos mesmos. Sabe-se hoje que o espectro de corrente de tração contém valiosas informações, que abrangem desde as condições elétricas até mesmo condições mecânicas, por exemplo, pode-se monitorar e monitorar o estado de saúde de um sistema de tração funcionando e sem a necessidade de um teste anterior ao teste de carga.

Também no aspecto de controle há várias técnicas bem sucedidas que podem ser usadas por métodos inovadores de aquisição e processamento de dados construídos da máquina, e as falhas de rotor, rotor e rolamentos. Essas condições de frequência foram mencionadas e associadas a cada tipo de falha.

ANÁLISE DE FALHAS ATRAVÉS DA CORRENTE DO ESTATOR

A análise de falhas em motores de indução trifásicos baseia-se no acompanhamento de certas componentes de frequência que terão seu comportamento modificado em função do aparecimento e progresso da falha. Este capítulo pretende explicitar estas componentes, agregar informações sobre o mecanismo de falha, e ainda apresentar simulações de falhas em motores de indução trifásicos.

4.1 _ Introdução

Durante muito tempo a técnica não invasiva mais utilizada para monitoração de motores de indução foi a de vibração mecânica, onde por meio de um acelerômetro acoplado à carcaça desses motores fazia-se análises do espectro de vibração. Nesses últimos anos, uma nova técnica não invasiva de monitoração revelou grande potencial na predição de falhas em motores de indução trifásicos. Trata-se da monitoração do espectro de corrente de uma das fases do motor de indução, onde se consegue detectar falhas elétricas e mecânicas, tais como quebra de barras do rotor, excentricidade do eixo e falhas em rolamentos.

Relevantes estudos vêm sendo executados acerca da monitoração e localização de falhas em motores de indução, especialmente em três partes desta máquina: estator, rotor e rolamentos. Qualquer falha em algum desses componentes, afeta consideravelmente o bom funcionamento da máquina, e conseqüentemente, o seu rendimento. Como falhas nesses componentes são comuns [B9], sugere-se então que inúmeros esforços sejam feitos em busca de métodos cada vez mais eficientes para detecção e localização de falhas nos mesmos. Sabe-se hoje que o espectro de corrente do estator contém valiosas informações, que comparativamente às técnicas anteriores, apresenta grandes vantagens, pois através desta, pode-se executar o monitoramento da máquina sem interrupção do seu funcionamento e sem a necessidade do uso de sensores no interior desta.

Tem-se no espectro de corrente do estator múltiplos harmônicos bilaterais que podem ser gerados por condições inadequadas de aplicação e operação, por aspectos construtivos da máquina, e por falhas no estator, rotor e rolamentos. Essas componentes de frequência foram reconhecidas e associadas a cada tipo de falha.

Vale destacar a existência de outros métodos afins como, por exemplo, a análise do espectro da potência instantânea [B10] e a análise de falha em MIT usando estatística de alta ordem [B11].

4.2 _ Falhas Mecânicas a Serem Diagnosticadas

As falhas que serão estudadas e posteriormente terão seu mecanismo de falha analisado em laboratório estão relacionadas a seguir. Os efeitos dessas falhas aparecem refletidos na corrente do estator em função de perturbações que estas falhas geram no fluxo do *air-gap*.

A) Assimetria do Rotor

Quando uma assimetria rotórica está presente no motor de indução, a densidade de fluxo do *air-gap* será perturbada e esta perturbação estará girando na velocidade do eixo. As frequências das componentes espectrais na densidade de fluxo do *air-gap* e que caracterizam este tipo de falha são dadas por [B12]:

$$f_{ass} = f \left[k \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \pm s \right] \quad (4.1)$$

Onde:

f = frequência elétrica de alimentação;

k=1, 2, 3, ...

s = o escorregamento da máquina em pu;

p = número de pólos;

B) Desbalanceamento do Rotor ou Variação da Velocidade do Eixo

No caso da excentricidade dinâmica que varia com a posição do rotor, a oscilação no tamanho *air-gap* causa variações na densidade de fluxo do *air-gap*. Isto por sua vez leva a uma variação instantânea da indutância da máquina produzindo harmônicas da corrente do estator com frequência dadas por [B12]:

$$f_{deb} = f \left[k \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \pm 1 \right] \quad (4.2)$$

Onde:

f = frequência elétrica de alimentação;

$k=1, 2, 3, \dots$

s = escorregamento da máquina em pu;

p = número de pólos;

C) Excentricidade do Rotor

Existem duas formas de se detectar a excentricidade do *air-gap* utilizando-se o espectro da corrente do estator [B13]. A primeira forma monitora as bandas laterais presentes no espectro de corrente em torno da frequência do *slot*. As frequências associadas à excentricidade do *air-gap* podem ser encontradas através da formulação abaixo:

$$f_{slot/exc} = f \cdot \left[(kR \pm n_{ecc}) \cdot \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \pm n_s \right] \quad (4.3)$$

Onde:

f = frequência elétrica de alimentação;

$k=1, 2, 3, \dots$

R = número de barras do rotor;

s = escorregamento da máquina em pu;

n_{ecc} (número da ordem da excentricidade) = 1, 2, 3, 4, 5, ...

p = número de pólos;

n_s (ordem da harmônica da frequência de alimentação) = 1, 3, 5, 7, 9, ...

A grande desvantagem deste método é a necessidade de se conhecer aspectos construtivos da máquina como o número de barras do rotor. Em contrapartida, utilizando-se esta forma de monitoração tem-se a separação dos efeitos das falhas de barra quebrada e excentricidade.

A outra forma de monitoração consiste em acompanhar o comportamento das bandas laterais em torno da componente fundamental. Estas frequências são dadas por:

$$f_{exc} = f \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \right] \quad (4.4)$$

Onde:

$m = 1, 2, 3, \dots$

A vantagem do método está justamente no fato de não se precisar conhecer os aspectos construtivos da máquina para se fazer uma avaliação da saúde do motor com relação a este tipo de falha.

D) Rotor com Barras Quebradas ou Trincadas

A detecção de barras quebradas ou trincadas através do espectro da corrente do estator é feita observando-se duas componentes do espectro que se localizam próximas e em torno da componente fundamental.

Este tipo de falha ocorre normalmente na presença de esforços térmicos e mecânicos, cargas pulsantes, e imperfeições no processo de manufatura da gaiola. A quebra de barras não leva o motor imediatamente à falha, ou seja, a máquina pode continuar funcionando mesmo com a existência de barras quebradas ou trincadas. Contudo, efeitos secundários consideráveis podem ocorrer como, por exemplo, as barras quebradas atingirem o estator.

A quebra de barras faz com que apareçam no espectro de corrente dois picos igualmente afastados de $2 \cdot f \cdot s$ da componente fundamental, onde f é a frequência de alimentação e s é o escorregamento da máquina em pu. A componente da esquerda ($f - 2fs$) é resultado direto da falha, enquanto que a componente da direita ($f + 2fs$) é resultado do *ripple* de velocidade. Assim:

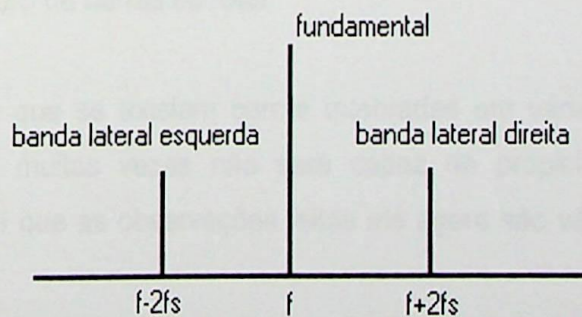


Figura 4.1: Componentes que caracterizam a quebra de barras

Desta forma, pode-se afirmar que a quebra de barras resulta no aparecimento de componentes no espectro da corrente do estator nas frequências dadas por [B14]:

$$f_{bq} = f \cdot (1 \pm 2s) \quad (4.5)$$

Onde:

f é a frequência de alimentação em Hz

s é o escorregamento da máquina em pu

Considerando as duas componentes em questão, tem-se que a soma de suas amplitudes é um bom indicador da severidade da falha. Evidentemente, as conclusões tiradas, considerando-se a soma em questão, são empíricas. Além disso, pode-se calcular o número de barras quebradas através da amplitude da banda lateral esquerda ($f - 2fs$) que é proporcional ao número de barras quebradas. Seja a relação abaixo:

$$\frac{I_{bq}}{I_f} \cong \frac{\text{sen } \alpha}{2p \cdot (2\pi - \alpha)} \quad (4.6)$$

Onde:

I_{bq} é a amplitude da componente em ($f - 2fs$)

I_f é a amplitude da componente fundamental

p é o número de par de pólos

E α é dado por:

$$\alpha = \frac{2\pi R_b p}{R} \quad (4.7)$$

Onde:

R_b é o número de barras quebradas

R é o número de barras do rotor

Deve-se ressaltar que se existem barras quebradas em várias partes do rotor, a análise em corrente muitas vezes não será capaz de propiciar o diagnóstico do problema. Resulta daí que as observações feitas até agora são válidas para quebra de barras subseqüentes.

Outra grande dificuldade do método é a possível confusão entre a real ocorrência de quebra de barra e a modulação da corrente produzida por outros eventos e que geram as mesmas componentes de interesse ou componentes muito próximas a $f \pm 2fs$. Como exemplo pode-se citar oscilações do torque de carga e processos que usam caixas de engrenagens para alta redução de velocidade.

Quando se almeja o diagnóstico da falha, o sistema de monitoração e diagnóstico deve considerar vários fatores como:

- Diferentes projetos do rotor
- Diferentes condições de carga
- Características mecânicas da carga
- Componentes mecânicos do *drive train*

Estas condições são importantes para garantir a confiabilidade do diagnóstico, cuja estratégia deve se iniciar com a aplicação de uma FFT de alta resolução para garantir o reconhecimento das componentes de interesse. Além disso, deve observar-se que o sistema de monitoração deve ser bastante dinâmico, se adaptando as variações da frequência de alimentação e do escorregamento, já que a variação no valor dessas duas variáveis altera a posição das bandas laterais no espectro.

Outro ponto de fundamental importância é a tomada de decisão após o diagnóstico de falha. Vários fatores devem ser levados em consideração, dentre eles:

- Severidade da falha;
- Importância estratégica do conjunto;
- Projeto do rotor;
- Potencial da falha secundária, ou seja, a falha que ocorrerá em função da quebra de barras;
- Segurança.

E) Falhas no Rolamento

A monitoração das falhas no rolamento é de suma importância em um sistema de manutenção preditiva, pois estudos indicam que 40% de todas as falhas em máquinas se devem a problemas nestes elementos [3]. Muitos trabalhos têm sugerido a monitoração da corrente do estator para propiciar as mesmas indicações de falhas que a análise de vibração, trazendo como benefício principal em relação a esta última técnica a não necessidade de acesso ao motor.

Diversas são as causas de falhas em rolamentos. Além do processo normal de falha, isto é, o aparecimento de pequenas fissuras abaixo da superfície das pistas e elementos rolantes, outras condições contribuem para a redução do tempo de falha do rolamento. Essas condições são fontes externas como corrosão, contaminação, lubrificação imprópria, instalação imprópria, etc. Seja uma breve descrição de cada uma dessas condições: [B6]

- **Contaminação:** o processo de contaminação se dá através de pequenas partículas de natureza abrasiva e dureza variável que freqüentemente contaminam a lubrificação do enrolamento, causando ações de *pitting* e *sanding*.
- **Corrosão:** o processo de corrosão é iniciado devido à presença de água, ácido, lubrificação deteriorada, etc. Com o avanço do processo de corrosão, partículas são expelidas resultando na mesma ação abrasiva da contaminação.
- **Lubrificação imprópria:** lubrificar em falta ou em excesso faz com que os elementos rolantes não girem corretamente no filme de óleo causando aquecimento. Esse aquecimento deteriora a graxa, diminuindo a lubrificação e acelerando o processo de falha.
- **Problemas na instalação:** as falhas originadas por instalação imprópria são causadas por forçar o rolamento contra o eixo ou contra a carcaça, resultando em danos físicos ao rolamento. Outro problema comum gerado por instalações incorretas é o desalinhamento do rolamento. Isto pode acontecer de quatro formas, ilustradas na figura 4.2.

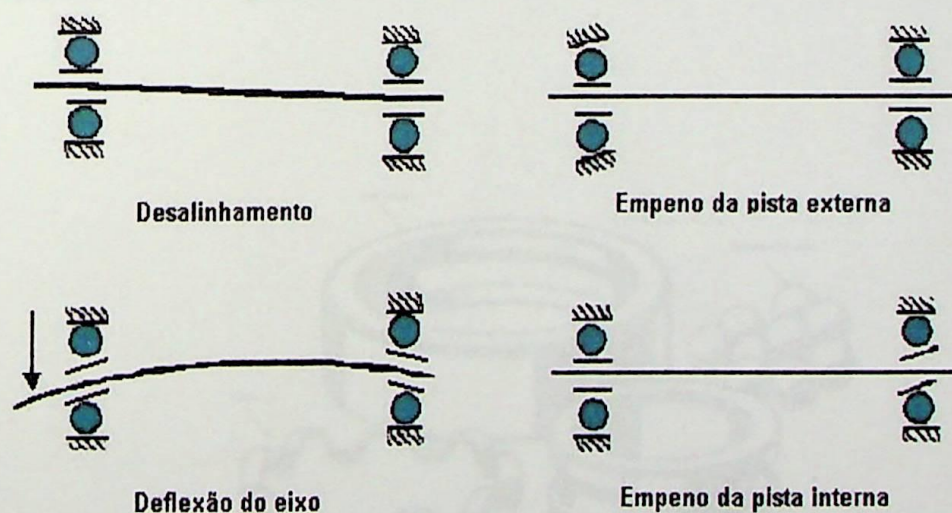


Figura 4.2: Desalinhamento do rolamento

Estabelecidas as causas de falhas em rolamentos, torna-se importante o conhecimento do efeito dessas falhas no espectro da corrente do estator. É válido, entretanto, iniciar o estudo do efeito dessas falhas no espectro de corrente fazendo-se um paralelo com a análise de vibrações de falhas em rolamentos [B15]. As freqüências

características de vibração são bem conhecidas e suas formulações são baseadas nas dimensões do rolamento. A figura 4.3 apresenta as dimensões envolvidas nos cálculos das freqüências:

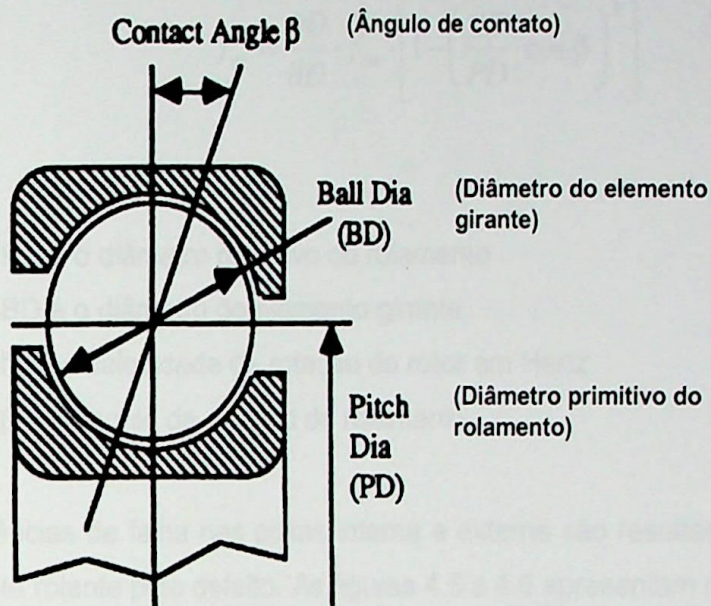


Figura 4.3: Dimensões envolvidas no cálculo das freqüências de falha

As falhas em rolamentos dividem-se em falhas no elemento rolante, na pista interna e na pista externa. A figura 4.4 apresenta as partes componentes de um rolamento.

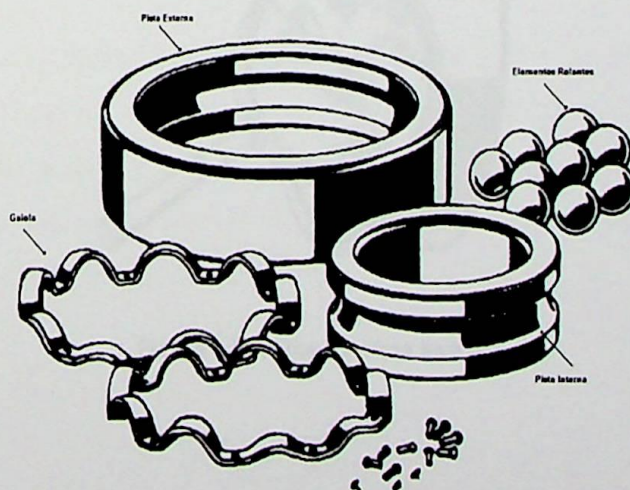


Figura 4.4: Partes componentes de um rolamento

Cada falha apresenta componentes de frequência específicas que podem ser calculadas através das formulações que serão apresentadas adiante.

A frequência de falha no espectro de vibração para elementos rolantes é dada por:

$$f_{er} = \frac{PD}{BD} \cdot f_{rm} \cdot \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

Onde:

- _ PD é o diâmetro primitivo do rolamento
- _ BD é o diâmetro do elemento girante
- _ f_{rm} é a velocidade de rotação do rotor em Hertz
- _ β é o ângulo de contato do rolamento

As frequências de falha nas pistas interna e externa são resultado da passagem de cada elemento rolante pelo defeito. As figuras 4.5 e 4.6 apresentam respectivamente um exemplo de falha na pista externa e um exemplo de falha na pista interna de um rolamento.



