

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO CÉSAR MAIOLI ANICETO

**UMA FERRAMENTA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM  
MOTORES ELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2014

BRUNO CÉSAR MAIOLI ANICETO

**UMA FERRAMENTA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM  
MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação  
apresentado ao Departamento de Engenharia  
Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná como requisito parcial para obtenção do  
título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedel

Co-orientador: Prof. Msc. Wagner Fontes Godoy

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2014

**BRUNO CÉSAR MAIOLI ANICETO**

**UMA FERRAMENTA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES  
ELÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10h e 00min do dia 05 de Fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no Programa de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Alessandro Goedtel  
Professor Orientador  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Prof. Me. Wagner Fontes Godoy  
Professor Co-orientador  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Prof. Dr. Marcos Banheti Rabello Vallim  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

*Dedico este trabalho a Deus  
que me deu sabedoria e a minha família  
pelos ensinamentos que delinearam meu  
caráter.*

## AGRADECIMENTOS

A minha existência e tudo o que realizo na minha vida, não são obras do acaso, mas sim de uma força muito maior do que possamos imaginar, que esculpe o caminho de cada ser humano, de acordo com o que buscamos, agradeço à Deus.

Este trabalho de conclusão de curso, seu início, desenvolvimento e conclusão tiveram muitas horas de dedicação da minha vida. Horas de estudo, de pesquisa, de trabalho em frente ao computador e diante da bancada. Horas que minha família sempre acompanhou. Acompanhou de longe, mas com muita força, incentivo e alegria, por saber que eu estaria concretizando mais uma etapa da minha vida estudantil e também profissional. E é por esse motivo, que meus pais, Antônio César Aniceto e Márcia Regina Maioli Aniceto estão sendo lembrados e merecidos de eterna gratidão por mais essa realização.

A minha namorada Andressa Silva Pereira que também me apoiou e incentivou para que eu concretizasse esse trabalho.

Ao meu orientador professor Dr. Alessandro Goedel, pela oportunidade que me deu de envolver-me com a pesquisa científica, cujos frutos estão, degrau por degrau, delineando meu futuro profissional. Pelos momentos de conversa sábia, orientações e pelas incessantes ideias.

Ao meu co-orientador professor Me. Wagner Fontes Godoy, pelo apoio, conselhos e momentos dedicados a compartilhar sua experiência profissional na gerência de manutenção.

Aos colegas do Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação, professor Me. Wylliam Salviano, professor Me. Tiago Henrique dos Santos, Paulo Broniera Junior, Clayton Graciola, Thiago da Silva Takaoka, Tiago Drummond pelo compartilhamento de ideias e esforços nas pesquisas de identificação de falhas e aos demais colegas do laboratório que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

Ao orientador de estágio na Embraco, Eng. Me. Guilherme Maximiliano Reichert Negri, pelas explicações relacionadas ao princípio de funcionamento do motor de indução.

Este trabalho conta também com o aporte financeiro da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná (Processo No 06/56093-3), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo No474290/2008-5, 473576/2011-2, 552269/2011-5).

Uma mente que se abre para uma nova ideia,  
jamais retornará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

Tudo o que fizerdes, fazei-o de coração, como  
para o Senhor e não para os homens.

Colossenses 3,23

## RESUMO

ANICETO, Bruno C. M. **Uma Ferramenta para Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos**. 2014. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Cornélio Procópio, 2014.

Os motores de indução trifásicos são os elementos responsáveis pela conversão eletromecânica de energia mais aplicados em ambiente industrial. Como todas as outras máquinas inseridas em um processo industrial, esses motores também passam por manutenção regularmente. Este trabalho aborda o método de detecção de falhas em motores de indução trifásicos conectados diretamente à rede elétrica. O método é baseado na análise espectral de sinais de corrente, a partir dos quais se procura identificar as componentes de frequências características de falhas. O trabalho consiste em desenvolver um algoritmo que realize a transformada do sinal no tempo para o domínio da frequência através da ferramenta de cálculo denominada Transformada Rápida de Fourier e que calcule as frequências de falha, além da criação de uma interface gráfica com o usuário. Na análise serão abordadas falhas de estator, de rotor e de rolamento, sendo para o último, a análise do defeito localizado nas esferas e na pista externa.

**Palavras-chave:** Motores de Indução. Diagnóstico de Falhas. Interface Gráfica. Análise Espectral.



## ABSTRACT

ANICETO, Bruno C. M. **A Tool for Fault Diagnosis in Eletrical Motors** . 2014. 96 p. Graduate Work (Electrical Engineering). Federal Technological University of Paraná – UTFPR. Cornélio Procópio, 2014.

The three phase induction motors are the devices responsible by the electromechanical energy conversion more applied in industrial environment. Like all other machines inserted in industrial process, this motors also undergo regular maintenance. This work addresses a classical method of fault detection in direct start three phase induction motors. This method is based in signal current spectral analysis, in which looking identify the fault characteristics frequencies components based in particular mathematical models. The purpose of this research is develop an algorithm that transform the signal in time domain to frequency domain through the Fast Fourier Transform tool and calculate the fault frequencies, beyond from creating an graphical user interface for this algorithm. The fault analysis address: stator fault, rotor fault and bearing fault. For the last, the balls and outer race faults will be considered.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cenário Energético Brasileiro.....	17
Figura 2: Custo de manutenção na indústria.....	18
Figura 3: Distribuição de Falhas em Motores de Indução.....	19
Figura 4: Tipos de falhas que ocorrem em máquinas elétricas rotativas.....	30
Figura 5: Curto de espiras.....	31
Figura 6: Bobina curto-circuitada.....	31
Figura 7: Curto entre fases.....	32
Figura 8: Sobreaquecimento.....	32
Figura 9: MIT rebobinado.....	34
Figura 10: Rotores com uma e duas barras quebradas.....	37
Figura 11: Rotor com 4 barras quebradas.....	37
Figura 12: Geometria do rolamento.....	39
Figura 13: Gaiola de rolamento de uma carreira de esferas. Sintoma: Fratura.....	40
Figura 14: Anel interno de rolamento de uma carreira de esferas. Sintoma: Escamamento na pista.....	40
Figura 15 (a e b): Componente: Anel interno de rolamento de uma carreira de esferas. Defeito: Derretimento do material pela passagem de corrente elétrica.....	40
Figura 16: Rolamento da marca Koyo® com gaiola de poliamida.....	43
Figura 17: a) Defeito localizado no anel externo do rolamento no caminho das esferas; b) Defeito localizado no anel interno do rolamento no caminho das esferas; c) Idem b.....	43
Figura 18: Inserção do defeito localizado no anel interno do rolamento.....	44
Figura 19: Defeito localizado nas esferas.....	44
Figura 20: Defeito localizado nas esferas.....	44
Figura 21: Diferentes tipos de excentricidade: a linha de fronteira é o anel interno do estator, o rotor está em cinza, as linhas tracejadas são a centralização do estator. (a) Sem excentricidade. (b) Excentricidade estática. (c) Excentricidade dinâmica. (d) Excentricidade mista.....	45
Figura 22: Variacs de tensão.....	50
Figura 23: Sensores <i>Hall</i> de corrente e Tensão.....	50
Figura 24: Motor de Indução trifásico.....	51
Figura 25: Motor de Corrente Contínua.....	51
Figura 26: Torquímetro <i>Kistler</i> .....	52
Figura 27: Placa de aquisição.....	52