Figura 4.5: Falha na pista externa



Figura 4.6: Falha na pista interna

Sendo n o número de elementos rolantes, têm-se as freqüências de falha das pistas definidas por:

$$f_{pe} = \frac{n}{2} \cdot f_{rm} \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \quad (4.9)$$

$$f_{pi} = \frac{n}{2} \cdot f_{rm} \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \quad (4.10)$$

Onde:

- _ f_{pi} é a freqüência característica de falha na pista interna
- _ f_{pe} é freqüência de falha na pista externa

Como se pode notar, estas formulações dependem de informações de construção do rolamento para o cálculo da freqüência exata. Como essas informações nem sempre poderão ser obtidas, pode-se usar as aproximações seguintes para o cálculo das freqüências de falha das pistas externa e interna para a maioria dos rolamentos com número de elementos rolantes entre 6 e 12.

$$f_{pe} = 0.4 \cdot n \cdot f_{rm} \quad (4.11)$$

$$f_{pi} = 0.6 \cdot n \cdot f_{rm} \quad (4.12)$$

Para se estabelecer uma relação entre as freqüências de vibração e as freqüências do espectro de corrente do estator basta observar que a excentricidade dinâmica, que varia com a posição do rotor e leva à oscilações de tamanho do *air-gap*, causa variações

na densidade de fluxo do *air-gap*. Isto afeta a indutância da máquina e causa o aparecimento de freqüências em:

$$f_{ecc} = f \cdot \left[1 \pm k \cdot \left(\frac{1-s}{P/2} \right) \right] \quad (4.13)$$

Onde:

- _ f é a freqüência de alimentação
- _ k = 1, 2, 3,...
- _ s é o escorregamento em pu

Defeitos no rolamento causam deslocamentos radiais entre o rotor e o estator da máquina. Esse deslocamento faz com que o *air-gap* varie de modo a estabelecer freqüências de falha definidas em:

$$f_{rol} = |f \pm m \cdot f_v| \quad (4.14)$$

Onde:

- _ m = 1, 2, 3,...
- _ f_v é a freqüência característica de vibração

Assim, as freqüências de falhas no espectro da corrente do estator são dadas por:

- Falhas em elementos rolantes:

$$f_{er} = \left| f \pm m \cdot \frac{PD}{BD} \cdot f_{rm} \cdot \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right)^2 \right] \right| \quad (4.15)$$

Seja um motor de indução trifásico de 10 HP, 230 V, 4 pólos, operando em 60 Hz, cujo rolamento apresenta as seguintes características: PD = 60 mm, BD=12 mm, $\beta = 0$, e n = 9. Considere ainda que o escorregamento em pu seja de 0.0361. O espectro simulado de falha no elemento rolante (utilizando a equação 4.15 e fazendo m = 1) é apresentado na figura 4.7. Tal simulação foi realizada utilizando-se do pacote computacional MATLAB.

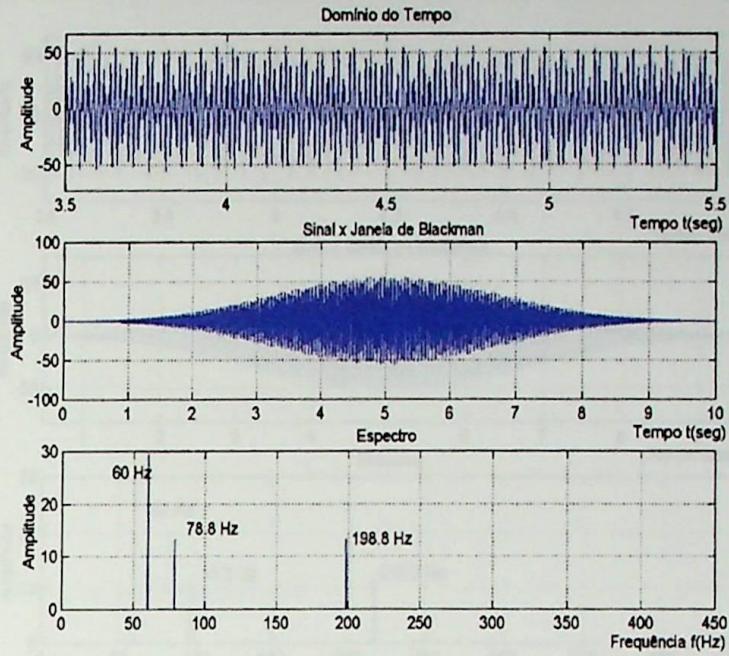


Figura 4.7: Espectro simulado de falha em elemento rolante

- Falhas na pista interna

$$f_{pi} = \left| f \pm m \cdot \frac{n}{2} \cdot f_{rm} \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \right| \quad (4.16)$$

Ou:

$$f_{pi} = |f \pm 0.6 \cdot n \cdot f_{rm}| \quad (4.17)$$

- Falhas na pista externa

$$f_{pe} = \left| f \pm m \cdot \frac{n}{2} \cdot f_{rm} \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \right| \quad (4.18)$$

Ou:

$$f_{pe} = |f \pm 0.4 \cdot n \cdot f_{rm}| \quad (4.19)$$

As figuras 4.8 e 4.9 apresentam respectivamente os espectros de falha na pista interna e na pista externa do rolamento (utilizando respectivamente as equações 4.16 e 4.18 e fazendo $m=1$) de um motor com as mesmas características do exemplo anterior.

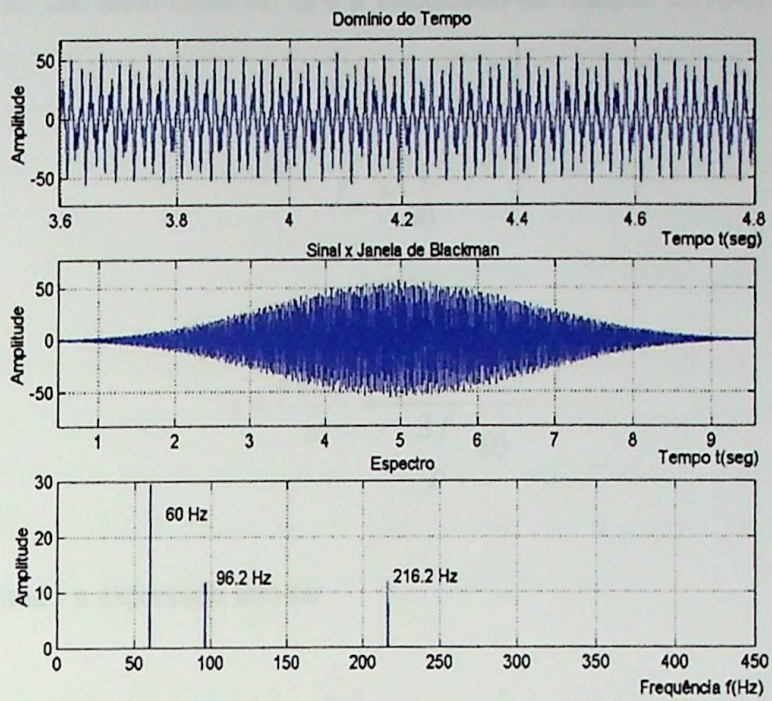


Figura 4.8: Espectro simulado de falha na pista interna

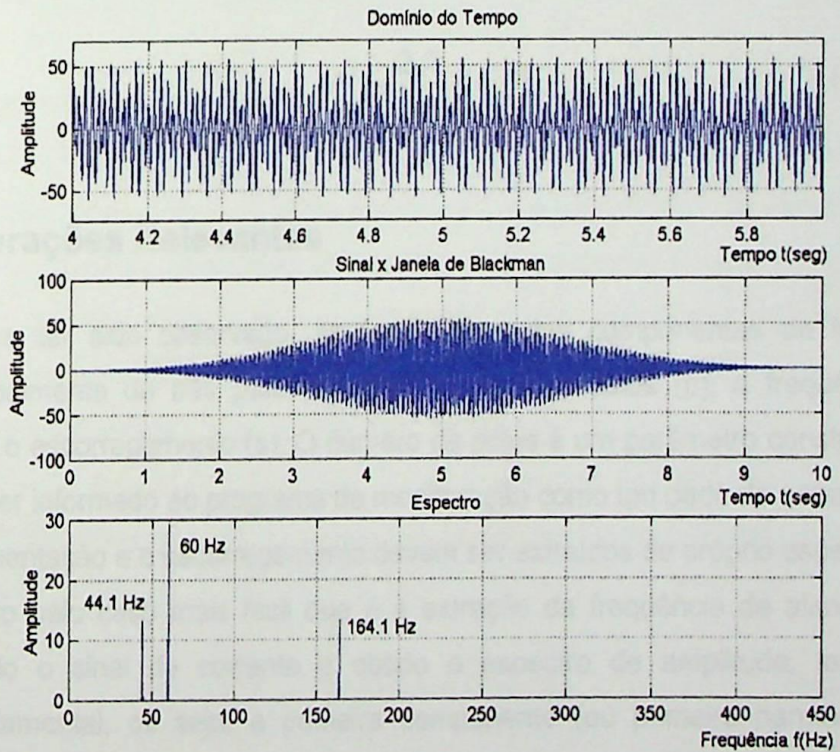


Figura 4.9: Espectro simulado de falha na pista externa

Resta ainda garantir o cálculo automático das componentes de falha do rolamento. Para isso f_{rm} deve ser calculada em função do escorregamento, frequência de alimentação e número de pólos.

Como foi dito anteriormente, f_{rm} é a velocidade de rotação do rotor em Hertz, ou seja:

$$f_{rm} = \frac{n_r}{60} \tag{4.20}$$

Como:

$$s = \frac{n - n_r}{n} = \frac{\frac{2f}{p} \cdot 60 - n_r}{\frac{2f}{p} \cdot 60}$$

E simplificando a expressão tem-se:

$$n_r = \frac{2f}{p} \cdot 60 \cdot (1 - s) \tag{4.21}$$

Logo:

$$f_{rm} = \frac{2f}{p} \cdot (1 - s) \tag{4.22}$$

4.3 _ Considerações Relevantes

Como deve ter sido observado, as freqüências das componentes de interesse dependem principalmente de três parâmetros: o número de pólos (p), a freqüência de alimentação (f), e o escorregamento (s). O número de pólos é um parâmetro construtivo da máquina e deve ser informado ao programa de monitoração como um dado de entrada. Já a freqüência de alimentação e o escorregamento devem ser extraídos do próprio espectro.

Começando pelo caso mais fácil que é a extração da freqüência de alimentação. Depois de colhido o sinal de corrente e obtido o espectro de amplitude, ter-se-á a componente fundamental, ou seja, a primeira componente (ou primeiro harmônico) da freqüência de alimentação apresentando a maior amplitude dentre todas as componentes que aparecem no espectro. Sendo assim, é suficiente se executar uma varredura no vetor de amplitudes com o propósito de se obter o valor máximo do mesmo e depois localizar qual componente de freqüência possui tal amplitude. Como pode ser observado a seguir, esta tarefa é extremamente simples de ser realizada no Matlab:

```

% detectando a frequência de alimentação
[maximo,indice] = max(vetor_amplitude); % retorna a máxima amplitude e o índice
                                        % do elemento no vetor
f = vetor_freq(indice);                % retorna a frequência associada ao
                                        % valor máximo encontrado que é,
                                        % justamente, a frequência procurada
    
```

Já a estimação do escorregamento merece uma análise mais cuidadosa. O algoritmo usado para se estimar o escorregamento utilizando-se o espectro da corrente do estator é parte do algoritmo proposto por [B16]. O único parâmetro exigido como entrada para a estimação do escorregamento é o número de pólos. Antes de se iniciar a execução do algoritmo propriamente dito, deve-se tomar algumas providências como:

- Realizar a FFT com alta resolução para garantir a precisão do escorregamento estimado.
- Definir a máxima variação do escorregamento dentro do processo no qual o motor está inserido.

Cumprida as exigências anteriores, pode-se dar início ao algoritmo de estimação do escorregamento. A idéia central do algoritmo está na identificação da componente de frequência de excentricidade. Isso se deve ao fato de que harmônicas de excentricidade estão presentes na maioria dos motores de indução trifásicos. Essas componentes aparecem devido a imperfeições no processo de produção do rotor, núcleo do estator oval, desalinhamento do eixo, ou variações de resistência nas barras do rotor. Contudo, se a componente de excentricidade não puder ser detectada, o algoritmo não responde corretamente.

Como visto anteriormente, as componentes de frequência de excentricidade do *air-gap* são dadas por:

$$f_{exc} = f \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \right] \quad (4.23)$$

Contudo, a componente a ser analisada é aquela que mais responde na presença de qualquer tipo de excentricidade, ou seja, a banda lateral esquerda do primeiro par de harmônicas:

$$f_{exc} = f \cdot \left[1 - \left(\frac{1-s}{p/2} \right) \right] \quad (4.24)$$

Resta agora realizar uma varredura dentro de uma faixa de frequência limitada pela variação máxima de velocidade do processo com intuito de se identificar um pico protuberante dentro dessa faixa que corresponde à frequência de excentricidade procurada. Encontrada esta componente tem-se então o escorregamento estimado que será dado por:

$$S_{\text{estimado}} = \frac{p}{2} \cdot \left(\frac{f_{\text{exc}}}{f} - 1 \right) + 1 \quad (4.25)$$

Seja o exemplo abaixo, onde se obteve o escorregamento estimado de um sinal real extraído de um motor de indução trifásico de 4 pólos. Inicialmente, verificou-se que a velocidade do motor variava entre 1670 e 1720 RPM para a variação de carga que ocorria no ensaio. Desta forma, foi possível se determinar a variação do escorregamento ($s \in [0.04, 0.07]$) e a faixa de frequência a ser inspecionada a procura da frequência de excentricidade ($f_{\text{exc}} \in [31.2, 32.0]$ Hz). Seja o espectro do exemplo em questão:

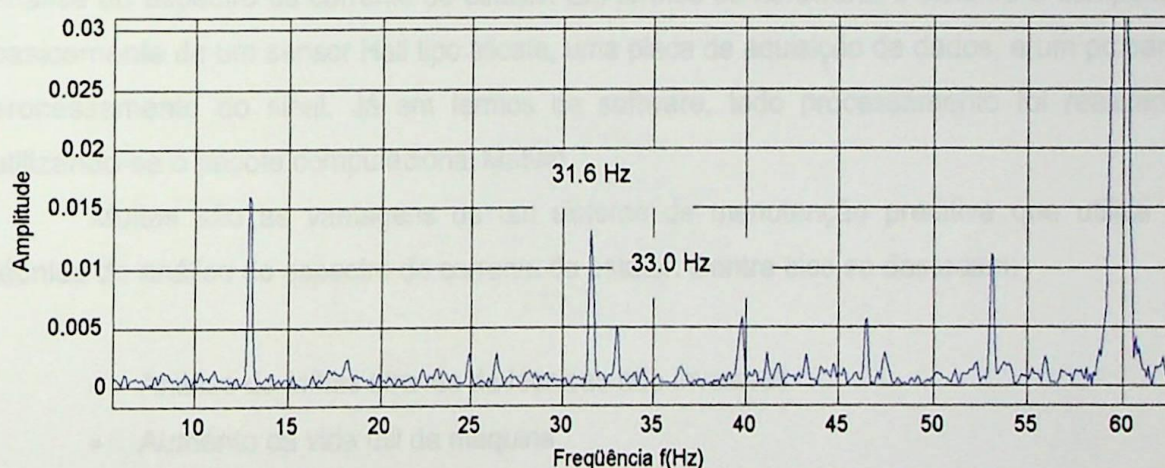


Figura 4.10: Estimação do escorregamento através da componente de excentricidade

Da varredura feita na faixa de frequência selecionada, encontrou-se a frequência de 31.6 Hz como sendo a frequência cujo pico era o mais protuberante. Logo:

$$S_{\text{estimado}} = \frac{4}{2} \cdot \left(\frac{31.6}{59.9} - 1 \right) + 1 = 0.0569$$

Com o escorregamento de 0.0569, resulta uma velocidade de 1698 RPM que estava em concordância com a indicação do tacômetro lida no laboratório.

O SISTEMA DE MONITORAÇÃO PROPOSTO

Como pôde ser observado, a técnica de análise do espectro da corrente do estator vem ganhando destaque especial dentre as técnicas de manutenção preditiva. Este capítulo apresenta o sistema de monitoração para aplicações em manutenção preditiva que monitora, única e exclusivamente, o comportamento do sinal de corrente do estator, com o objetivo de detectar falhas em motores de indução trifásicos antes que elas ocorram.

5.1 _ Introdução

Como já foi observado, o sistema de monitoração proposto visa realizar a manutenção preditiva de motores de indução trifásicos e está fundamentado na técnica de análise do espectro da corrente do estator. Em termos de hardware, o sistema é composto basicamente de um sensor Hall tipo alicate, uma placa de aquisição de dados, e um pc para processamento do sinal. Já em termos de software, todo processamento foi realizado utilizando-se o pacote computacional Matlab.

Muitas são as vantagens de um sistema de manutenção preditiva que utiliza a técnica de análise do espectro de corrente do estator. Dentre elas se destacam:

- Análise de falhas através de técnicas não invasivas
- Aumento da vida útil da máquina
- Redução de manutenção corretiva
- Redução de paradas não-programadas de produção
- Redução do consumo de energia
- O equipamento de aquisição pode ser instalado no painel de alimentação, propiciando a monitoração de máquinas de difícil acesso
- Menor dificuldade na implementação de um sistema de diagnóstico automático de falhas baseado em técnicas de inteligência artificial, eliminando a necessidade de um especialista.

É importante ressaltar que as duas últimas vantagens se referem apenas a técnica de análise do espectro da corrente do estator, enquanto que as demais são comuns

à todas as técnicas de manutenção preditiva que não necessitam de acesso ao interior da máquina.

5.2 _ O Sistema de Monitoração

A representação esquemática do sistema de monitoração é apresentada na figura 5.1. Nota-se da figura que a aquisição do sinal de corrente do estator é feita através de um sensor Hall posicionado em uma das fases. Na etapa seguinte, tem início o processo de filtragem do sinal, na qual um filtro passa-baixa remove as componentes de alta frequência, indesejáveis por produzirem *aliasing* do sinal que será amostrado. Para se dar início ao processamento digital do sinal, é necessário se efetuar a conversão do sinal de analógico para digital. Na etapa do processamento, serão diversas as ferramentas utilizadas no tratamento e inspeção do sinal. Como exemplo, cita-se a transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, a utilização de médias com o intuito de reduzir ou até mesmo eliminar sinais aleatórios, e o cálculo de níveis globais da intensidade da falha visando o estabelecimento de níveis de alarme.

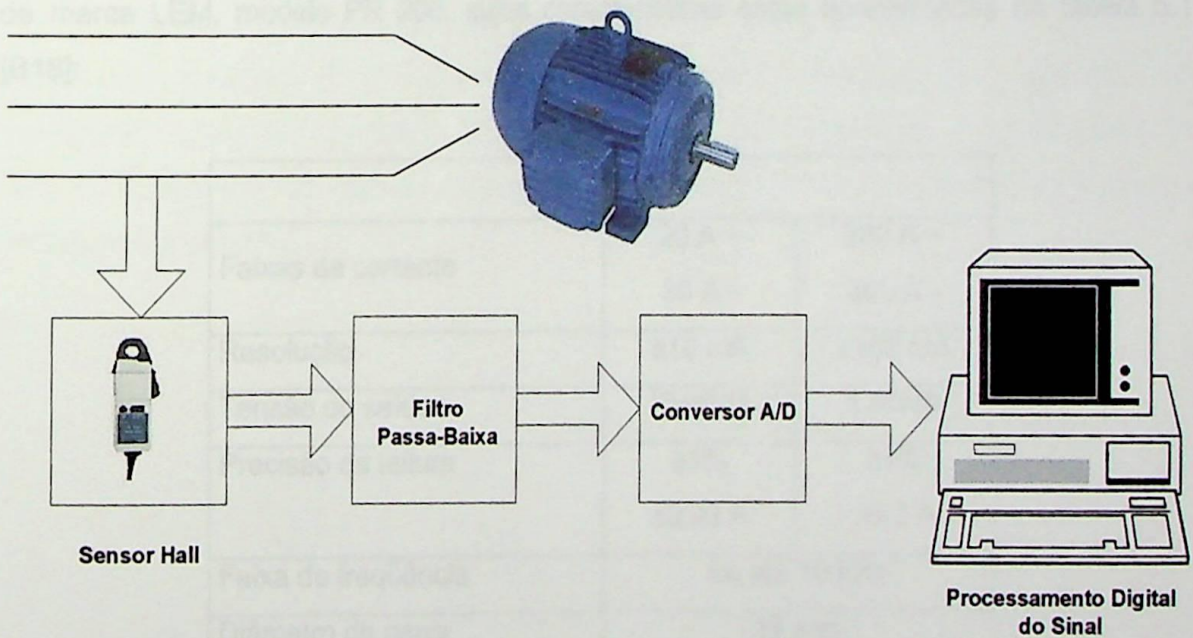


Figura 5.1: Sistema para Monitoração do Sinal de Corrente

5.2.1 _ O Hardware Utilizado

Uma grande vantagem do sistema de manutenção preditiva proposto está na simplicidade do hardware. Para se executar a monitoração da saúde do motor de indução trifásico necessita-se apenas do sinal de corrente de uma das fases do motor. A tarefa de se

obter este sinal está a cargo de um sensor Hall tipo alicate. Obtido o sinal de corrente, utiliza-se de um filtro analógico passa-baixa para cumprimento do teorema de Nyquist. O terceiro elemento de hardware do sistema é uma placa de aquisição que recebe o sinal analógico filtrado e converte para um sinal digital que será enfim processado. Seja a descrição de cada um dos elementos utilizados no sistema em questão:

A) Sensor Hall

A sonda Hall empregada gera uma saída em tensão que é uma imagem da corrente, independentemente do sinal ser DC, AC, uma composição dos dois tipos, ou ainda, uma forma de onda bastante complexa. Além disso, a sonda de efeito Hall propicia uma saída em tensão não defasada e proporcional a corrente medida.

Uma grande vantagem da utilização de sondas Hall quando comparadas aos transdutores de corrente usuais baseados no princípio da transformação, é a habilidade para se medir correntes AC, DC e sinais complexos em uma faixa dinâmica que pode ir de 5mA a 2000 A e com faixas de frequência de 0 a 100kHz [B17].

Nos experimentos realizados em laboratório foi utilizado um sensor Hall tipo alicate da marca LEM, modelo PR 200, cujas características estão apresentadas na tabela 5.1 [B18]:

PR200		
Faixas de corrente	20 A ~ 30 A -	200 A ~ 300 A -
Resolução	±10 mA	±100 mA
Tensão de saída	10 mV/A	1 mV/A
Precisão da leitura	±1% ±0.03 A	±1% ±0.3 A
Faixa de frequência	Dc até 10 kHz	
Diâmetro da garra	19 mm	
Fonte	Bateria de 9V	

Tabela 5.1: Especificações da sonda PR200

A figura 5.2 apresenta a sonda Hall utilizada:



Figura 5.2: Sonda Hall utilizada

B) Filtro passa-baixa

Como visto anteriormente, o filtro passa-baixa deve remover todas as componentes acima da frequência de Nyquist com o intuito de se evitar o *aliasing* do sinal. Três tipos de filtros analógicos são comumente empregados: Chebyshev, Butterworth, e Bessel. Cada um desses filtros é projetado para melhorar um determinado parâmetro do filtro. Além disso, a complexidade de cada filtro pode ser ajustada selecionando-se o número de pólos e zeros do filtro. Quanto maior o número de pólos melhor sua performance.

A figura 5.3 apresenta o projeto de um filtro analógico conhecido como circuito Sallen-Key modificado [B19]. Trata-se de um filtro passa-baixa de dois pólos que pode ser configurado como Chebyshev, Butterworth, ou Bessel, ajustando-se apenas os parâmetros k_1 e k_2 . Além disso, um filtro de mais pólos pode ser implementado utilizando-se a mesma estrutura em cascata.

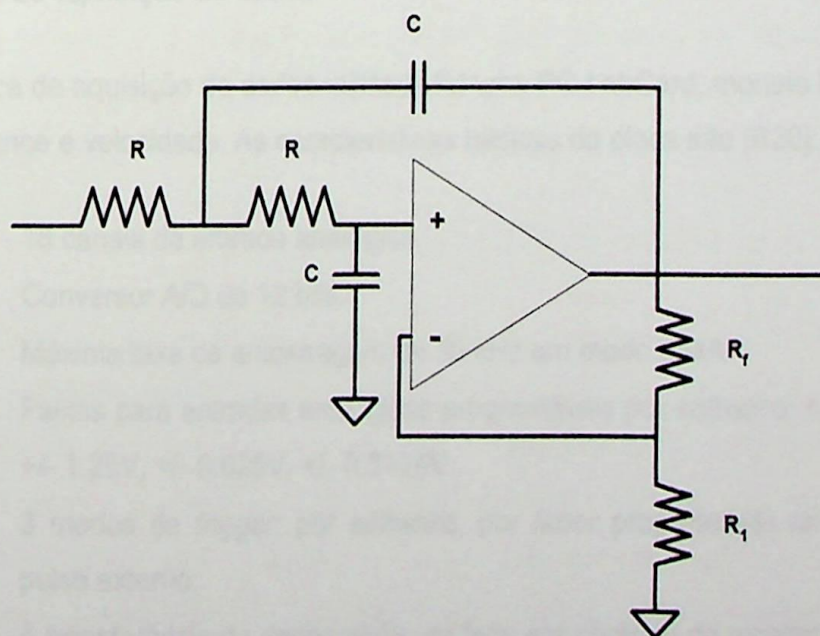


Figura 5.3: Circuito Sallen-Key modificado

Os parâmetros k_1 e k_2 saem de uma tabela [B19], R_1 e C são escolhidos arbitrariamente, e R e R_f são calculados através das fórmulas:

$$R = \frac{k_1}{Cf_c} \quad (5.1)$$

$$R_f = R_1 k_2 \quad (5.2)$$

Onde:

f_c é a frequência de corte

Considerando o que foi descrito anteriormente, torna-se importante discutir as características dos três filtros clássicos mencionados. O primeiro parâmetro a ser explorado é o decaimento do filtro, ou seja, o corte em amplitude tão rápido quanto possível após a frequência de corte. Neste quesito, o filtro Chebyshev apresenta a melhor performance. O segundo parâmetro é o *ripple* da banda de passagem. Neste caso, enquanto os filtros Butterworth e Bessel não apresentam ripple na banda de passagem, o filtro Chebyshev consegue um decaimento mais rápido em função da existência do ripple. Quanto maior o nível de ripple mais rápido é o decaimento. O último parâmetro a ser comparado é a resposta a degrau, ou seja, como o filtro responde quando a entrada varia rapidamente de um valor para outro. Enquanto os filtros Chebyshev e Butterworth apresentam *overshoot* e oscilações que diminuem em amplitude, Bessel não tem nenhum dos dois problemas. Desta forma, conclui-se que o tipo de filtro a ser escolhido depende da aplicação a qual ele se destina. Nesta aplicação utilizou-se um Butterworth de oitava ordem.

C) Placa de aquisição de dados

A placa de aquisição de dados utilizada foi uma PC-LabCard, modelo PCL-812PG de alta performance e velocidade. As características básicas da placa são [B20]:

- 16 canais de entrada analógica.
- Conversor A/D de 12 bits.
- Máxima taxa de amostragem de 30 kHz em modo DMA.
- Faixas para entradas analógicas programáveis por software: +/- 5V, +/- 2.5V, +/- 1.25V, +/- 0.625V, +/- 0.3125V.
- 3 modos de *trigger*: por software, por *timer* programável *on-board*, ou por pulso externo.
- A transferência de dados pode ser feita por controle do programa, controle de interrupção, ou DMA.

- 2 canais de saída analógica com resolução de 12 bits e faixas de saída de 0 a +5V ou de 0 a +10V com referencia fixa de -5V ou -10V.
- 16 canais de entrada digital compatíveis com níveis TTL.
- 16 canais de saída digital compatíveis com níveis TTL.

5.2.2 _ O Programa Desenvolvido

Os programas que executam a aquisição do sinal e seu processamento foram desenvolvidos utilizando-se o pacote computacional MATLAB. O processo se inicia com a aquisição do sinal que é realizada através da *Toolbox* de tempo real do MATLAB. Com o sinal já colhido tem-se início a etapa de processamento desse sinal que é composta principalmente por filtragem digital e cálculo do espectro do sinal. Seja a descrição de cada um desses programas:

A) Aquisição do sinal através da *toolbox* de tempo real

A *toolbox* de tempo real propicia a geração de códigos a partir de modelos feitos no *Simulink*. Várias são as aplicações e utilidades dessa *toolbox* [B21], contudo neste trabalho, ela foi utilizada apenas para gerenciar a aquisição do sinal. O programa em *simulink* é extremamente simples. Sua função é realizar a aquisição do sinal e mandá-lo para o *workspace* do *Matlab*, além de salvar o sinal coletado em um arquivo de dados que será chamado pelos programas que processam este sinal. Ao mesmo tempo em que executa as ações anteriores, o programa exibe o sinal que está sendo colhido no *scope*.

Alguns parâmetros devem ser definidos, dentre eles destacam-se: o período de amostragem do sinal (T_s), o tempo total de aquisição do sinal, as variáveis que serão enviadas para o *workspace* (tempo e amplitude do sinal), o número de pontos que serão armazenados, o diretório e o nome do arquivo de dados, e os parâmetros do *scope*.

B) Programa para cálculo do espectro de freqüência da corrente do estator

O programa para se gerar o espectro de freqüência da corrente do estator e se calcular as freqüências de interesse, ou seja, as freqüências que indicam ou não a presença de falhas, exige como dados de entrada apenas o número de pólos da máquina e o número de elementos girantes do rolamento. Após a realização dos cálculos necessários tem-se na saída o espectro da corrente do estator, o escorregamento estimado, e as freqüências de interesse. A figura 5.4 apresenta o algoritmo implementado para o cálculo dessas saídas:

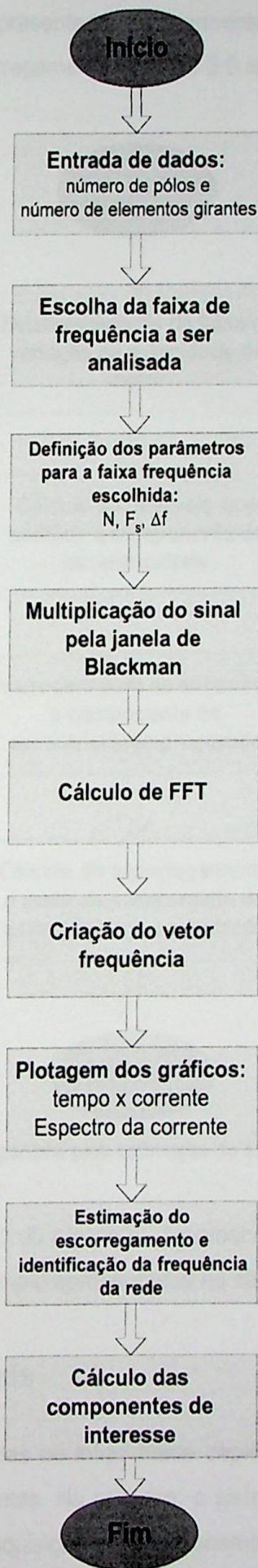


Figura 5.4: Algoritmo para cálculo do espectro de frequência

Dentro do algoritmo apresentado anteriormente, merece especial destaque o algoritmo de estimação do escorregamento. A figura 5.5 apresenta este algoritmo:

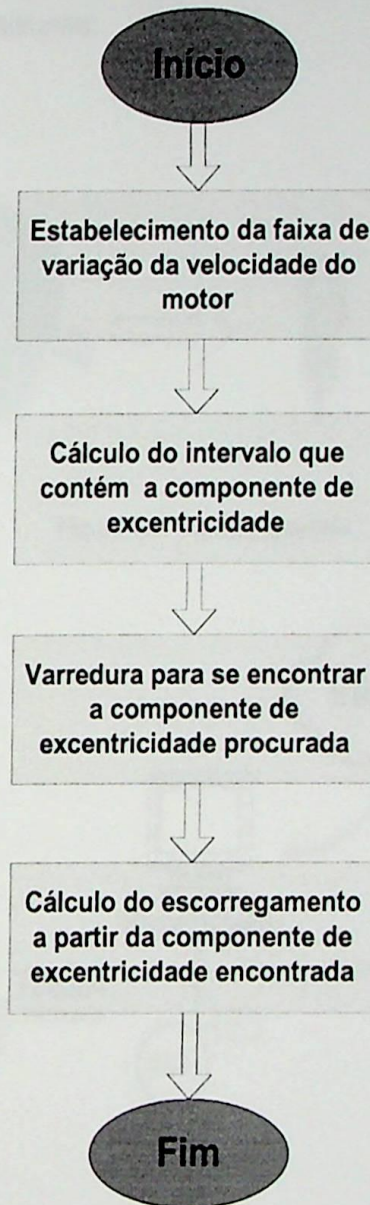


Figura 5.5: Algoritmo para estimação do escorregamento

Para melhor entendimento do algoritmo, recomenda-se a comparação deste com a descrição detalhada e com o exemplo apresentados no item 4.3 do capítulo anterior.

5.3 _ Considerações Finais

Além das vantagens citadas no início deste capítulo, o sistema proposto pode ser empregado de duas formas distintas. Na primeira, o sistema de monitoração é constituído de duas partes: uma caixa de aquisição e condicionamento do sinal, e um *pocket pc* ou *notebook* para processamento do sinal. Este sistema pode ser denominado de sistema de

monitoração portátil e é usado para colher e analisar sinais de vários motores separadamente. A segunda forma de utilização do sistema proposto é em rede, permitindo o monitoramento remoto de uma grande gama de motores. As figuras 5.6 e 5.7 apresentam as duas formas de emprego do sistema:

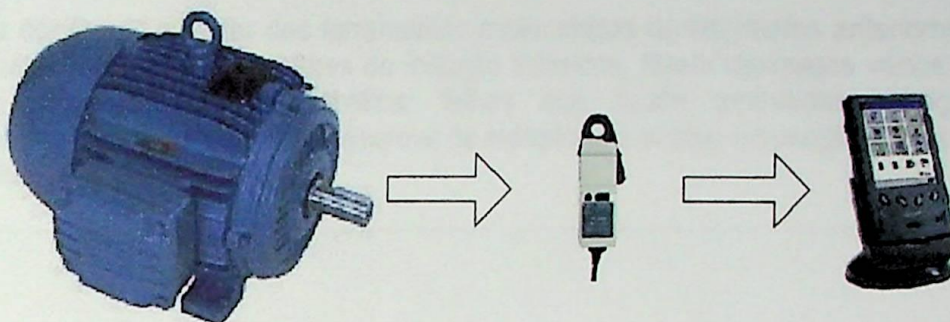


Figura 5.6: Sistema portátil

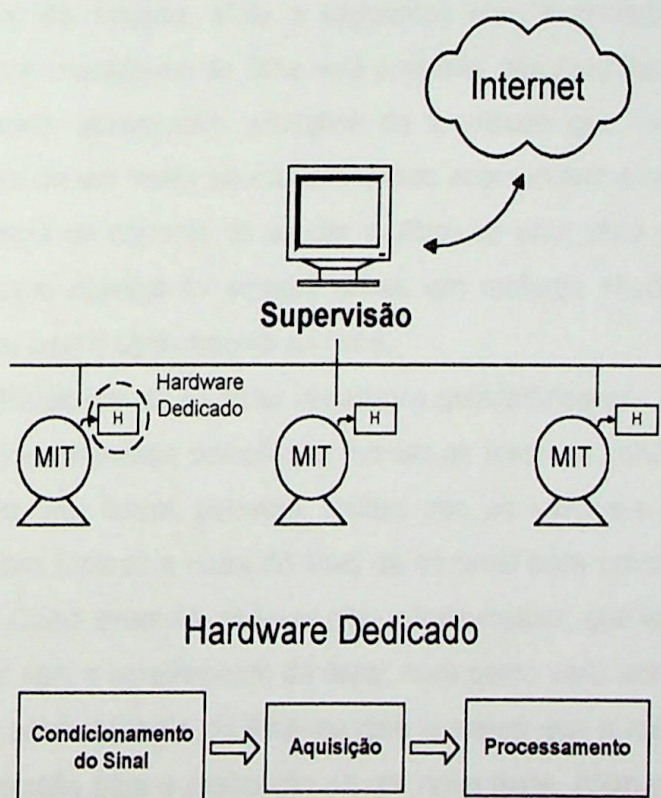


Figura 5.7: Sistema em rede

RESULTADOS

Visando confirmar o poder das ferramentas matemáticas apresentadas anteriormente na monitoração da saúde de motores de indução trifásicos, foram realizados vários ensaios com o propósito de se identificar falhas que foram embutidas e agravadas progressivamente. Este capítulo descreve os métodos de ensaio empregados e apresenta os resultados obtidos.

6.1 _ Considerações Iniciais

Dos capítulos anteriores tem-se que o aparecimento de certas falhas, que são sentidas pelo motor de indução, afeta a segurança e/ou a produtividade do processo produtivo. Quando um mecanismo de falha está presente, algumas frequências do espectro da corrente do estator apresentam variações de amplitude que tornam esse espectro diferente do espectro de um motor saudável. Visando acompanhar a evolução de falhas no espectro de frequência da corrente do estator realizou-se uma série de experimentos em laboratório. O principal objetivo foi embutir falhas em motores saudáveis e constatar a resposta do espectro com o agravamento da falha.