Figura 28: Bancada dos motores. ....	52
Figura 29 – Painel de comando e carga resistiva.....	53
Figura 30: Motor de indução trifásico com rotor do tipo gaiola de esquilo. ....	54
Figura 31: GUI – Analisador Espectral de Sinais.....	56
Figura 32: Analisador Espectral de Sinais – Análise no domínio da frequência. ....	57
Figura 33: Analisador Espectral de Sinais – Análise no domínio do tempo. ....	57
Figura 34: Ambiente Guide. ....	58
Figura 35: Módulo Carregamento de dados. (a) Modo padrão. (b) Exemplo de seleção de dados.....	59
Figura 36: Área de plotagem. ....	60
Figura 37: Módulo ‘Qualidade de Energia’ .....	61
Figura 38: Módulo Tipo de Falha. (a) Padrão. (b) Exemplo. ....	61
Figura 39: Módulo Parâmetros de Entrada.....	62
Figura 40: Módulo ‘Frequências de falha’: (a) Padrão. (b) Exemplo. ....	64
Figura 41: Espectros dos sinais de corrente com as frequências de falha em destaque. ....	64
Figura 42: Módulo ‘Variáveis no Workspace’: (a) Nenhuma variável no workspace do Matlab. (b) Variáveis no workspace do Matlab.....	65
Figura 43: Espectros dos sinais de corrente do MIT submetido a curto-circuito. Tensões balanceadas e sem imposição de carga.....	69
Figura 44: Espectros dos sinais de corrente do MIT operando sem falha e à vazio.....	69
Figura 45: Espectros dos sinais de corrente do MIT submetido a curto-circuito. Tensões balanceadas e torque de 1 N.m. ....	70
Figura 46: Espectros dos sinais de corrente do MIT submetido a curto-circuito. Tensões balanceadas e torque de 5 N.m. ....	70
Figura 47: Espectros dos sinais de corrente do MIT submetido a curto-circuito. Tensões balanceadas e condição de carga à vazio.....	71
Figura 48: Espectros de corrente para o rotor com uma barra quebrada e condição de carga à vazio. Parte das frequências características da Tabela 10 está destacada na figura. ....	73
Figura 49: Espectros de corrente para o rotor com uma barra quebrada e funcionamento a vazio. ....	74
Figura 50: Espectros de corrente para o rotor com uma barra quebrada e 4 N.m de carga.....	75
Figura 51: Espectros de corrente para o rotor com duas barras quebradas e consecutivas operando sem imposição de carga. ....	76

Figura 52: Espectros de corrente para o rotor com quatro barras quebradas e consecutivas operando sem imposição de carga. ....	77
Figura 53: Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 0 a 300 Hz. ....	81
Figura 54: Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 250 a 500 Hz. ....	82
Figura 55: Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 450 a 700 Hz. ....	82
Figura 56: Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 650 a 1000 Hz. ....	83
Figura 57: Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 850 a 1150 Hz. ....	83
Figura 58: Espectros de corrente para o rolamento 6204ZZ com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 0 a 300 Hz. ....	85
Figura 59: Espectros de corrente para o rolamento 6204ZZ com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 200 a 450 Hz. ....	85
Figura 60: Espectros de corrente para o rolamento 6205ZZ com defeito nas esferas. Faixa de frequência de 0 a 300 Hz. ....	87
Figura 61: Espectros de corrente para o rolamento 6205ZZ com defeito nas esferas. Faixa de frequência de 200 a 400 Hz. ....	87
Figura 62: Espectros de corrente para o rolamento 6204ZZ com defeito nas esferas. Faixa de frequência de 0 a 120 Hz. ....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das variações de tensão de curta duração. ....	28
Tabela 2: Dados técnicos do motor – Ensaio de falha nos enrolamentos do estator. ....	33
Tabela 3: Severidade e recomendações de procedimentos para a análise do espectro de corrente do motor. ....	36
Tabela 4: Relação da potência do motor e os rolamentos utilizados nos ensaios. ....	42
Tabela 5: Velocidade síncrona para frequências usuais. ....	55
Tabela 6: Parâmetros de entrada necessários por tipo de defeito no motor. ....	63
Tabela 7: Condições aplicadas nos ensaios de curto-circuito. (continua) ....	66
Tabela 8: Condições de Torque aplicadas nos ensaios de curto-circuito. ....	67
Tabela 9: Frequências de falha de curto-circuito para $k = 1$ e $n = 1$ a $n = 5$ . ....	68
Tabela 10: Frequências características de falha de barras quebradas calculadas para $k=1$ a $k=11$ . ....	73
Tabela 11: Condições de tensão aplicadas nos ensaios de falha de rolamento. ....	78
Tabela 12: Conjugados aplicados nos ensaios de falha de rolamento realizados com o MIT de 2 CV. ....	78
Tabela 13: Dimensional dos rolamentos utilizados nos ensaios. ....	79
Tabela 14: Exemplo explicativo da nomenclatura utilizada para rolamentos. ....	79
Tabela 15: Frequências características de falha no anel externo para o rolamento 6205ZZ. ....	80
Tabela 16: Frequências características de falha no anel externo para o rolamento 6204ZZ. ....	84
Tabela 17: Frequências características de falha nas esferas. Rolamento 6205ZZ. ....	86
Tabela 18: Frequências características de falha nas esferas. Rolamento 6204ZZ. ....	88