A principal dificuldade de se obter resultados satisfatórios em laboratório reside no fato de que é consideravelmente complicado manter as mesmas condições de ensaio em cada teste efetuado. Em outras palavras, muitas são as variáveis que sofrem alguma modificação entre uma tomada e outra do sinal de corrente para processamento e análise da resposta à falha. Como exemplo, pode-se citar a temperatura, que varia a medida que se exige mais do motor com o agravamento da falha, bem como varia com o tempo em que a máquina fica ligada para obtenção do sinal ou com o tempo que a mesma fica inoperante aguardando a preparação para a realização de um novo teste. Além disso, em testes nos quais se necessita abrir a máquina para embutir a falha, tem-se problemas adicionais como o de garantir o mesmo alinhamento com a carga.

Os ensaios realizados buscaram diagnosticar falhas do rotor como excentricidade, falhas no rolamento como um defeito na pista externa, e falhas na carga como desbalanceamento dinâmico.

6.2 _ A Montagem Utilizada em Laboratório

A montagem realizada em laboratório consistiu de um motor de indução trifásico acoplado à uma máquina de corrente contínua atuando como gerador, que por sua vez alimenta um banco de resistências. Os sinais foram colhidos mantendo-se a corrente de excitação da máquina de corrente contínua constante. Isto foi feito com o intuito de se manter a carga constante e observar o aumento da corrente exigida pelo motor em função do agravamento da falha. As figuras 6.1 e 6.2 apresentam a montagem realizada e o esquema de ligação respectivamente.

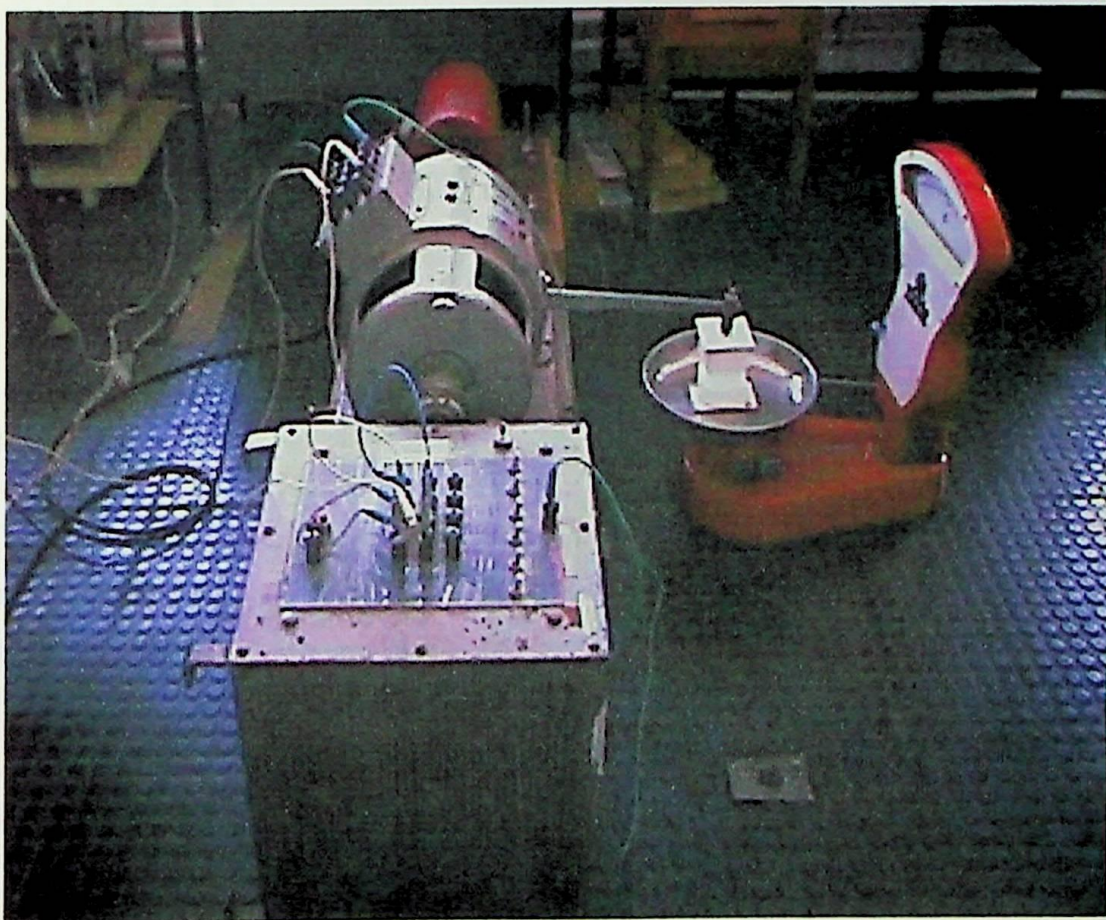


Figura 6.1: Grupo motor-gerador utilizado nos ensaios

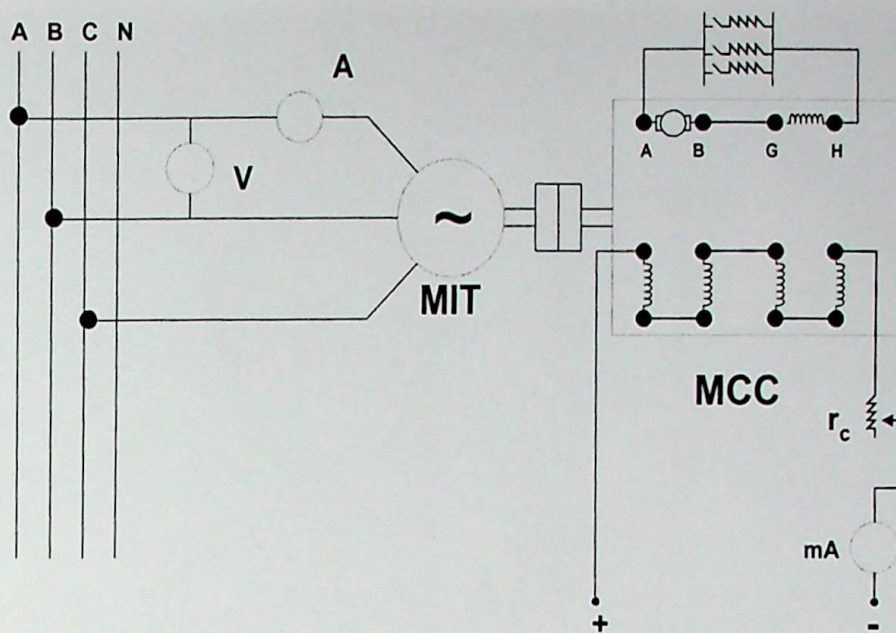


Figura 6.2: Esquema de ligação

6.3 _ Identificação de Falhas Mecânicas em Motores de Indução Trifásicos Conectados Diretamente à Rede

6.3.1 _ Excentricidade do *Air-gap*

No ensaio realizado em laboratório para verificação do mecanismo da falha de excentricidade do *air-gap* foram analisados dois casos de desalinhamento do eixo. São eles: desalinhamento horizontal e desalinhamento vertical. Para cada um dos casos foram induzidos, mecanicamente, diferentes graus de intensidade de falha.

O motor de indução trifásico utilizado no ensaio foi um motor de 3 HP da marca Búfalo com os seguintes dados de placa:

Tensão	220/380 V
Corrente	9.1/5.27 A
Número de pólos	4
Velocidade	1700 RPM
Frequência	60 Hz
I_p/I_n	6
Classe de isolamento	B

A montagem utilizada para a realização do ensaio está representada na figura 6.3.

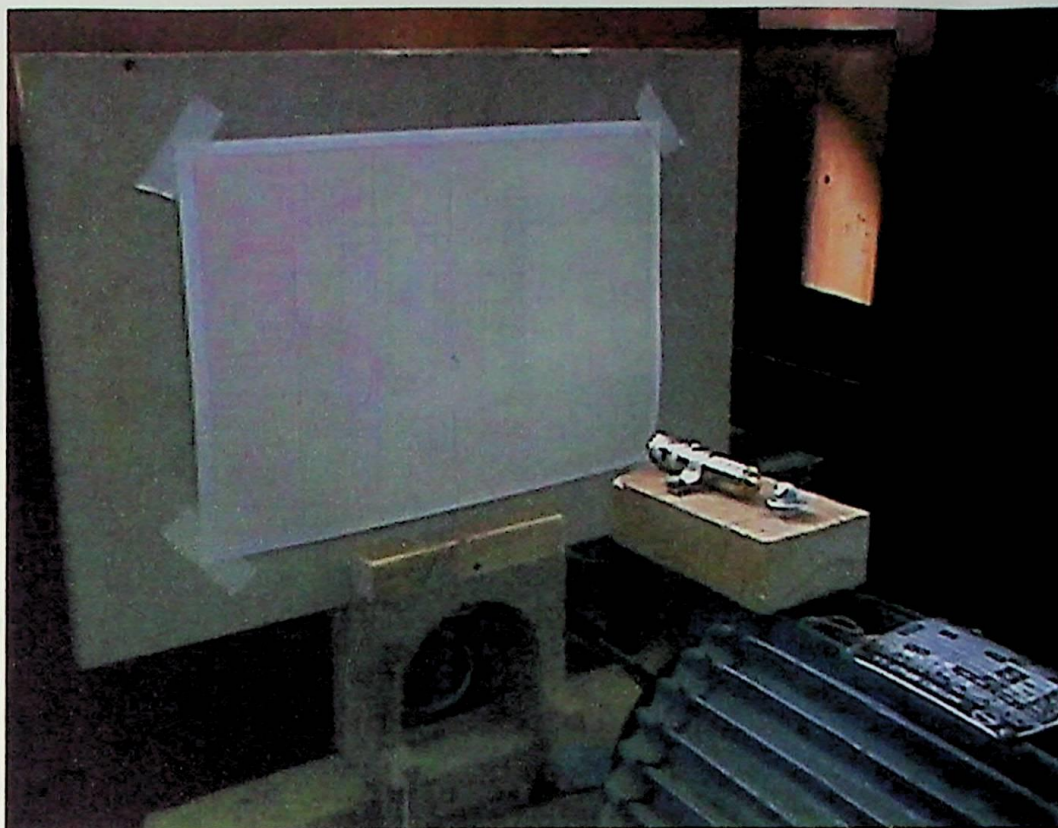


Figura 6.3: Laser acoplado a parte posterior do motor para garantir o aumento da severidade do desalinhamento

Observe que a leitura do grau do desalinhamento é feita com a ajuda de um laser posicionado na parte posterior do MIT e um anteparo situado a 25cm do MIT.

6.3.1.1 – Desalinhamento Horizontal

Para o desalinhamento angular horizontal testou-se três distâncias do eixo central de referência: $d_1 = 1.36\text{mm}$, $d_2 = 2.18\text{mm}$, e $d_3 = 2.73\text{mm}$. Estas medidas se referem à distância existente entre a linha de centro da máquina de corrente contínua e linha de centro deslocada do motor, tomada na parte posterior do MIT. A figura 6.4 torna mais clara a compreensão do processo:

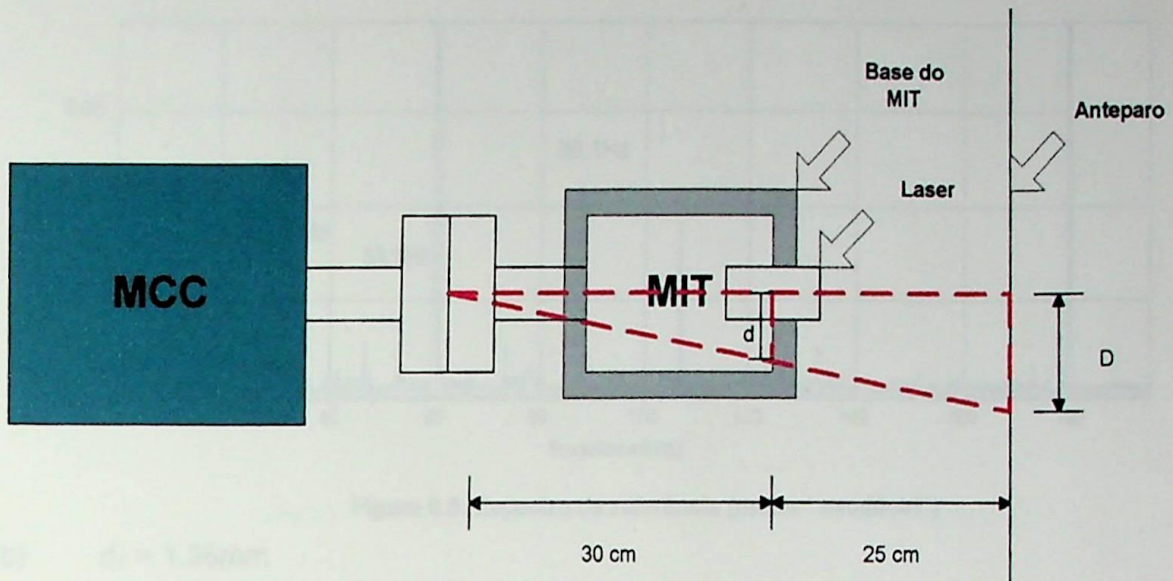


Figura 6.4: Procedimento para se determinar o grau de severidade do desalinhamento horizontal

Assim, tem-se a seguinte relação entre a indicação lida no anteparo (D) e a distância usada como referência para o agravamento da falha (d):

$$\frac{D}{d} = \frac{25 + 30}{30}$$

Logo:

$$d = 0.545 \cdot D$$

Como $D_1 = 2.5\text{mm}$, $D_2 = 4\text{mm}$, $D_3 = 5\text{mm}$, tem-se: $d_1 = 1.36\text{mm}$, $d_2 = 2.18\text{mm}$, e $d_3 = 2.73\text{mm}$.

As figuras 6.5 a 6.8 apresentam os espectros referentes a condição normal e as condições de falha d_1 , d_2 , e d_3 . Além disso, são explicitados os valores das seguintes grandezas de interesse: corrente de excitação da máquina de corrente contínua (I_{exc}), corrente da fase monitorada (I_A), potência mecânica no eixo (P_{mec}), escorregamento da máquina (s), e velocidade de rotação (n).

a) Normal:

$$I_{\text{exc}} = 306.2 \text{ mA} \quad I_A = 8.6 \text{ A} \quad M = 2540 \text{ g} \quad s = 0.0569 \quad n = 1698 \text{ RPM} \quad P_{\text{mec}} = 2.53 \text{ HP}$$

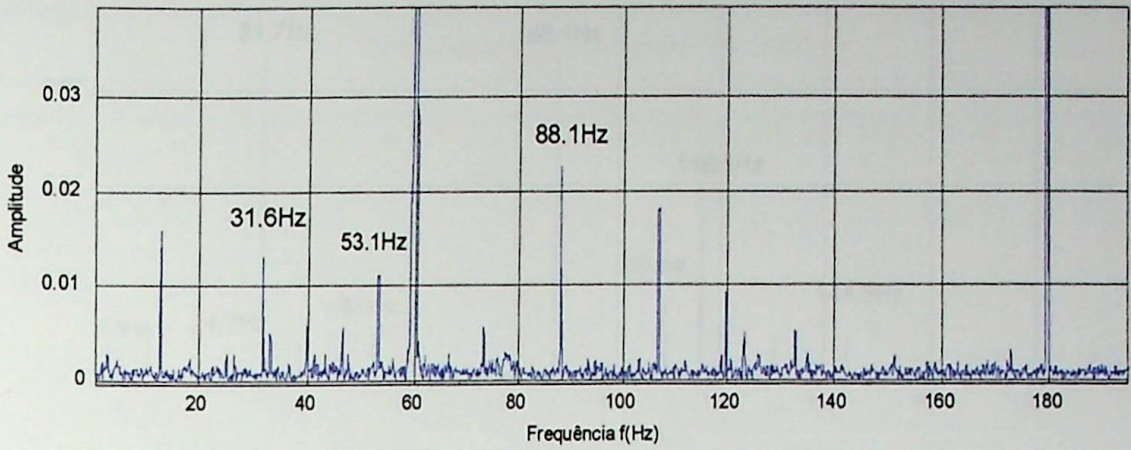


Figura 6.5: Espectro de referência (motor "saudável")

b) $d_1 = 1.36\text{mm}$

$I_{exc} = 306.6\text{ mA}$ $I_A = 8.6\text{ A}$ $M = 2560\text{ g}$ $s = 0.0584$ $n = 1692\text{ RPM}$ $P_{mec} = 2,54\text{ HP}$

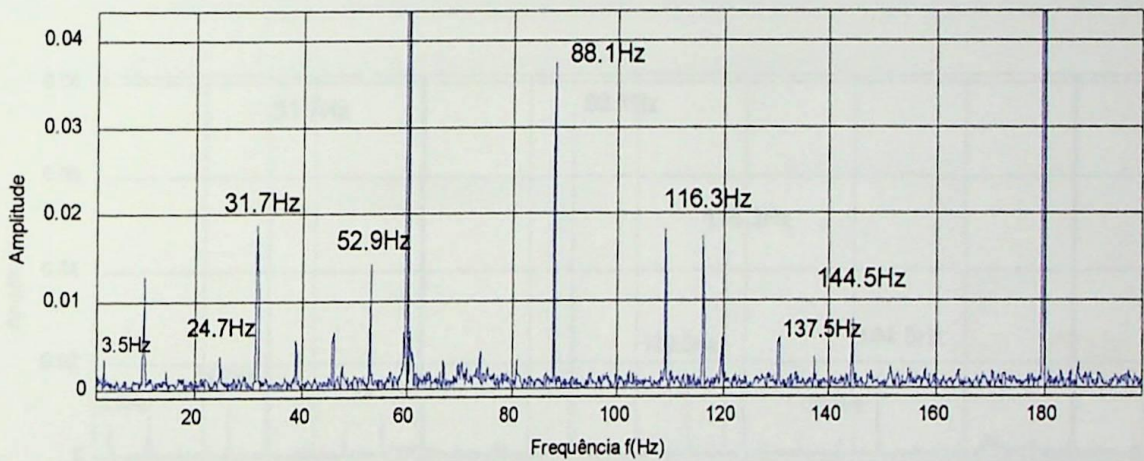


Figura 6.6: Espectro com desalinhamento horizontal de 1.36 mm (d_1)

c) $d_2 = 2.18\text{mm}$

$I_{exc} = 306.2\text{ mA}$ $I_A = 8.7\text{ A}$ $M = 2550\text{ g}$ $s = 0.0584$ $n = 1692\text{ RPM}$ $P_{mec} = 2.53\text{ HP}$

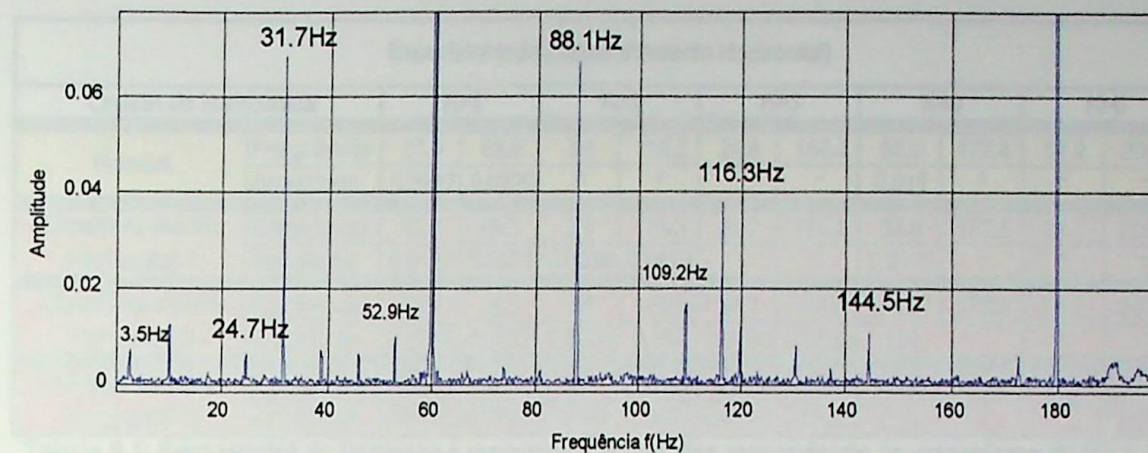


Figura 6.7: Espectro com desalinhamento horizontal de 2.18 mm (d_2)

d) $d_3 = 2.73\text{mm}$

$I_{exc} = 306.5\text{ mA}$ $I_A = 8.7\text{ A}$ $M = 2550$ $s = 0.0584$ $n = 1692\text{ RPM}$ $P_{mec} = 2.53\text{ HP}$

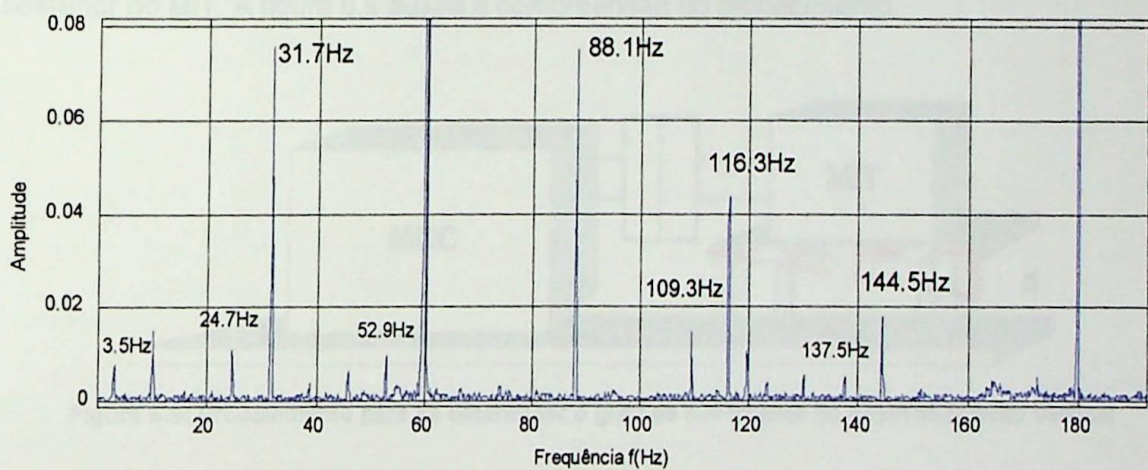


Figura 6.8: Espectro com desalinhamento horizontal de 2.73 mm (d_3)

O crescimento da amplitude da maioria das componentes é visível, contudo a tabela 6.1 ajuda a visualizar melhor o agravamento da falha através do crescimento dos picos centrados nas frequências de interesse. Nota-se na tabela a presença de asteriscos cuja função é a de indicar que a amplitude da componente de frequência estudada não ultrapassou o nível de ruído.

Excentricidade (Desalinhamento Horizontal)											
Ordem da Harmônica		K=1		K=2		K=3		K=4		K=5	
Normal	Frequência	31.6	88.0	3.4	116.2	24.8	144.4	53.0	172.6	81.2	200.8
	Amplitude	0.0132	0.0226	*	*	*	*	0.011	*	*	*
Desalinhamento Horizontal 1	Frequência	31.7	88.1	3.5	116.3	24.7	144.5	52.9	172.5	81.1	200.9
	Amplitude	0.0187	0.0375	0.0035	0.0173	*	*	0.0142	*	*	*
Desalinhamento Horizontal 2	Frequência	31.7	88.1	3.5	116.3	24.7	144.5	52.9	172.5	81.1	200.9
	Amplitude	0.0684	0.0672	0.0073	0.038	0.0066	0.0180	0.01		*	*
Desalinhamento Horizontal 3	Frequência	31.7	88.1	3.5	116.3	24.7	144.5	52.9	172.5	81.1	200.9
	Amplitude	0.0758	0.0748	0.0078	0.0437	0.0111	0.0181	0.01	*	*	*

Tabela 6.1: Frequências de interesse e respectivas amplitudes respondendo ao mecanismo de falha de desalinhamento horizontal

6.3.1.2 – Desalinhamento Vertical

Para o desalinhamento vertical testou-se dois graus de severidade da falha: $dv_1 = 2\text{mm}$, $dv_2 = 4\text{mm}$. Estes desalinhamentos foram impostos rebaixando-se a base na parte posterior do MIT. A figura 6.9 auxilia a compreensão do procedimento.

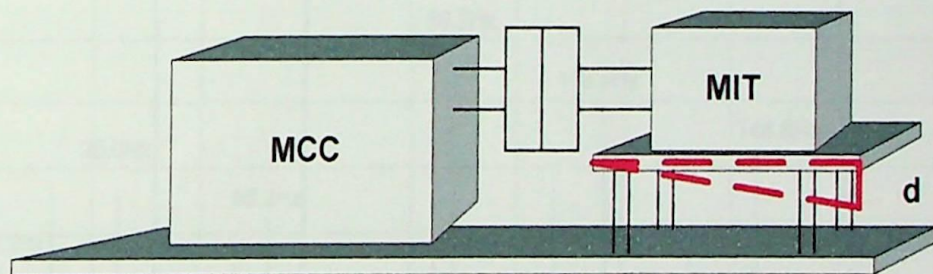


Figura 6.9: Procedimento para se determinar o grau de severidade do desalinhamento vertical

As figuras 6.10 a 6.12 apresentam os espectros referentes à condição normal e as condições de falha dv_1 , dv_2 . Além disso, são explicitados os valores das seguintes grandezas de interesse: corrente de excitação da máquina de corrente contínua (I_{exc}), corrente da fase monitorada (I_A), potência mecânica no eixo (P_{mec}), escorregamento da máquina (s), e velocidade de rotação (n).

a) Normal

$$I_{exc} = 306.6 \text{ mA} \quad I_A = 8.7 \text{ A} \quad M = 2590 \text{ g} \quad s = 0.0584 \quad n = 1692 \text{ RPM} \quad P_{mec} = 2.57 \text{ HP}$$

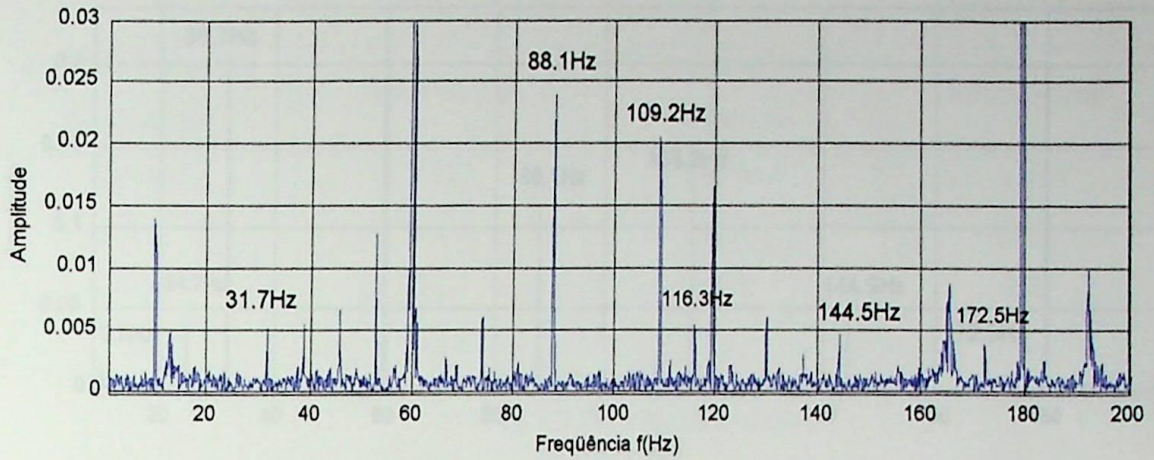


Figura 6.10: Espectro de referência (motor "saudável")

b) $dv_1 = 2\text{mm}$

$I_{exc} = 306.2\text{ mA}$ $I_A = 8.6\text{ A}$ $M = 2560\text{ g}$ $s = 0.0551$ $n = 1698\text{ RPM}$ $P_{mec} = 2.55\text{ HP}$

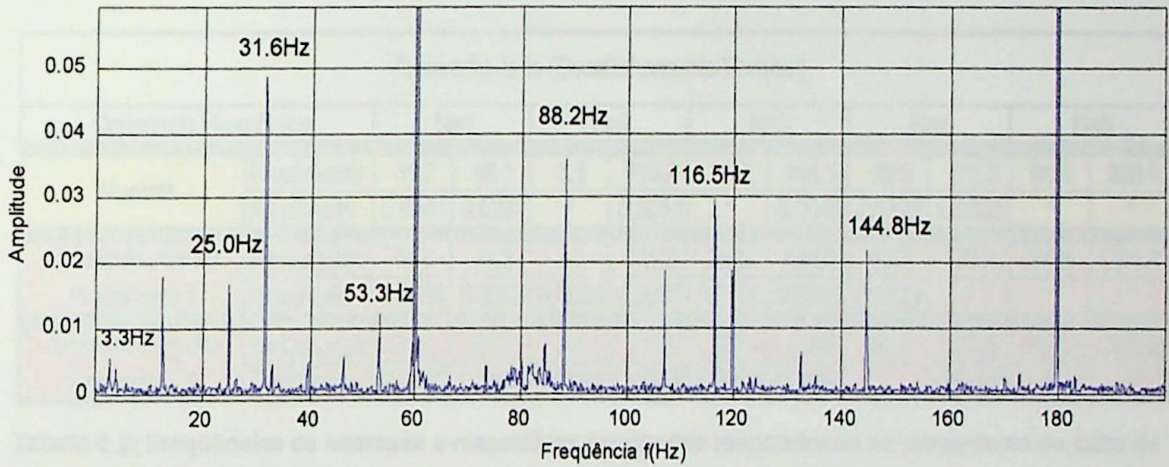


Figura 6.11: Espectro com desalinhamento vertical de 2 mm (d_1)

c) $dv_2 = 4\text{mm}$

$I_{exc} = 306.2\text{ mA}$ $I_A = 8.8\text{ A}$ $M = 2620\text{ g}$ $s = 0.0584$ $n = 1692\text{ RPM}$ 2.60 HP

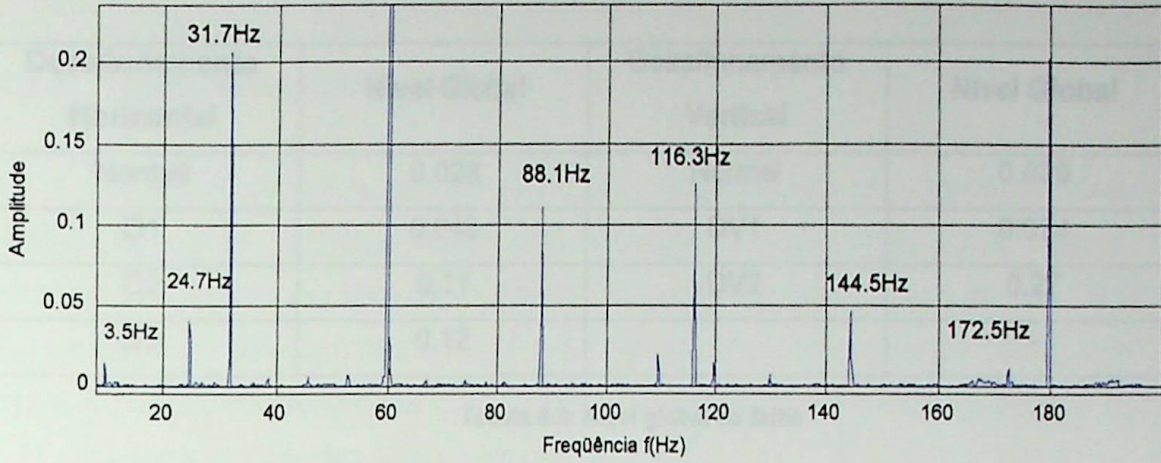


Figura 6.12: Espectro com desalinhamento horizontal de 4 mm (d_2)

No desalinhamento vertical o crescimento da amplitude da maioria das componentes também é visível, contudo a tabela 6.2 ajuda a visualizar melhor o agravamento da falha através do crescimento dos picos centrados nas freqüências de interesse.

Excentricidade (Desalinhamento Vertical)											
Ordem da Harmônica		K=1		K=2		K=3		K=4		K=5	
Normal	Freqüência	31.7	88.1	3.5	116.3	24.7	144.5	52.9	172.5	81.1	200.9
	Amplitude	0.0051	0.0237	*	0.0054	*	0.0046	0.0128	0.0038	*	*
Desalinhamento Horizontal 1	Freqüência	31.6	88.2	3.3	116.5	25.0	144.8	53.3	173.1	81.6	201.4
	Amplitude	0.0486	0.0360	0.0054	0.0298	0.0166	0.0218	0.0121	*	*	*
Desalinhamento Horizontal 2	Freqüência	31.7	88.1	3.5	116.3	24.7	144.5	52.9	172.5	81.1	200.9
	Amplitude	0.2065	0.1103	0.0209	0.1249	0.0408	0.0469	*	0.0119	*	*

Tabela 6.2: Freqüências de interesse e respectivas amplitudes respondendo ao mecanismo de falha de desalinhamento vertical

6.3.1.3 – Considerações sobre o Ensaio

Dos espectros apresentados, pôde-se notar que o motor respondeu à progressão da falha. Contudo, é importante avaliar ainda o nível global da falha em cada caso. Ou seja:

$$NG = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_N^2}$$

Onde: A_1, A_2, \dots, A_N são as amplitudes das freqüências de interesse f_1, f_2, \dots, f_N .

Os resultados a respeito do nível global de cada falha são apresentados na tabela 6.3.

Desalinhamento Horizontal	Nível Global	Desalinhamento Vertical	Nível Global
Normal	0.028	Normal	0.029
D1	0.048	DV1	0.074
D2	0.11	DV2	0.27
D3	0.12	-	-

Tabela 6.3: Nível global da falha

As figuras 6.13 e 6.14 apresentam as curvas de tendência para cada tipo de desalinhamento analisado.

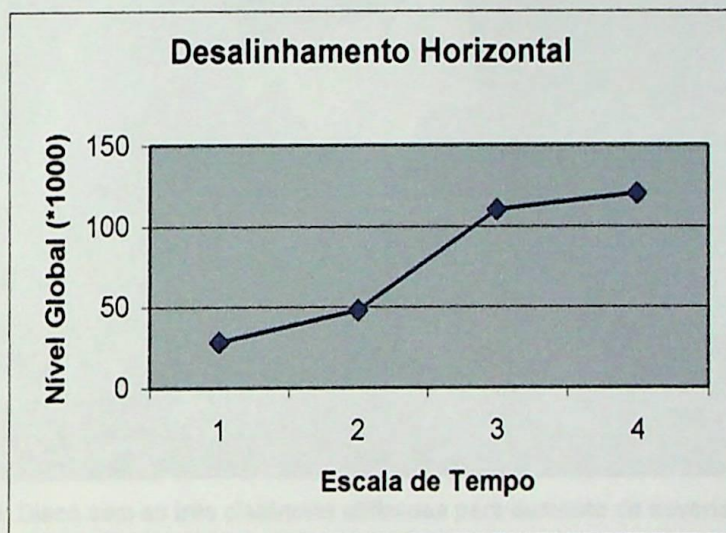


Figura 6.13: Curva de tendência para o desalinhamento horizontal

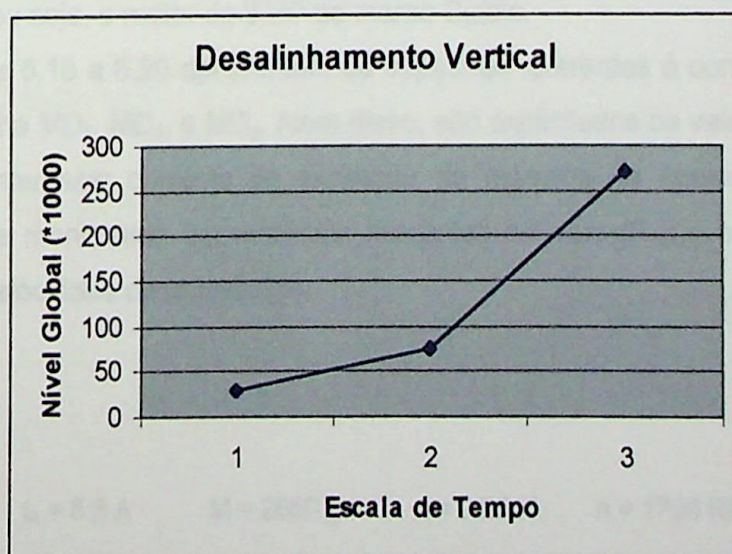


Figura 6.14: Curva de tendência para o desalinhamento vertical



6.3.2 _ Desbalanceamento de Carga

No ensaio realizado em laboratório para verificação do mecanismo da falha de desbalanceamento de carga, foram criados desbalanceamentos de carga através da colocação de uma massa M de 80g em diferentes distâncias radiais do eixo do rotor, no qual foi instalado um disco metálico de 535g. As distâncias escolhidas foram 70mm, 90mm, 110mm. O aumento da distância deve resultar no aumento da severidade da falha. A figura 6.15 apresenta a montagem feita em laboratório.