## LISTA DE SIGLAS

CIPECA	Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação
CC	Corrente Contínua
CV	Cavalo-vapor (Unidade de potência)
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
LSI	Laboratório de Sistemas Inteligentes
MIT	Motor de Indução Trifásico
TDF	Transformada Discreta de Fourier

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	19
1.2.1 Justificativa	20
1.2.2 Relevância do trabalho	21
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo geral	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.4 METODOLOGIA DO PROJETO	23
<b>2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>25</b>
2.1 PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA	25
2.1.1 Harmônicos	26
2.1.2 Desequilíbrio de tensão	26
2.1.3 Flutuação de tensão	27
2.1.4 Variação de tensão de curta duração	28
2.1.5 Variações de frequência	29
2.1.6 Distorção da forma de onda	29
<b>3 FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS</b>	<b>30</b>
3.1 FALHAS NO ESTATOR	30
3.1.1 Modelo de falha nos enrolamentos do estator: curto-circuito entre espiras	32
3.1.2 Inserção de falhas no estator	33
3.2 FALHAS ELÉTRICAS NO ROTOR	34
3.2.1 Modelo de falha no rotor: barras quebradas	35
3.2.2 Inserção de falhas no rotor	37
3.3 FALHAS MECÂNICAS	38
3.3.1 Falhas de rolamento	38
3.3.1.2 Inserção das falhas de rolamento em laboratório	42
3.3.2 Falha de excentricidade	45
<b>4 CONCEITOS DA ANÁLISE ESPECTRAL DE SINAIS</b>	<b>47</b>
4.1 TEOREMA DA AMOSTRAGEM	47
4.2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA TRANSFORMADA DE FOURIER	48
4.2.1 Transformada Discreta de Fourier	48
4.2.2 A Transformada Rápida de Fourier	49
<b>5 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS</b>	<b>50</b>
5.1 O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	53
5.1.1 Aspectos quantitativos do MIT	54
<b>6 A FERRAMENTA PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS</b>	<b>56</b>
6.1 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA	58
6.2 CARREGAMENTO DE DADOS	59
6.3 ÁREA DE PLOTAGEM	59
6.4 QUALIDADE DE ENERGIA	60
6.5 SELEÇÃO DO TIPO DE FALHA	61
6.6 PARÂMETROS DE ENTRADA	62
6.7 MÓDULO ‘FREQUÊNCIAS DE FALHA’	63
6.8 MÓDULO ‘VARIÁVEIS NO WORKSPACE’	65
<b>7 RESULTADOS</b>	<b>66</b>
7.1 ENSAIO DE FALHA NO ENROLAMENTO DO ESTATOR: CURTO-CIRCUITO	66

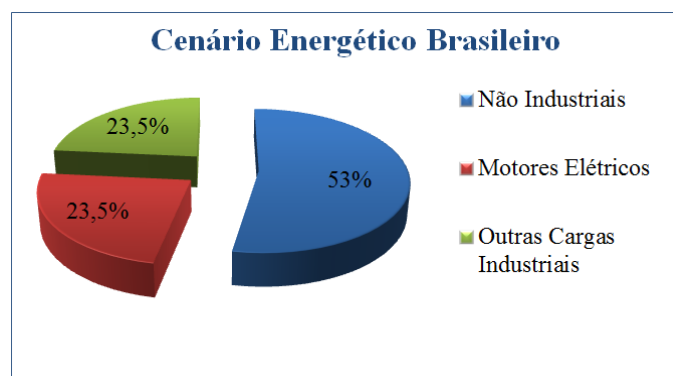
7.1.1 Caso 1: Curto-circuito entre espiras de uma mesma bobina – Combinação 1 .....	66
7.1.2 Caso 2: Curto-circuito entre espiras de uma mesma bobina – Combinação 2 .....	71
7.2 ENSAIO DE FALHA DE ROTOR: BARRAS QUEBRADAS .....	72
7.2.1 Caso 1: Uma barra quebrada .....	72
7.2.2 Caso 2: Duas barras quebradas .....	75
7.2.3 Caso 3: Quatro barras quebradas consecutivas .....	76
7.3 ENSAIO DE FALHA DE ROLAMENTO .....	77
7.3.1 Defeito na pista externa .....	80
7.3.2 Defeito nas esferas .....	86
7.4 BANCO DE DADOS .....	88
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>90</b>
8.1 TRABALHOS FUTUROS .....	91
8.2 PUBLICAÇÃO ASSOCIADA AO TRABALHO .....	92
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos, principais elementos de conversão eletromecânica de energia e equipamentos indispensáveis na maioria dos processos fabris, recebem admirável atenção de pesquisadores e de setores industriais. Assim, tais máquinas elétricas, principalmente os motores de indução, passam por constantes melhorias, a fim de atender às exigências de suas mais distintas aplicações.

Dados de estudos realizados em 2005 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, mostram que 47,0% da energia produzida no Brasil é destinado à classe industrial, o que equivale a aproximadamente 346 bilhões de MWh e deste total, 50% da energia é consumida por motores elétricos (SUETAKE, 2008; SUETAKE, 2012). A Figura 1 apresenta o cenário energético brasileiro.



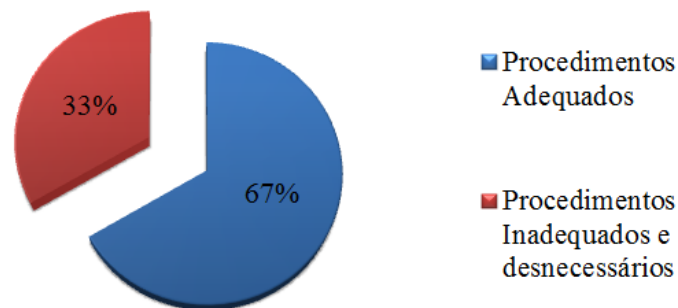
**Figura 1: Cenário Energético Brasileiro.**

**Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE).**

É importante citar que dentre todos os tipos de motores de corrente alternada, o de indução trifásico é amplamente utilizado devido à sua simplicidade em construção, robustez e baixo custo. Os referidos motores são especialmente projetados para circuitos trifásicos (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006, VEINOTT, 1959).

Devido à relevância do motor no panorama energético, estudos relativos à qualidade de energia elétrica, eficiência energética, identificação e predição de falhas bem como o adequado dimensionamento, são assuntos de suma importância. Além disso, outro campo que merece atenção é o da manutenção industrial. De acordo com Baccarini (2005), estudos de gerenciamento de manutenção indicaram que procedimentos inadequados e desnecessários consomem um terço do custo total de manutenção. A Figura 2 ilustra os dados dessa realidade.