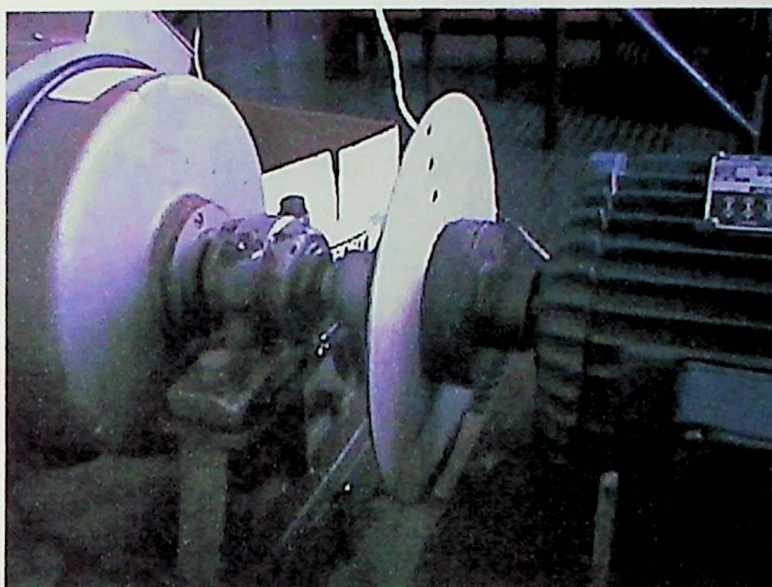


Figura 6.15: Disco com as três distâncias utilizadas para aumento da severidade da falha

O motor de indução trifásico utilizado no ensaio foi o mesmo motor do ensaio de excentricidade, ou seja, o motor de 3 HP da marca Búfalo.

As figuras 6.16 a 6.20 apresentam os espectros referentes à condição normal e as condições de falha MD_1 , MD_2 , e MD_3 . Além disso, são explicitados os valores das seguintes grandezas de interesse: corrente de excitação da máquina de corrente contínua (I_{exc}), corrente da fase monitorada (I_A), potência mecânica no eixo (P_{mec}), escorregamento da máquina (s), e velocidade de rotação (n).

a) Normal

$$I_{exc} = 306.5 \text{ mA} \quad I_A = 8.6 \text{ A} \quad M = 2550 \text{ g} \quad s = 0.0518 \quad n = 1706 \text{ RPM} \quad P_{mec} = 2.55 \text{ HP}$$

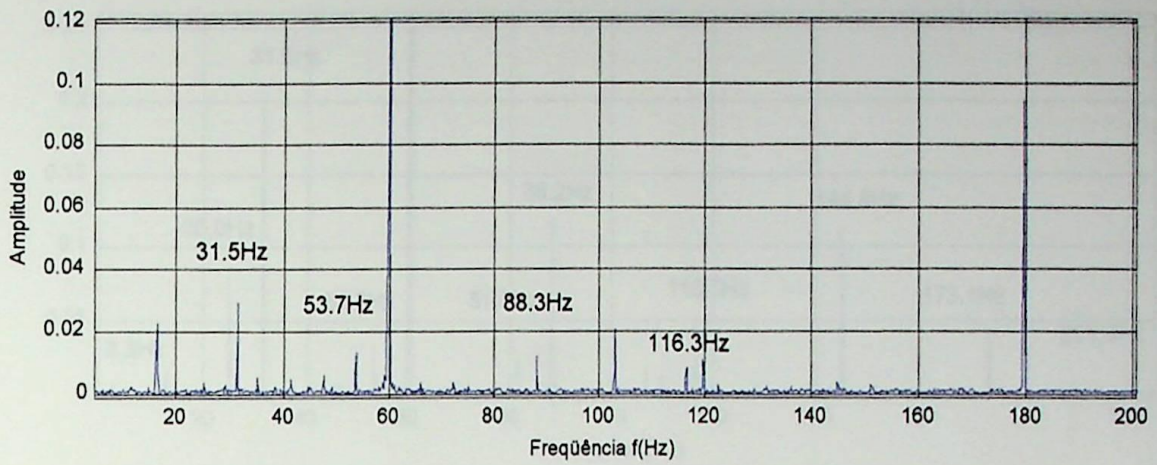


Figura 6.16: Espectro de referência (motor "saudável")

b) O disco sem a massa

$I_{exc} = 306.2 \text{ mA}$ $I_A = 8.7 \text{ A}$ $M = 2555 \text{ g}$ $s = 0.0551$ $n = 1698 \text{ RPM}$ $P_{mec} = 2.54 \text{ HP}$

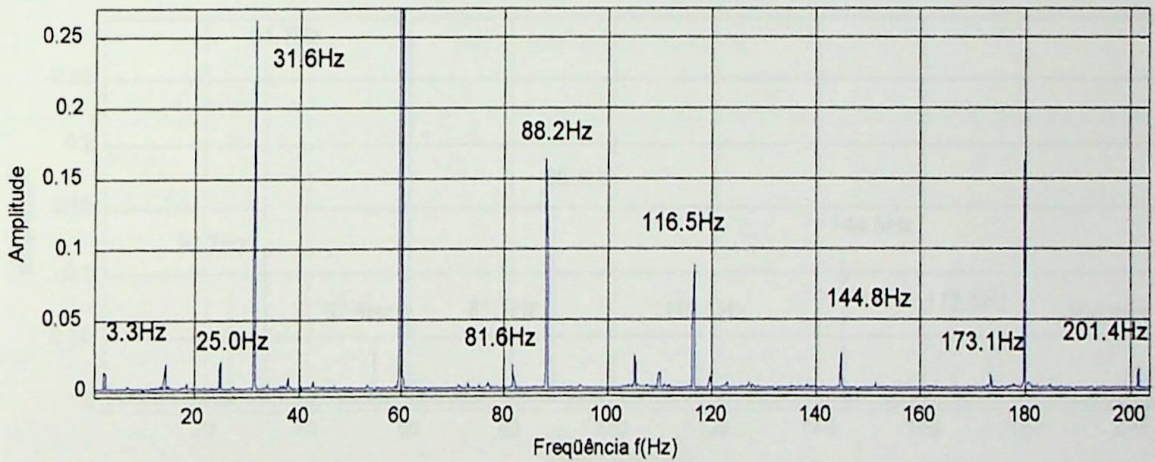


Figura 6.17: Espectro com desbalanceamento devido apenas ao disco

c) Massa na distância 1

$I_{exc} = 306.3 \text{ mA}$ $I_A = 8.7 \text{ A}$ $M = 2570 \text{ g}$ $s = 0.0551$ $n = 1698 \text{ RPM}$ $P_{mec} = 2.56 \text{ HP}$

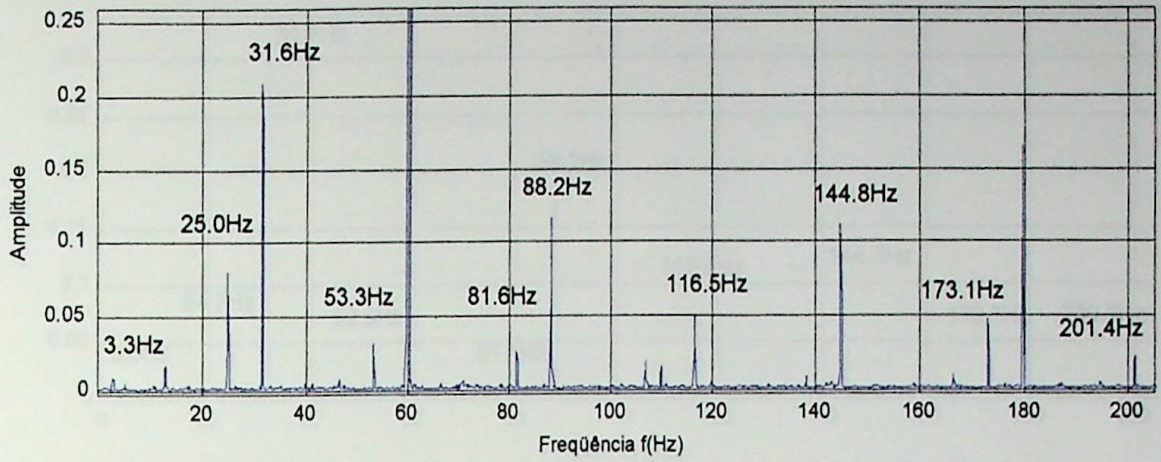


Figura 6.18: Espectro com desbalanceamento da massa M na distância 1 (M_1D_1)

d) Massa na distância 2

$I_{exc} = 306.6 \text{ mA}$ $I_A = 8.7 \text{ A}$ $M = 2560 \text{ g}$ $s = 0.0584$ $n = 1695 \text{ RPM}$ $P_{mec} = 2.54 \text{ HP}$

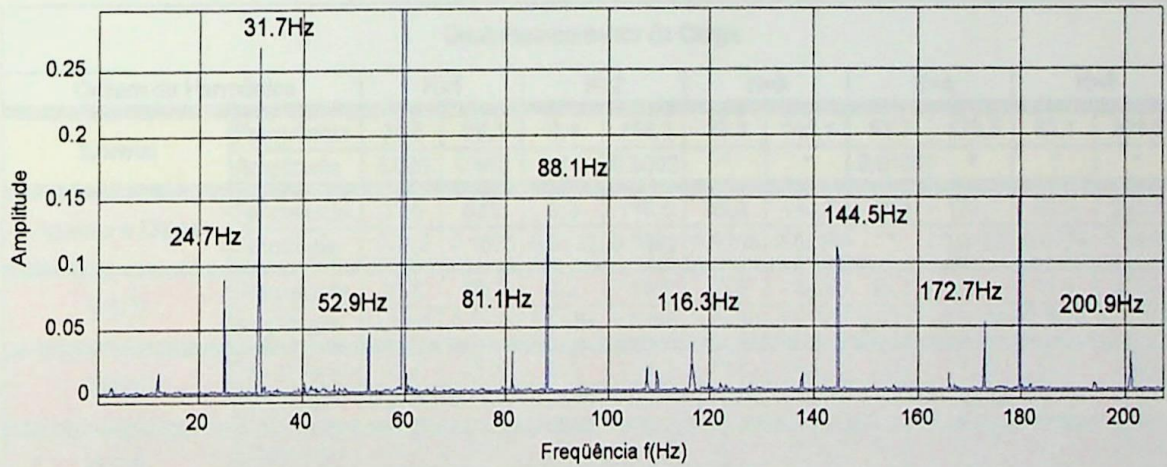


Figura 6.19: Espectro com desbalanceamento da massa M na distância 2 (M_1D_2)

e) Massa na distância 3

$I_{exc} = 306.5 \text{ mA}$ $I_A = 8.8 \text{ A}$ $M = 2560 \text{ g}$ $s = 0.0584$ $n = 1695 \text{ RPM}$ $P_{mec} = 2.54 \text{ HP}$

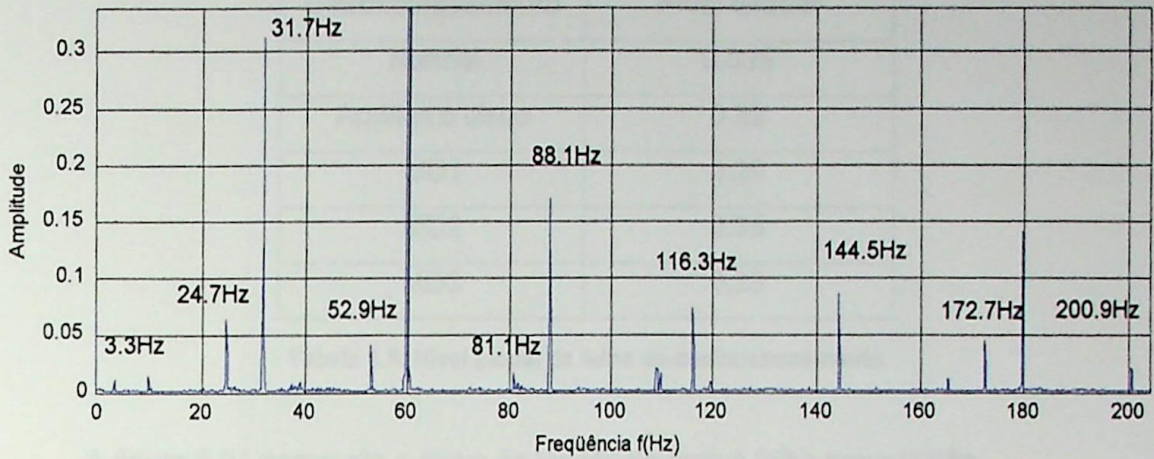


Figura 6.20: Espectro com desbalanceamento da massa M na distância 3 (M₁D₃)

Como nos ensaios anteriores, o crescimento da amplitude da maioria das componentes também é visível, contudo a tabela 6.4 ajuda a visualizar melhor o agravamento da falha através do crescimento dos picos centrados nas frequências de interesse.

Desbalanceamento da Carga											
Ordem da Harmônica		K=1		K=2		K=3		K=4		K=5	
Normal	Frequência	31.5	88.3	3.1	116.3	25.3	145.1	53.7	173.5	82.1	201.9
	Amplitude	0.029	0.012	*	0.0082	*	*	0.0136	*	*	*
Apenas o Disco	Frequência	31.6	88.2	3.3	116.5	25.0	144.8	53.3	173.1	81.6	201.4
	Amplitude	0.264	0.1635	0.0132	0.0892	0.0205	0.0259	*	0.0108	0.0179	0.0145
M1D1	Frequência	31.6	88.2	3.3	116.5	25.0	144.8	53.3	173.1	81.6	201.4
	Amplitude	0.2095	0.1171	0.0081	0.0495	0.0799	0.1127	0.0317	0.0469	0.0264	0.0225
M1D2	Frequência	31.7	88.1	3.5	116.3	24.7	144.5	52.9	172.5	81.1	200.9
	Amplitude	0.2688	0.1442	0.0059	0.0379	0.0885	0.1119	0.0467	0.0538	0.0314	0.03
M1D3	Frequência	31.7	88.1	3.5	116.3	24.7	144.5	52.9	172.5	81.1	200.9
	Amplitude	0.3124	0.1697	0.0116	0.0748	0.0637	0.0859	0.0428	0.0455	0.0163	0.0206

Tabela 6.4: Frequências de interesse e respectivas amplitudes respondendo ao mecanismo de falha de desbalanceamento de carga

6.3.2.1 – Considerações sobre o Ensaio

Dos espectros apresentados, pôde-se notar que o motor respondeu à progressão da falha. Fazendo-se agora a avaliação do nível global da falha em cada caso tem-se:

Desbalanceamento	Nível Global
Normal	0.035
Apenas o disco	0.32
MD1	0.29
MD2	0.35
MD3	0.38

Tabela 6.5: Nível global da falha de desbalanceamento

A figura 6.21 apresenta a curva de tendência para a falha em questão.

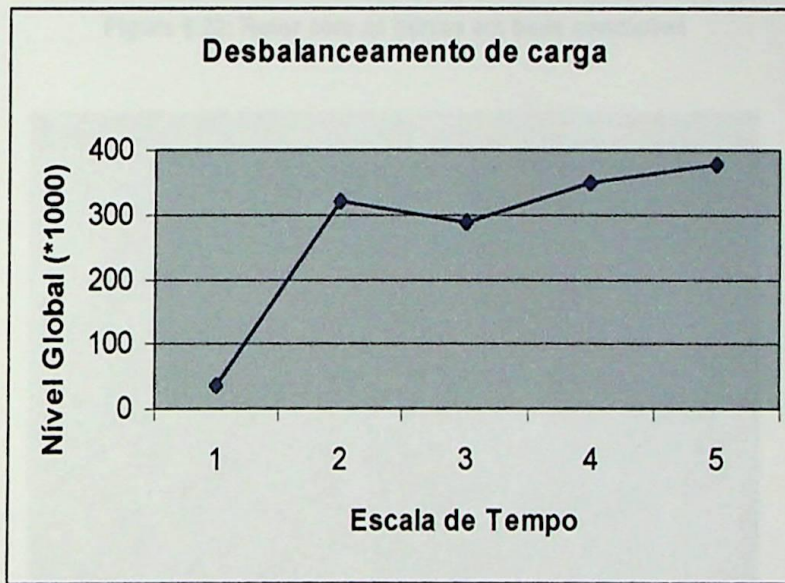


Figura 6.21: Curva de tendência para o desbalanceamento de carga

6.3.3 _ Quebra de Barras

No ensaio realizado em laboratório para verificação do mecanismo da falha de quebras de barra, foram criados dois graus de severidade da falha através da quebra de uma e duas barras respectivamente. As figuras 6.22 e 6.23 apresentam o rotor em boas condições e com a primeira barra quebrada. Na verdade, devido ao tipo de gaiola, foi feito um furo na barra de interesse, mas o que realmente importa é que o efeito é semelhante ao de barra quebrada, pois na posição do furo tem-se a passagem de uma corrente de menor intensidade, ocasionando um desbalanceamento do fluxo do *air-gap*. Além disso, a confecção do furo também resulta em uma assimetria rotórica.



Figura 6.22: Rotor com as barras em boas condições

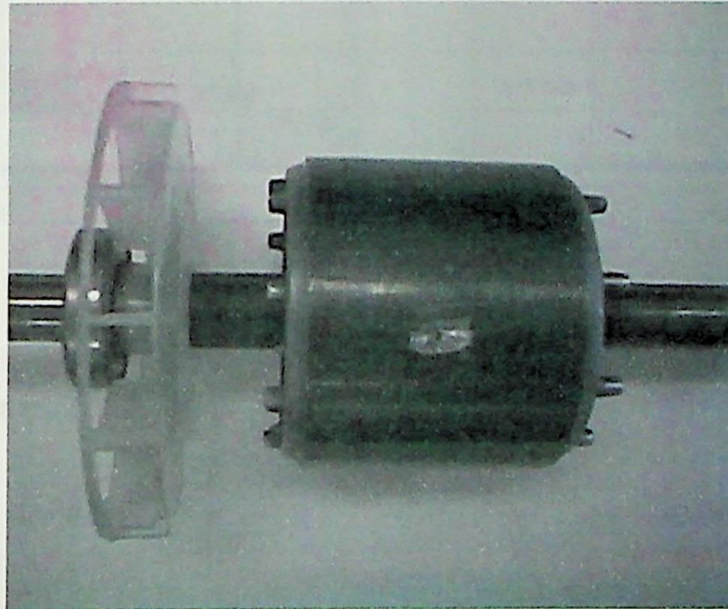


Figura 6.23: Rotor com uma barra quebrada (equivalente ao primeiro grau de severidade imposto)

O motor de indução trifásico utilizado no ensaio foi um motor de 2 HP da marca Weg com os seguintes dados de placa:

Tensão	220/380 V
Corrente	6.1/3.99 A
Número de pólos	4
Velocidade	1715 RPM
Frequência	60 Hz
I_p/I_n	6.7 A
Classe de isolamento	B

As figuras 6.24 a 6.26 apresentam os espectros referentes à condição normal e às condições de uma e duas barras quebradas. Além disso, são explicitados os valores das seguintes grandezas de interesse: corrente de excitação da máquina de corrente contínua (I_{exc}), corrente da fase monitorada (I_A), potência mecânica no eixo (P_{mec}), escorregamento da máquina (s), e velocidade de rotação (n).

a) Normal

$I_{exc} = 218.7 \text{ mA}$ $I_A = 6.0 \text{ A}$ $M = 1610 \text{ g}$ $s = 0.0284$ $n = 1746 \text{ RPM}$ $P_{mec} = 1.59 \text{ HP}$

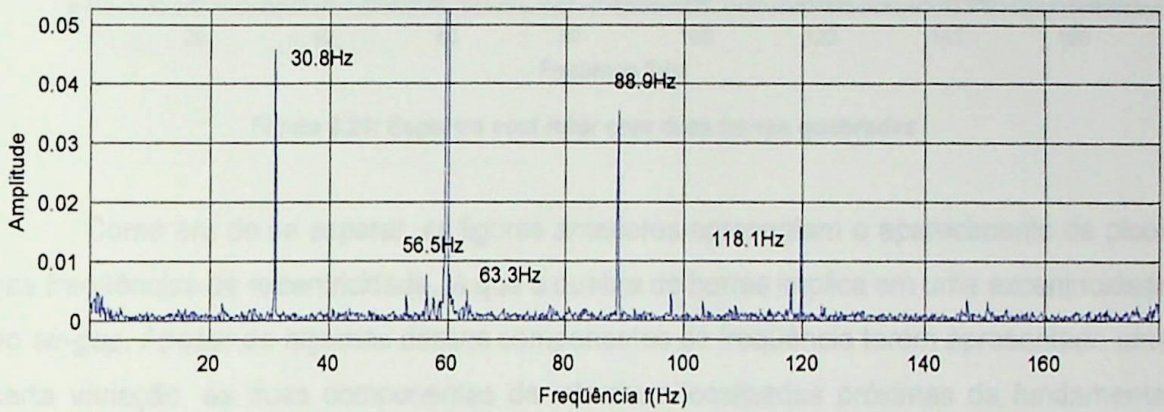


Figura 6.24: Espectro de referência (rotor sem barras quebradas)

b) Uma barra quebrada

$I_{exc} = 218.7 \text{ mA}$ $I_A = 6.0 \text{ A}$ $M = 1610 \text{ g}$ $s = 0.0284$ $n = 1746 \text{ RPM}$ $P_{mec} = 1.59 \text{ HP}$

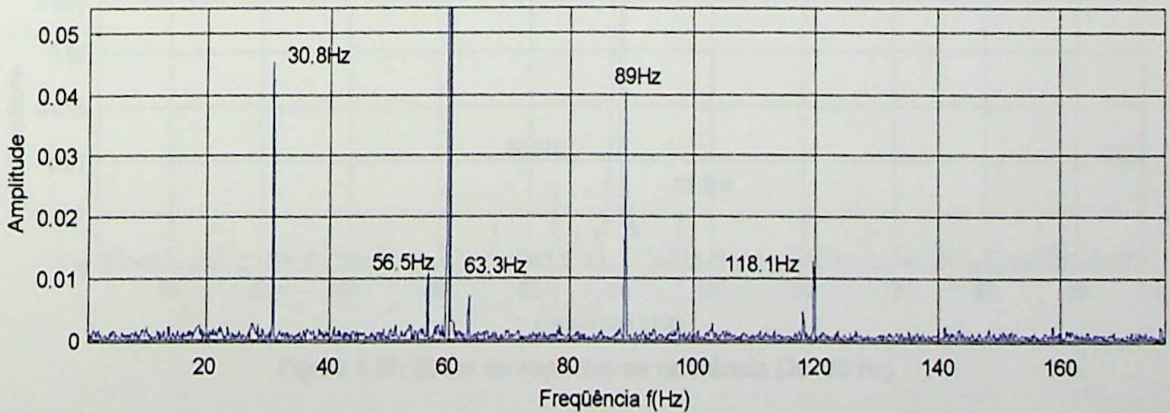


Figura 6.25: Espectro com rotor com uma barra quebrada

c) Duas barras quebradas

$I_{exc} = 218.5 \text{ mA}$ $I_A = 6.1 \text{ A}$ $M = 1615 \text{ g}$ $s = 0.0317$ $n = 1740 \text{ RPM}$ $P_{mec} = 1.59 \text{ HP}$

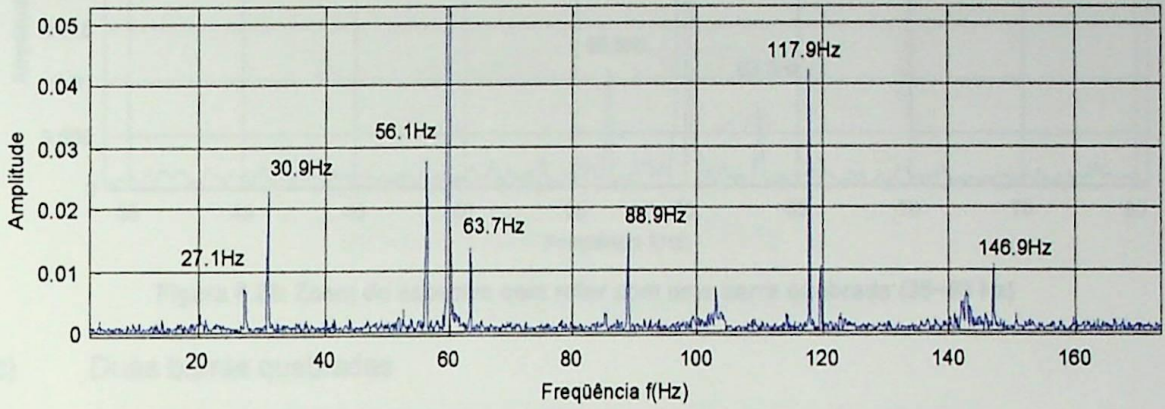


Figura 6.26: Espectro com rotor com duas barras quebradas

Como era de se esperar, as figuras anteriores apresentam o aparecimento de picos nas freqüências de excentricidade, já que a quebra de barras implica em uma excentricidade do *air-gap*. Apesar de algumas dessas componentes de freqüência terem apresentado uma certa variação, as duas componentes de interesse localizadas próximas da fundamental sempre cresceram com o agravamento da falha. As figuras 6.27 a 6.29 apresentam o zoom na região de interesse do espectro.

a) Normal

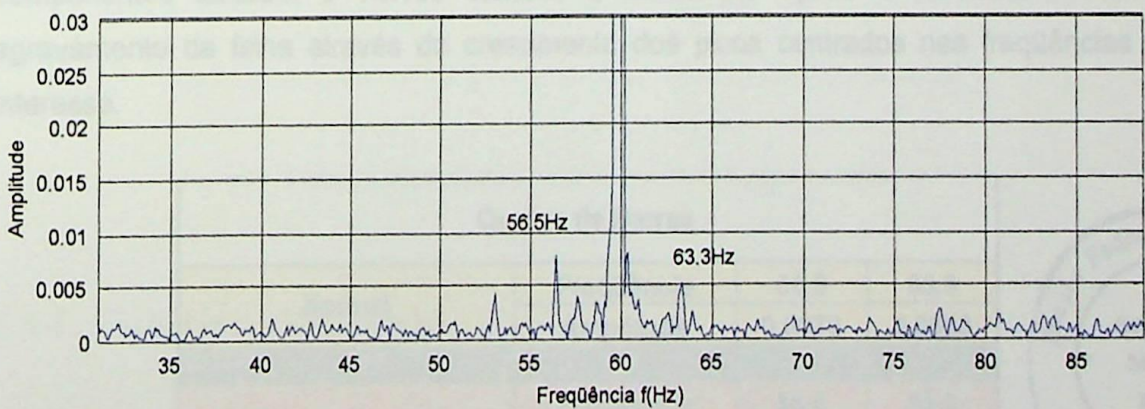


Figura 6.27: Zoom do espectro de referência (30~90 Hz)

b) Uma barra quebrada

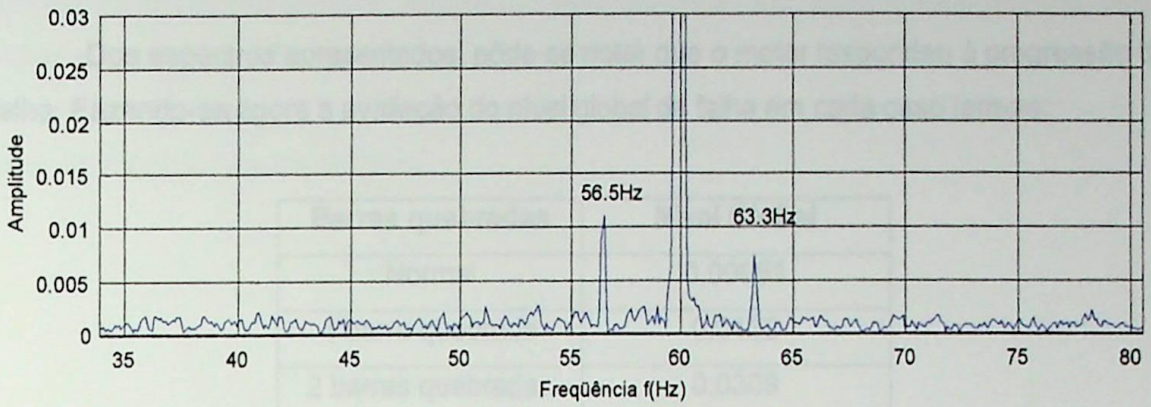


Figura 6.28: Zoom do espectro com rotor com uma barra quebrada (35~80 Hz)

c) Duas barras quebradas

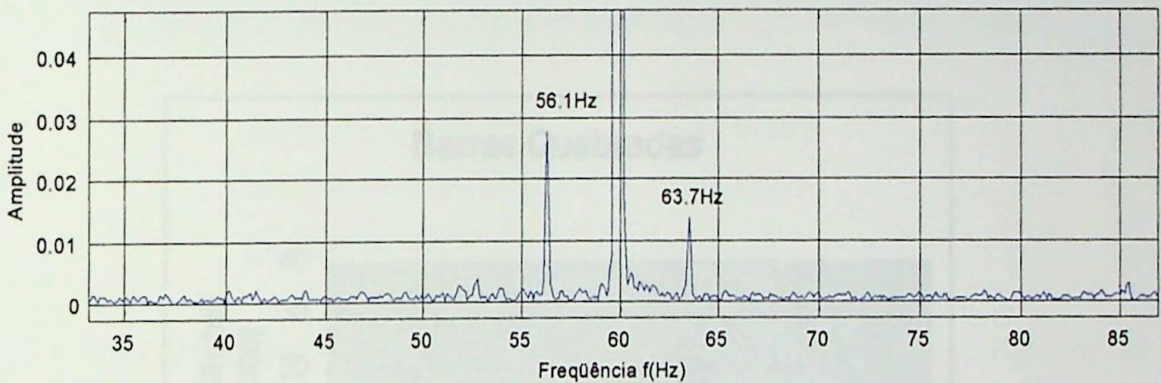


Figura 6.29: Zoom do espectro com rotor com duas barras quebradas (35~85 Hz)

Como nos ensaios anteriores, o crescimento da amplitude da maioria das componentes também é visível, contudo a tabela 6.6 ajuda a visualizar melhor o agravamento da falha através do crescimento dos picos centrados nas frequências de interesse.

Quebra de Barras			
Normal	Frequência	56.5	63.3
	Amplitude	0,0079	0,0053
1 barra quebrada	Frequência	56.5	63.3
	Amplitude	0.011	0.0073
2 barras quebradas	Frequência	56.1	63.7
	Amplitude	0.0277	0.0138

Tabela 6.6: Frequências de interesse e respectivas amplitudes respondendo ao mecanismo de falha de quebra de barras



6.3.3.1 – Considerações sobre o Ensaio

Dos espectros apresentados, pôde-se notar que o motor respondeu à progressão da falha. Fazendo-se agora a avaliação do nível global da falha em cada caso tem-se:

Barras quebradas	Nível Global
Normal	0.00951
1 barra quebrada	0.0132
2 barras quebradas	0.0309

Tabela 6.7: Nível global da falha de barras quebradas

A figura 6.30 apresenta a curva de tendência para a falha em questão.

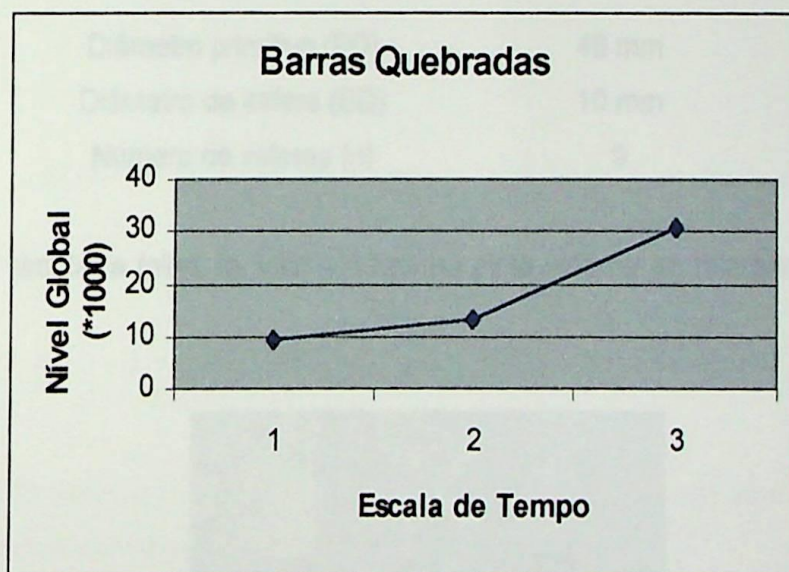


Figura 6.30: Curva de tendência para quebra de barras

6.3.4 _ Defeitos no Rolamento

O ensaio realizado para se detectar defeitos no rolamento foi o mais difícil de ser realizado. A primeira dificuldade consistiu em se embutir a falha de modo que esta se assemelhasse ao desgaste natural que ocorre no mecanismo de falha do rolamento. A segunda e maior dificuldade foi tamanho do motor disponível para o teste. O motor utilizado era de apenas 4 HP, o que tornou difícil a visualização do aparecimento da falha no espectro da corrente do estator. A explicação se deve ao fato de que por se tratar de uma

máquina de pequeno porte, os esforços resultantes da falha são de pequena intensidade e difíceis de serem observados. Apesar das dificuldades encontradas, a falha foi embutida e detectada pelo espectro, comprovando a viabilidade do uso desta técnica.

O motor de indução trifásico utilizado no ensaio foi um motor de 4 HP da marca Weg com os seguintes dados de placa:

Tensão	220 V
Corrente	12 A
Número de pólos	4
Velocidade	1760 rpm
Freqüência	60 Hz

Já o rolamento utilizado no ensaio apresentava as seguintes características:

Diâmetro primitivo (PD)	46 mm
Diâmetro da esfera (BD)	10 mm
Número de esferas (n)	9

Para simular a falha, foi feito um furo na pista externa do rolamento como ilustra a figura 6.31:

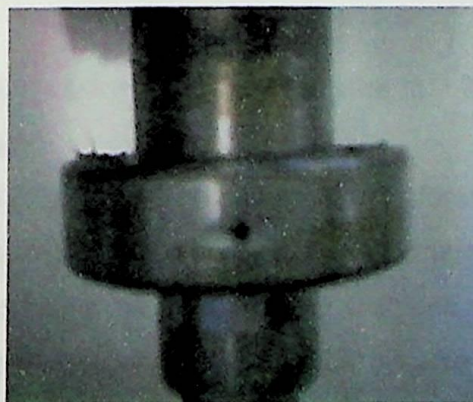


Figura 6.31: Rolamento com furo na pista externa

De acordo com as fórmulas apresentadas no capítulo 4 para falhas na pista externa, as freqüências características de defeito são dadas por:

$$f_{pe} = \left| f \pm m \cdot \frac{n}{2} \cdot f_m \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \right|$$

Ou:

$$f_{pe} = |f \pm 0.4 \cdot n \cdot f_{rm}|$$

Onde:

- _ f é a frequência da rede
- _ PD é o diâmetro primitivo do rolamento
- _ BD é o diâmetro do elemento girante
- _ f_{rm} é a velocidade de rotação do rotor em Hertz
- _ β é o ângulo de contato do rolamento
- _ m = 1, 2, 3, ...
- _ n é o número de esferas

Fazendo as substituições necessárias para o escorregamento estimado de 0.0318 observado no laboratório tem-se $f_e \approx 103 \text{ Hz}$. Logo, as frequências a serem monitoradas são:

$$|59.7 - 1 \times f_e| = 43.3 \text{ Hz} \quad \text{e} \quad |59.7 + 1 \times f_e| = 162.7 \text{ Hz}$$

$$|59.7 - 2 \times f_e| = 146.3 \text{ Hz} \quad \text{e} \quad |59.7 + 2 \times f_e| = 265.7 \text{ Hz}$$

$$|59.7 - 3 \times f_e| = 249.3 \text{ Hz} \quad \text{e} \quad |59.7 + 3 \times f_e| = 368.7 \text{ Hz}$$

Estas frequências são para m=1, 2 e 3, pois para m > 3 não se observou alteração das componentes espectrais.