## Custo de Manutenção na Indústria



**Figura 2: Custo de manutenção na indústria.**

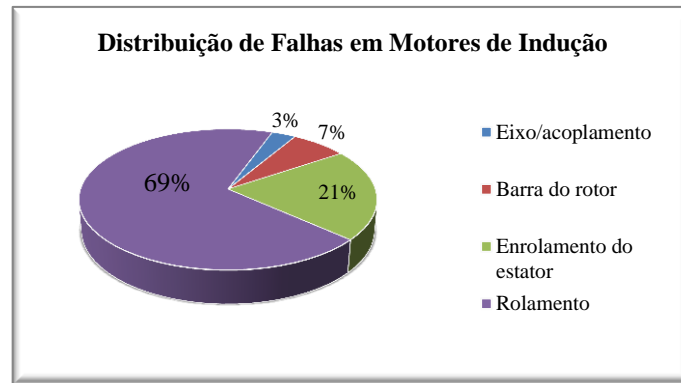
Fonte: Baccarini (2005).

Por isso, essa área necessita de técnicas modernas e eficientes, além de ferramentas precisas que auxiliem na tomada de decisão dos responsáveis por executar essa tarefa.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A detecção de falhas em máquinas de indução tem sido amplamente investigada nos últimos 20 anos. Contudo, a tecnologia nesse campo está em permanente evolução e novas técnicas aparecem a cada ano. O propósito dessa área de pesquisa é obter melhor eficiência na detecção de falhas e fornecer um método confiável com sensores de baixo custo e algoritmos simples (HENAO; DEMIAN; CAPOLINO, 2003).

Motores elétricos estão sujeitos a tipos de falhas, os quais incluem: falhas no estator, falhas elétricas no rotor, falhas mecânicas, falhas de um ou mais componentes de acionamento do sistema. A distribuição de falhas nestes motores, de acordo com Bellini *et. al* (2008), é dada da seguinte forma: rolamento (69%), barra do rotor (7%), enrolamento do estator (21%), e eixo/acoplamento (3%). Estes dados estão representados na Figura 3.



**Figura 3: Distribuição de Falhas em Motores de Indução.**

**Fonte: Bellini et al, 2008.**

As pesquisas de identificação de falhas em máquinas elétricas rotativas focam os motores de indução trifásicos, pois estes são a maioria das aplicações industriais. As falhas de rolamento são frequentemente encontradas na indústria e relatadas na literatura. Assim, através deste trabalho, objetiva-se a análise deste tipo de falha, bem como de estator e rotor e a proposta de uma ferramenta que auxilie no seu diagnóstico.

De acordo com Bellini et. al (2008), para a indústria, a principal preocupação é a detecção de alguma falha nas máquinas no estágio inicial a fim de evitar tempo de inatividade e substituir as partes danificadas durante a operação de manutenção regular, permitindo notável redução de custos.

A implementação de um sistema que monitore as falhas pode alertar sobre a possibilidade de paradas para manutenção. Isto evita uma parada repentina do processo que poderia causar perdas de produtos e enormes prejuízos para a empresa.

Em Baccarini (2005) está descrito: “...os custos da manutenção representam a maior parte dos custos operacionais de toda a fabricação. Podem representar entre 15% e 40% dos custos de muitos produtos.”

Esses fatores implicam na necessidade de desenvolver um sistema de monitoramento *online* cujo custo de aquisição seja baixo e que auxilie na tomada de decisão para retirada de um motor de operação.

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção será apresentada a caracterização do problema desta proposta de pesquisa, tais como justificativa e relevância.

### 1.2.1 Justificativa

No Brasil, os métodos de manutenção estão evoluindo e várias empresas, tais como Usiminas, Petrobrás, Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e outras, vêm investindo em sistemas de diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, com ênfase em análise de vibrações (BACCARINI, 2005).

Para um bom diagnóstico, é necessário um monitoramento contínuo e alarme rápido frente à ocorrência de uma falha. Entretanto, isso não é tarefa fácil, já que o efeito elétrico e/ou mecânico de alguns tipos de falhas é pequeno e podem ser mascarados por ruídos e mudanças das condições de operação do acionamento (BACCARINI, 2005). De acordo com Baccarini (2005), para um diagnóstico preciso é necessário:

- a) Análise em tempo real para garantir rapidez na detecção de falha;
- b) Escolha adequada dos seguintes parâmetros para medição: número de pontos, frequência de amostragem, tipo de janela, com o objetivo de obter alta sensibilidade e seletividade na detecção da falha;
- c) *Software* dedicado para correlação da vibração com a causa e o entendimento da severidade.

Obaid e Habetler (2003) relatam que falhas mecânicas em motores de indução podem ser detectadas pelo monitoramento de componentes específicas no espectro de frequência da corrente de estator. Os motores de indução trifásicos são os principais elementos de conversão eletromecânica de energia na indústria. Assim, um diagnóstico de falhas *online* desses motores é muito importante para garantir a segurança de operação, manutenção, entre outros fatores (YE et al, 2003).

Por tais motivos, há a necessidade de se dedicar esforços em desenvolver uma ferramenta para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos, sendo elas: curto-circuito entre espiras do estator, quebra de barras do rotor e falhas de rolamento, além do monitoramento de alguns parâmetros de qualidade de energia.

### 1.2.2 Relevância do trabalho

Os dois métodos tradicionais na identificação de falhas em máquinas elétricas apresentados na literatura são: i) o monitoramento dos sinais de corrente e; ii) o monitoramento da vibração da máquina. O monitoramento da vibração da máquina é muito efetivo na detecção de falhas de rolamento, porém, esta técnica exige sensores adicionais agregados às máquinas. Alternativamente, no caso de alguns motores de grande porte, existe a possibilidade de acoplamento de transdutores de vibração. Contudo, isso não é viável economicamente ou fisicamente possível para máquinas de pequeno a médio porte. Isso implica que motores de pequeno a médio porte, devem ser periodicamente monitorados por equipamento portátil monitorando máquina por máquina (SILVA; CARDOSO, 2005).

Uma avaliação periódica através de equipamento portátil não fornece um monitoramento contínuo e não garante acessibilidade às máquinas. Alguns motores usados em aplicações críticas, tais como motores da bomba de resfriamento de reatores nucleares, não podem ser facilmente acessados durante a operação do reator. (DEVANEY; EREN, 2004). Em aplicações onde o ambiente é agressivo e de difícil acesso, como no caso de um motor inserido num processo de uma destilaria, a checagem com equipamento portátil se torna uma tarefa árdua. Assim, a análise do sinal de corrente do motor fornece meios não intrusivos para detecção de falhas mecânicas e elétricas, tanto do motor quanto do equipamento de acionamento. (DEVANEY; EREN, 2004).

Neste trabalho foram realizados experimentos em laboratório de forma a emular as falhas destas máquinas elétricas encontradas em ambiente industrial. Assim, as aquisições realizadas são possíveis devido a um painel de alimentação com instrumentação desenvolvida no próprio laboratório de pesquisa e que faz uso de sensores de corrente de baixo custo. Com a instrumentação para a aquisição dos dados e a ferramenta para análise de sinais consolidados, pode-se empregar esta ferramenta num processo produtivo, a fim de propiciar uma correta tomada de decisão para a manutenção dos motores empregados. De forma complementar, a Transformada Rápida de Fourier é o recurso matemático utilizado para gerar os espectros das variáveis elétricas e também de sinais de vibração, os quais complementam o estudo e banco de dados.

### 1.3 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso.

#### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver uma ferramenta para diagnóstico de falhas de rolamento, estator e rotor em motores de indução trifásicos através da análise espectral dos sinais de corrente e além do monitoramento de alguns aspectos da qualidade de energia.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Nesta subseção serão apresentados os objetivos específicos do trabalho, os quais estão listados a seguir:

- a) Estudar os tipos de falhas que ocorrem em máquinas elétricas rotativas, problemas de qualidade de energia, manutenção no setor industrial e monitoramento de máquinas elétricas.
- b) Coletar sinais de corrente de uma máquina operando em condições sem falha e da mesma máquina em condições de falha de rolamento, de rotor e de estator.
- c) Desenvolver, em ambiente computacional, um algoritmo que realize análise espectral dos sinais de corrente coletados.
- d) Projetar e implementar a interface gráfica para o algoritmo de diagnóstico de falhas.
- e) Analisar os espectros dos sinais de corrente e identificar as frequências de cada tipo falha utilizando a interface gráfica, a fim de validar o desempenho da ferramenta.

## 1.4 METODOLOGIA DO PROJETO

Um sistema que monitore a condição de funcionamento de uma máquina elétrica rotativa consiste num dispositivo que esteja acoplado a mesma, fazendo a leitura periódica dos sensores a ela agregados. Tal equipamento é de grande importância para o setor industrial para diagnosticar, de forma antecipada, falhas nos motores elétricos. O método de identificação de falhas em motores de indução trifásicos, proposto neste trabalho de conclusão de curso é não invasivo. Isto significa que não há necessidade de remover a máquina de operação para diagnosticá-la.

No laboratório, os valores de tensão e corrente são medidos através de sensores *Hall* e enviados para uma placa de aquisição de dados cuja função é fazer a conversão analógico-digital desses sinais. Dessa forma, esses sinais são processados utilizando-se o *software* Matlab e analisados com a interface gráfica desenvolvida neste mesmo ambiente. A interface apresenta os espectros dos sinais com as frequências características de falha destacadas e monitora alguns parâmetros da qualidade de energia elétrica. Nos casos em que o motor encontra-se operando em ambiente industrial, isso possibilita paradas programadas do processo para que o motor seja removido para manutenção corretiva.

O desenvolvimento de uma interface gráfica para proceder à análise espectral para monitoramento e diagnóstico das condições de operação do Motor de Indução Trifásico (MIT) é o produto deste trabalho. Os estudos realizados neste trabalho de conclusão de curso são descritos a seguir:

Etapa 1: Levantamento e estudo bibliográfico sobre falhas em máquinas elétricas, problemas de qualidade de energia elétrica, manutenção na indústria e monitoramento de máquinas elétricas rotativas.

Descrição 1: Nesta etapa foi realizado um levantamento bibliográfico, especialmente em artigos de periódicos, congressos, teses e dissertações, sobre falhas em MITs, problemas de qualidade de energia elétrica, manutenção na indústria e monitoramento de máquinas elétricas.

Etapa 2: Levantamento de sinais de corrente de um MIT operando em condições sem falha e do mesmo motor operando com falha, ambos em regime de alimentação senoidal.

Descrição 2: As aquisições foram realizadas com o MIT operando em condições sem falha, ou seja, com seus elementos construtivos em condições normais, e também em

condições de falha, tais como, falha no enrolamento do estator, na barra do rotor ou nos rolamentos.

Etapa 3: Desenvolvimento de um algoritmo de análise espectral de sinais de corrente.

Descrição 3: Desenvolvimento de um algoritmo de análise espectral de sinais, cuja função é passar um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência.

Etapa 4: Projeto e implementação de uma interface gráfica.

Descrição 4: Nesta etapa, foi criada uma interface gráfica que monitore os espectros dos sinais de corrente.

Etapa 5: Análise dos sinais de corrente coletados.

Descrição 5: Os sinais de corrente coletados, com e sem falha foram analisados e comparados utilizando a interface gráfica como forma de validar o desempenho da ferramenta.



## 2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Este capítulo aborda os principais aspectos relacionados à qualidade de energia elétrica, como por exemplo, os distúrbios que podem ocorrer na tensão de alimentação e as consequências para as máquinas elétricas ligadas à rede.

A entrega de energia elétrica, com forma de onda e níveis de tensão adequados às máquinas elétricas permite às mesmas operarem satisfatoriamente, atendendo às especificações de projeto, até mesmo para uma vida útil mais longa.

Por outro lado, máquinas elétricas são sensíveis a distúrbios de tensão que aparecem na rede de alimentação, tais como, sobretensão, subtensão, desequilíbrio e distorções na forma de onda, os quais podem causar altos níveis de perdas de energia e, conseqüentemente, resultar em altas temperaturas nos enrolamentos. Isto, por sua vez, degrada o isolamento a uma taxa acelerada, implicando numa falha elétrica no enrolamento do estator. Para a maioria dos materiais isolantes, um aumento de 8 a 11 graus Celsius na temperatura pode resultar numa redução, duas vezes mais rápida, na vida útil do isolamento. Danos às máquinas elétricas devido à falha de isolamento prematura podem ser identificados com o uso de equipamentos de teste adequados, para determinar se uma ação corretiva precisa ser tomada (SINGH; SEERA; ISMAIL, 2010).