As figuras 6.32 e 6.33 apresentam os espectros referentes à condição normal e à condição de falha na pista interna. Além disso, são explicitados os valores das seguintes grandezas de interesse: corrente de excitação da máquina de corrente contínua (I_{exc}), corrente da fase monitorada (I_A), potência mecânica no eixo (P_{mec}), escorregamento da máquina (s), e velocidade de rotação (n).

a) Normal

$$I_{exc} = 367.2 \text{ mA} \quad I_A = 10.0 \text{ A} \quad M = 3240 \text{ g} \quad s = 0.0318 \quad n = 1734 \text{ RPM} \quad P_{mec} = 3.3 \text{ HP}$$

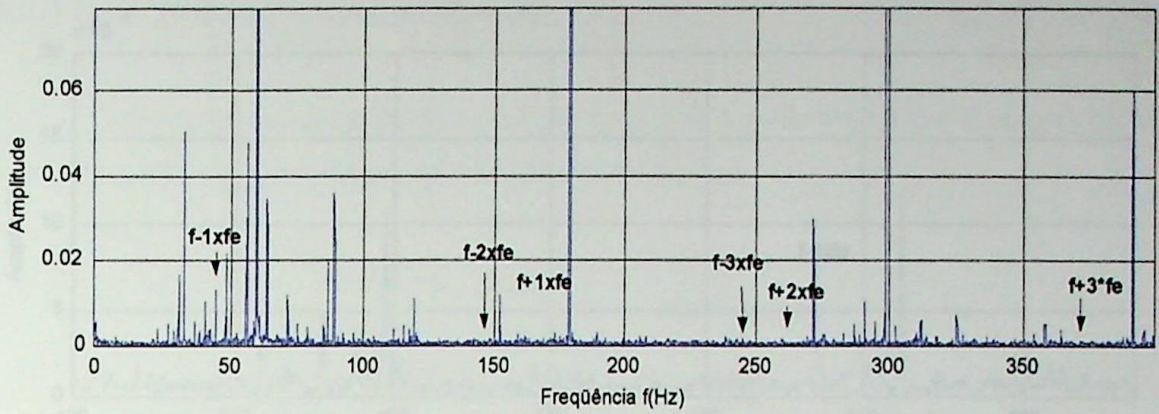


Figura 6.32: Espectro da corrente com rolamento normal

b) Com defeito na pista externa

$I_{exc} = 366.7 \text{ mA}$ $I_A = 10.0 \text{ A}$ $M = 3300 \text{ g}$ $s = 0.0318$ $n = 1734 \text{ RPM}$ $P_{mec} = 3.4 \text{ HP}$

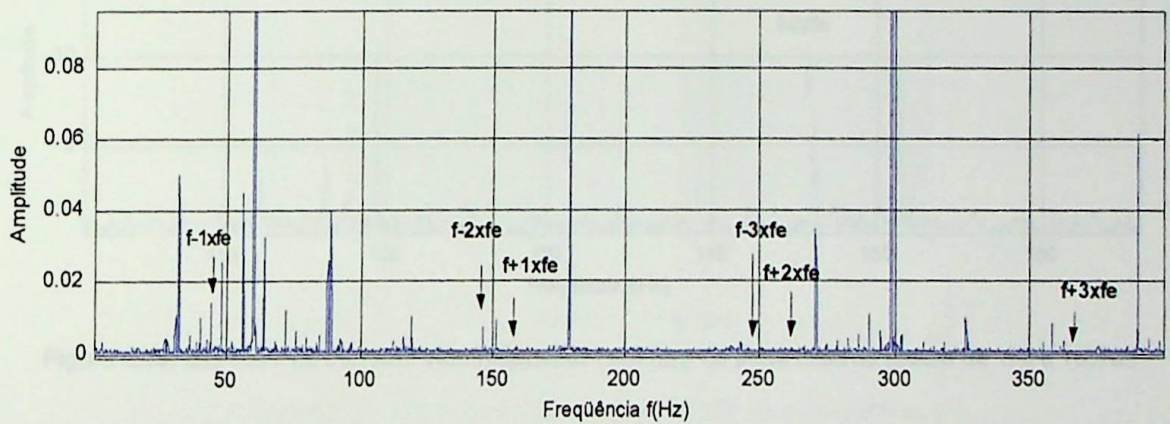
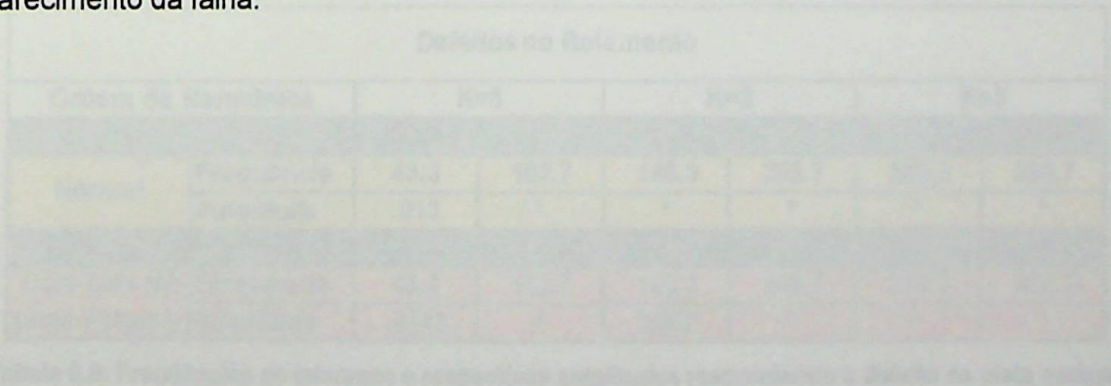


Figura 6.33: Espectro da corrente com rolamento com furo na pista externa

Pode-se observar dos espectros apresentados que a componente que mais respondeu à presença da falha foi $|f - 2 \times f_e|$. Seja o zoom desta região que comprovou o aparecimento da falha:



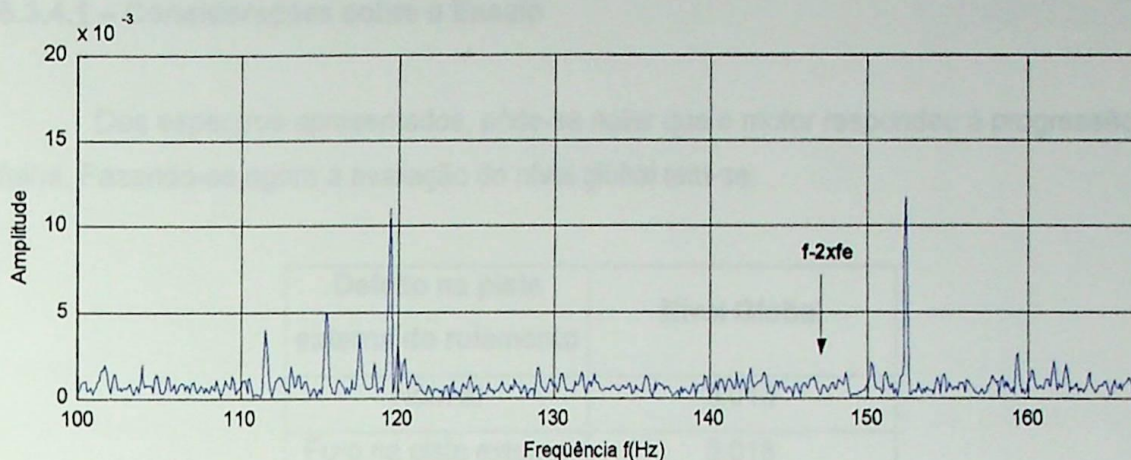


Figura 6.34: Espectro da corrente com rolamento normal (Zoom de 100 a 165Hz)

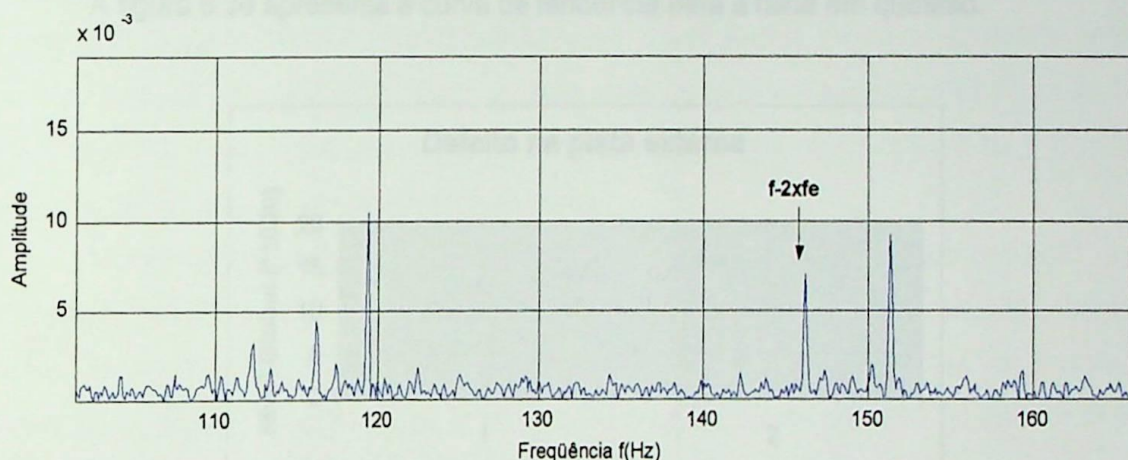


Figura 6.35: Espectro da corrente com rolamento com furo na pista externa (zoom de 100 a 165Hz)

Como nos ensaios anteriores, o crescimento da amplitude da maioria das componentes também é visível, contudo a tabela 6.8 ajuda a visualizar melhor o agravamento da falha através do crescimento dos picos centrados nas frequências de interesse.

Defeitos no Rolamento							
Ordem da Harmônica		K=1	K=2	K=2	K=3	K=3	K=3
Normal	Frequência	43.3	162.7	146.3	265.7	249.3	368.7
	Amplitude	.013	*	*	*	*	*
Com furo na pista externa	Frequência	43.3	162.7	146.3	265.7	249.3	368.7
	Amplitude	.0143	*	0.007	*	*	*

Tabela 6.8: Frequências de interesse e respectivas amplitudes respondendo a defeito na pista externa

6.3.4.1 – Considerações sobre o Ensaio

Dos espectros apresentados, pôde-se notar que o motor respondeu à progressão da falha. Fazendo-se agora a avaliação do nível global tem-se:

Defeito na pista externa do rolamento	Nível Global
Normal	0.013
Furo na pista externa	0.016

Tabela 6.9: Nível global da falha de defeito em rolamento

A figura 6.36 apresenta a curva de tendência para a falha em questão.

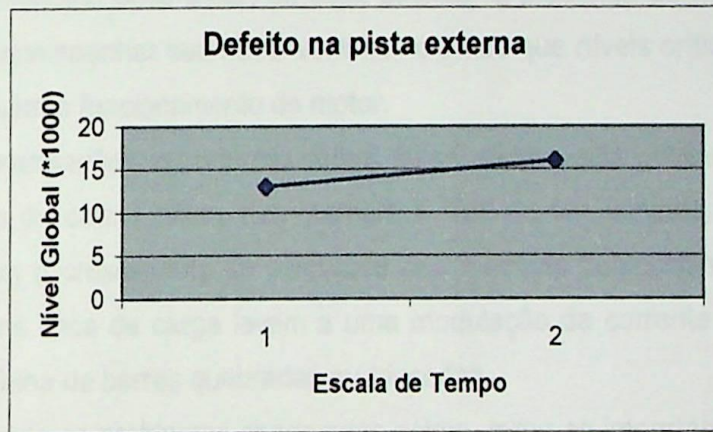


Figura 6.36: Curva de tendência para defeito na pista externa

CONCLUSÃO

Este trabalho comprova a eficiência da técnica de análise de uma das fases da corrente do estator aplicada à manutenção preditiva de motores de indução trifásicos. Tal comprovação é importante, pois persistiam algumas dúvidas acerca da capacidade do método em relação a já tradicional análise de vibrações.

A técnica de análise da corrente só é possível devido às perturbações no fluxo do *air-gap* provocadas pelo aparecimento de falhas mecânicas ou elétricas. Quanto mais intensas essas perturbações maior a intensidade da falha. É justamente nesse ponto que o sistema de monitoração proposto deve atuar, ou seja, detectar a presença do mecanismo de uma falha qualquer e acompanhar seu desenvolvimento antes que níveis críticos de intensidade da falha prejudiquem o funcionamento do motor.

Muitas constatações importantes foram feitas, dentre elas deve-se destacar que o diagnóstico exato de certas falhas nem sempre é fácil de ser atingido, ou seja, algumas falhas apresentam o crescimento de amplitude das mesmas componentes de frequência. Além disso, alguns tipos de carga levam a uma modulação da corrente do estator que se confunde com a falha de barras quebradas ou trincadas.

Considerando os problemas observados acima, torna-se importante o conhecimento do histórico de manutenção da máquina. É com base nesse histórico que peculiaridades do processo ao qual o motor está inserido serão levantadas e níveis de alarme estabelecidos.

Quanto ao processamento digital de sinais é válido ressaltar que a resolução da FFT deve ser bastante alta, pois as frequências de falha são bem definidas e dependem do escorregamento. Uma prova dessa necessidade está na própria estimação do escorregamento, pois quanto mais preciso for a posição da frequência de excentricidade, maior a precisão do escorregamento estimado.

Apesar de terem sido verificadas apenas falhas mecânicas, alguns trabalhos já foram publicados com a atenção voltada para falhas elétricas [B22]. Os resultados obtidos nesse trabalho mais a inclusão das falhas elétricas proporcionarão ao sistema de monitoração baseado na assinatura da corrente um conjunto bastante extenso das falhas que poderão ser diagnosticadas.



Os resultados obtidos são consistentes e condizem com as publicações feitas a respeito do assunto. Tais resultados foram obtidos através do programa desenvolvido no Matlab para obtenção, processamento e análise do sinal. Este programa é bastante robusto e versátil, sendo capaz de buscar as frequências de interesse mesmo que haja variação do escorregamento da máquina.

7.1 _ Trabalhos Futuros

A experiência obtida através da implementação da técnica proporciona a visualização de trabalhos futuros para a complementação e aprimoramento do sistema de manutenção preditiva baseado na análise de uma das fases da corrente do estator. São eles:

- Desenvolvimento de um classificador robusto para diagnóstico automático de falhas;
- Implementação de novas técnicas de processamento que facilitem a detecção das falhas com mais antecedência;
- Ensaio com falhas elétricas;
- Ensaio com motores alimentados com inversores;
- Estabelecimento de cartas de severidade;
- Expansão da técnica para outros tipos de motores elétricos como, por exemplo, servomotores trifásicos.

Estes trabalhos futuros aliados ao trabalho realizado constituiriam um sistema de manutenção preditiva com diagnóstico automático capaz de conquistar a atenção do mercado em função das grandes vantagens oferecidas pela técnica e já mencionada nos capítulos anteriores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Júlio Nascif Xavier. "Manutenção Classe Mundial". www.bhnet.com.br
- [2] Jean Altweg, Jean-Pierre Dupraz, Joseph Martin, and Christophe Baudart. "O Telediagnóstico como Ferramenta de Otimização da Manutenção". In Proceedings of the XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 1999
- [3] William T. Thomson and Mark Fenger. "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults". IEEE Industry Applications Magazine, pp. 26-34, July 2001.
- [4] Antônio T. L. de Almeida, Marcelo E. C. Paulino. "Manutenção e Operação de Motores de Indução Trifásicos". Itajubá, FUPAI 2001.
- [5] Austin H. Bonnett and George C. Soukup. "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 28, NO. 4, July/August 1992, pp. 921-937.
- [6] Peter J. Tavner and James Penman, "Condition Monitoring of Electrical Machines", 1st ed. John Wiley & Sons Inc., 1987.
- [7] Marcio T. Almeida e Ricardo D. Góz. "Análise de Vibrações". Itajubá, FUPAI 2000.
- [8] Steven W. Smith, "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing", 2 ed. www.dspguide.com, 1999.
- [9] Ramzy R. Obaid, Thomas G. Habetler, and David J. Gritter. "A Simplified Technique for Detecting Mechanical Faults Using Stator Current in Small Induction Motors", In Proceedings of the 35th Annual Meeting and World Conference on Industrial Application of Electrical Energy, July 2000.
- [10] Stanislaw F. Legowski, A.H.M. Sadrul Ula, and Andrzej M. Trzynadlowski. "Instantaneous Power as a Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 32, NO. 4, July/August 1996, pp. 904-909.
- [11] Bradley Payne, Liang Bo, Weidon Li, Fengshou Gu, and Andrew Ball. "The Detection of Faults In Induction Motors Using Higher Order Statistics". Electronic Communication.

- [12] Mohamed El Hachemi Benbouzid, Michelle Vieira, and Céline Theys. "Induction Motor's Faults Detection and localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, NO. 1, January 1999, pp. 14-22.
- [13] Mohamed El Hachemi Benbouzid. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, NO. 5. October 2000, pp. 984-993.
- [14] A.Bellini, F.Filippetti, G.Franceschini, C.Tassoni, R.Passaglia, M.Saottini, G.Tontini, M.Giovannini, and Mohamed El Hachemi Benbouzid. "ENEL's Experience with On-line Diagnosis of Large Induction Motors Cage Failures". In Proceedings of the 35th Annual Meeting and World Conference on Industrial Application of Electrical Energy, July 2000.
- [15] Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler, Farruk Kamram and R. G. Bartheld. "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 31, NO. 6, November/December 1995, pp. 1274-1279.
- [16] Kevin D.Hurst and Thomas G.Habetler. " Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, NO. 1, January 1996, pp. 66-73.
- [17] LEM. "Isolated Current and Voltage Transducers". 1996. LEM Corporate Communications.
- [18] LEM. "AC/DC Current Probes". 2001.
- [19] Robert F.Coughlin and Frederick F.Driscoll, "Active Filters" *Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits*, 2nd ed. Prentice Hall, 1982, pp. 247-272.
- [20] PC-LabCard User's Manual, pp. 1-8. 1993.
- [21] Matlab . Real Time Workshop Help pdf. [version 5.3.1].
- [22] J.Penman, M. N. Dey, A. J. Tait, and W. E. Bryan. "Condition Monitoring of Electrical Drives". In IEE proceedings, Vol. 133, NO. 3, May 1986, pp. 142-148.