### 2.1 PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA

A seguir, são apresentadas algumas definições sobre alguns tipos de perturbações na tensão de fornecimento, de acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que estabelecem os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica.

São apresentados, sucintamente, alguns problemas de qualidade de energia, os quais podem ser harmônicos, perturbações na amplitude da tensão, desequilíbrios de tensão e perturbações na forma de onda do sinal, entre outros.

Perturbações na amplitude de tensão ocorrem quando um sinal senoidal sofre variações como, por exemplo, afundamento, interrupção, sobretensão, flutuação, subtensão entre outros.

Estes problemas típicos de qualidade de energia elétrica repercutem em alguns equipamentos que estão conectados à rede elétrica. Variações de tensão, as quais são provocadas por variações no fluxo de potência ativa e reativa da rede, podem afetar o desempenho e a vida útil dos equipamentos.

### 2.1.1 Harmônicos

Um dos problemas que afeta a qualidade da energia elétrica são os harmônicos gerados por cargas não lineares, tais como inversores de frequência, retificadores, lâmpadas fluorescentes, etc. Uma tensão ou corrente harmônica são sinais senoidais cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação (PROCOBRE, 2001).

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, as distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Os principais efeitos dos harmônicos de tensão em máquinas rotativas são oscilações no torque, as quais podem levar a danos, especialmente quando ocorrem próximas as frequências de ressonância (BOLLEN; GU, 2006).

### 2.1.2 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é dada pela Equação (1).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (1)$$

onde:

$FD\%$  é o fator de desequilíbrio;

$V_-$  é a magnitude da tensão de sequência negativa (RMS);

$V_+$  é a magnitude da tensão de sequência positiva (RMS).

Alternativamente, pode-se utilizar a Equação (2) que conduz a resultados em consonância com a Equação (1).

$$FD\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \quad (2)$$

onde o parâmetro  $\beta$  é expresso pela Equação (3).

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3)$$

onde:

$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  são as magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS).

Em um sistema elétrico trifásico, quando as tensões apresentam amplitudes diferentes entre si ou defasagem angular diferente de  $120^\circ$  elétricos ou ambas as condições simultaneamente, este efeito é denominado o desequilíbrio de tensão. O mesmo também pode ser definido como o desvio máximo dos valores médios das tensões ou correntes trifásicas, dividido pela média dos mesmos valores, expresso em percentagem (OLIVEIRA, 2011).

Uma das causas do desequilíbrio de tensão é a presença de cargas trifásicas desequilibradas, além da existência, nos sistemas de distribuição, de cargas monofásicas distribuídas de modo inadequado. Consumidores com cargas trifásicas más distribuídas também ocasiona correntes desequilibradas, implicando em tensões desequilibradas (OLIVEIRA, 2011).

Este problema de qualidade de energia pode provocar efeitos indesejáveis na operação de equipamentos, com destaque para os motores de indução trifásicos. Tensões desequilibradas aplicadas na alimentação de um motor de indução resultam num conjugado pulsando no eixo da máquina. Isto aumenta a vibração e, conseqüentemente, o ruído durante a operação do motor. Em motores de pequeno porte e eixo curto, a vibração pode implicar em leve contato entre rotor e estator, elevando a temperatura nos pontos de atrito (OLIVEIRA, 2011).

As correntes de sequência negativa causam sobreaquecimento no MIT, que por sua vez causa uma redução na vida útil da máquina, devido a deterioração do isolamento da mesma (OLIVEIRA, 2011).

### 2.1.3 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão.

### 2.1.4 Variação de tensão de curta duração

Desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo são caracterizados como variações de tensão de curta duração. A Tabela 1 apresenta a classificação das variações de tensão de curta duração.

**Tabela 1: Classificação das variações de tensão de curta duração.**

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da variação</b>	<b>Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação a tensão referência</b>
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão		Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão		Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão		Superior a 1,1 p.u

Fonte: Módulo 8 do PRODIST.

O afundamento se caracteriza por uma diminuição de tensão por um curto intervalo de tempo seguido pelo seu reestabelecimento. Afundamentos e interrupções são geralmente provocados por aumentos bruscos de corrente, sejam por curtos-circuitos, partidas ou comutações de cargas de potências elevadas.

A sobretensão e a subtensão são definidas como uma tensão com valor eficaz superior e inferior a 10% da tensão de alimentação, respectivamente.

Em motores de indução, subtensões conduzirão à redução do torque de partida e aumentarão a temperatura à plena carga. Um torque de partida reduzido pode aumentar significativamente o tempo necessário para acelerar o motor (BOLLEN; GU, 2006). Por outro lado, as sobretensões conduzem a um aumento do torque, aumento na corrente de partida e diminuição do fator de potência. (BOLLEN; GU, 2006)

#### 2.1.5 Variações de frequência

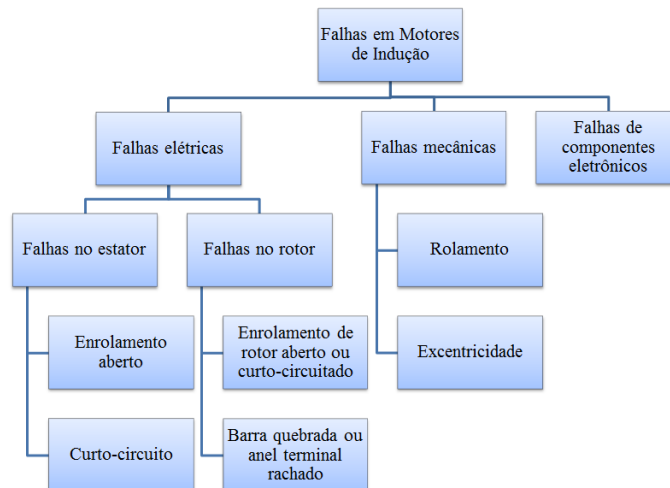
O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

#### 2.1.6 Distorção da forma de onda

Outro tipo de problema de qualidade de energia é a distorção da forma de onda da tensão ou da corrente. Variações na amplitude e na frequência não são consideradas distorções da forma de onda, embora uma distinção completa entre os diferentes tipos de variações não seja possível. A distorção na forma de onda tem o mesmo efeito em máquinas rotativas que o desequilíbrio de tensão: leva a perdas adicionais e cria pontos quentes que podem danificar a máquina. (BOLLEN; GU, 2006)

### 3 FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

A Figura 4 apresenta um esquema dos tipos de falhas que podem ocorrer em máquinas elétricas.



**Figura 4:** Tipos de falhas que ocorrem em máquinas elétricas rotativas.

Fonte: Autoria própria.

O diagnóstico de falha nestes motores é de grande importância, pois pode evitar paradas repentinas em processos industriais, devido à ocorrência de alguma falha não detectada com antecedência, permitindo a redução das perdas de produção e manutenção programada dos motores inseridos no processo.

#### 3.1 FALHAS NO ESTATOR

Duas classes principais de falhas no enrolamento de estator são consideradas: A primeira trata da assimetria no enrolamento de estator tal como falha de fase aberta. Este tipo de falha faz com que a máquina opere com torque reduzido. A segunda é o curto-circuito entre espiras no enrolamento de fase o qual implica numa falha catastrófica num curto intervalo de tempo. (BELLINI *et. al*, 2008)

Falhas no estator são uma das falhas mais comuns em um motor de indução. As mesmas usualmente começam com o curto-circuito as entre espiras, como ilustra a Figura 5. A principal causa de falha de estator é a degradação do isolamento a qual leva ao curto-circuito entre espiras. Quando ocorre um curto-circuito entre espiras, correntes extremamente

altas fluindo na bobina curto-circuitada causam a destruição do motor. Em seu estágio inicial de desenvolvimento, este tipo de falha pode não modificar o desempenho da máquina, porém, se não diagnosticada, pode resultar num severo curto-circuito entre as fases. Outra possibilidade consiste na falha fase-terra. Ambos os casos levam a danos irreversíveis no núcleo e enrolamentos da máquina. Um fato importante é que o tempo de transição entre o estágio incipiente e a falha completa é, geralmente, menor que os outros tipos de falhas, o qual pode levar vários segundos (SHARIFI; EBRAHIMI, 2011).

A contaminação interna do motor, falha do esmalte de isolamento do fio, falha do verniz de impregnação e rápidas oscilações na tensão de alimentação, são possíveis causas do curto de espiras e bobina curto-circuitada, como mostra a Figura 5 e a Figura 6, respectivamente.



**Figura 5: Curto de espiras**

Fonte: WEG (2009)



**Figura 6: Bobina curto-circuitada**

Fonte: WEG (2009)

No caso de curto entre fases, a contaminação interna do motor também pode ser uma possível causa, além da degradação do material isolante por ressecamento, devido ao excesso de temperatura. Entre outras causas, o excessivo número de partidas, excesso de carga, sobretensão ou subtensão na rede de alimentação e a deficiência na ventilação, devido a fatores tais como, tampa defletora danificada ou obstruída, sujeira sobre a carcaça e temperatura ambiente elevada, podem levar o motor trifásico ao sobreaquecimento. As consequências do curto entre fases e da elevação de temperatura são ilustradas, respectivamente, pela Figura 7 e pela Figura 8 (WEG, 2009).



**Figura 7: Curto entre fases.**

Fonte: WEG (2009)



**Figura 8: Sobreaquecimento.**

Fonte: WEG (2009)

### 3.1.1 Modelo de falha nos enrolamentos do estator: curto-circuito entre espiras

De acordo com Thomson (2001), as espiras curto-circuitadas alteram as ondas de fluxo magnético através do entreferro e seu efeito pode ser quantificado pela Equação (4). O propósito deste trabalho é verificar a existência dessas frequências características de falha nos enrolamentos do estator no espectro de frequência dos sinais de corrente coletados de um MIT sob este tipo de falha. Este mesmo modelo de falha é utilizado em outro trabalho de Thomson e Fenger (2001), que propõe a detecção de falhas em motores de indução através da análise do espectro do sinal de corrente.

$$f_{cc} = f \left[ \frac{n}{p/2} (1 - s) \pm k \right] \quad (4)$$

onde:

$f_{cc}$  é a componente de frequência de curto-circuito

$n$  é um número inteiro e positivo, variando 1,2,3...

$k$  é um número inteiro e positivo, variando 1,3,5...

Baccarini (2005), também apresenta este mesmo modelo de falha e comenta que estudos de casos em motores de 2 e 4 polos mostram que apenas algumas componentes de corrente devem ser analisadas para o diagnóstico de falha nos enrolamentos do estator. As



componentes consideradas pela autora são para valores de  $k = 1$  e  $n = 3$ ,  $k = 1$  e  $n = 5$ , na equação (4). Essa assertiva possui alta aplicabilidade a este trabalho, visto que MIT utilizado nos ensaios de falha nos enrolamentos do estator é de 4 polos. Estes valores foram utilizados no cálculo das frequências características de falha de curto circuito entre espiras e as componentes foram analisadas.

Silva (2008) salienta que, “dependendo dos valores de  $n$  e  $k$  as componentes coincidem com os padrões de excentricidade e barras quebradas”. Com base nisso, um dos principais propósitos consiste em verificar as componentes de frequência, calculadas a partir destes modelos de falha, nos sinais reais do MIT sob tais condições. No que diz respeito aos valores de  $n$  e  $k$  do modelo, a coincidência das componentes do modelo de avarias no enrolamento do estator com outros tipos de falha pode ocorrer, mas conforme relatado por Baccarini (2005) e já citado, pode-se restringir os valores atribuídos aos parâmetros  $n$  e  $k$  do modelo, quando estiver sendo analisado um tipo de falha específica.

### 3.1.2 Inserção de falhas no estator

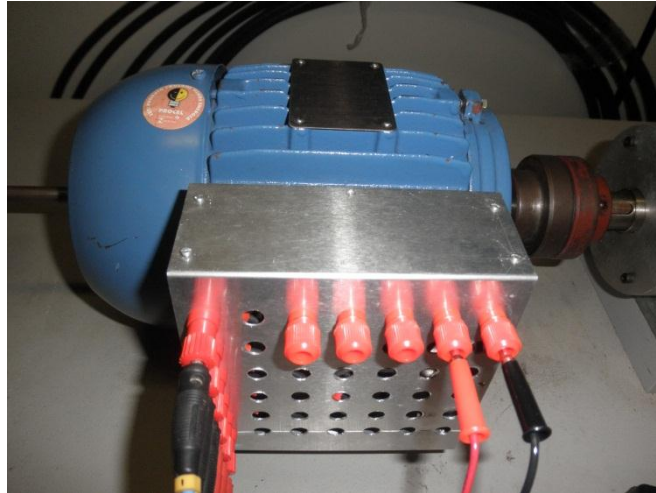
Os ensaios com o MIT submetido à situação de falha nos enrolamentos do estator foram realizados utilizando a mesma bancada apresentada em (SUETAKE, 2012). No trabalho de Suetake (2012) o procedimento para reconstrução deste tipo de falha em laboratório é descrito. A Tabela 2 apresenta algumas especificações técnicas do MIT em questão.

**Tabela 2: Dados técnicos do motor – Ensaio de falha nos enrolamentos do estator.**

<b>Fabricante</b>	<b>WEG</b>
<b>Linha</b>	<i>Standard</i>
<b>Potência</b>	1,0 cv
<b>Tensão</b>	220V / 380V
<b>Polos</b>	4
<b>Frequência</b>	60 Hz
<b>Torque Nominal</b>	4 N.m
<b>RPM</b>	1720

**Fonte: Autoria própria.**

Uma descrição detalhada do esquema de ligação das bobinas do motor, o projeto das derivações do enrolamento do estator para os ensaios de curto-circuito e os passos do rebobinamento são apresentados por Suetake (2012). A Figura 9 apresenta o motor com os bornes de ligação dos taps de derivação.



**Figura 9: MIT rebobinado**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2 FALHAS ELÉTRICAS NO ROTOR

De acordo com Bellini et al (2008), falhas elétricas no rotor representam de 5% a 10% o percentual de falhas nos MITs. As mesmas incluem enrolamento de rotor aberto ou curto-circuitado, barra quebrada ou final-de-anel rachado, para máquinas com rotor gaiola de esquilo. Dessas possíveis avarias no rotor, barras quebradas representam 35% das falhas de rotor. (SILVA, 2008). Como o foco deste trabalho é a análise de falhas em motores de indução trifásicos, conseqüentemente, o rotor deste tipo de motor, designado gaiola de esquilo, é o único tipo de rotor levado em consideração, o qual é considerado o enrolamento secundário do motor de indução.

Em se tratando de falhas de estator, a operação da máquina após a falha é limitada em poucos segundos. Porém, no caso de falhas de rotor a máquina pode continuar operando até a operação de manutenção regular, permitindo que uma adequada medida de precaução seja tomada. (BELLINI, 2008)

A análise espectral dos sinais de corrente é um método amplamente utilizado na detecção de falhas. Neste método, componentes de frequência de falha são analisadas, sendo

que diferentes tipos de falha determinam diferentes harmônicos. (SHARIFI; EBRAHIMI, 2011).

Algumas das principais causas de quebra das barras do rotor são, entre outros, esforços térmicos, esforços mecânicos, imperfeições no processo de manufatura do rotor. (SILVA, 2008).

Trincas ou barras do rotor quebradas implicam em oscilações no campo magnético e estas, por sua vez, produzem componentes no espectro de corrente, possibilitando a detecção das falhas que ocasionaram tais oscilações. (BENBOUZID, 2000). Ainda, um rotor que está com uma ou mais barras quebradas, não responde à excitação de maneira uniforme e isto ocasiona uma variação eletromagnética, que é criada devido a alguns pontos sem indução no motor. (GONGORA, 2013)

### 3.2.1 Modelo de falha no rotor: barras quebradas

As barras de rotor quebradas podem ser detectadas pelo monitoramento das componentes que aparecem no espectro de corrente. As frequências de barra quebrada são dadas pela equação (5). (BENBOUZID, 2000; FILIPPETTI *et al*, 2000)

$$f_{bb} = f \left[ k \left( \frac{1-s}{p/2} \right) \pm s \right] \quad (5)$$

onde:

$f_{bb}$  é a componente de frequência de barra quebrada

$k = 1,5,7,11,13, \dots$

O modelo de falha de barra quebrada, equação (5), será considerado no algoritmo para cálculo das frequências características de falha de rotor, mais especificamente, barras quebradas. Benbouzid (2000), também comenta sobre a possibilidade das frequências previstas para falha de barras quebradas e as frequências do modelo de falha de excentricidade, o qual foi apresentado em seu trabalho, serem as mesmas. Contudo, a frequência correspondente a um número harmônico particular é diferente, permitindo que as duas falhas sejam distinguidas.

A Tabela 3 apresenta a severidade da falha de barra quebrada e as recomendações de procedimentos para análise do espectro de corrente do motor. Esta tabela é apresentada nos

trabalhos de vários pesquisadores, tais como, Brito (2002), Filho (2003), Baccharini (2005), Rabelo (2012).

**Tabela 3: Severidade e recomendações de procedimentos para a análise do espectro de corrente do motor.**

Amplitude em [dB] das frequências $f - 2f_s$	Avaliação da condição	Ação recomendada
$> 50dB$	Excelente	Nenhuma
44 a 50 dB	Boa	Nenhuma
39 a 44 dB	Moderada	Continuar inspeção e analisar a tendência
35 a 39 dB	Desenvolvendo trinca na barra do rotor	Reduzir intervalo de inspeção, observar curva de tendência
30 a 35 dB	Provavelmente duas barras trincadas ou quebradas	Fazer análise espectral de vibrações e confirmar a fonte do problema
25 a 30 dB	Muitas barras trincadas ou quebradas, várias trincas nos anéis e falhas severas em toda a gaiola	Desmontar o rotor
$< 25dB$	Severa	Desmontar ou substituir o rotor para inspeção

Fonte: Baccharini (2005).

Monitorando a diferença em  $dB$  entre a amplitude da componente fundamental da corrente  $f$  e a componente  $2f_s$ , a banda lateral esquerda de  $f$ , pode-se determinar a condição das barras do rotor. Quanto menor a diferença entre as amplitudes daquelas componentes, maior a severidade da falha ou maior o número de barras quebradas. (BACCARINI, 2005; BRITO, 2002).

### 3.2.2 Inserção de falhas no rotor

O procedimento para inserção de falhas no rotor gaiola de esquilo do motor de indução, a metodologia e as ferramentas utilizadas são descritos em Suetake (2012).

A Figura 10 mostra dois dos quatro rotores utilizados no ensaio de barras quebradas. O rotor na parte superior da figura possui apenas uma barra quebrada, enquanto que o rotor na parte inferior da figura possui duas barras quebradas, como indicado pelo detalhe da figura. Estes rotores foram utilizados nos ensaios realizados por Suetake (2012), cujos sinais serviram para o treinamento de redes neurais artificiais, com aplicação no monitoramento e diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos.



**Figura 10: Rotores com uma e duas barras quebradas.**

**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 11 mostra o rotor com quatro barras quebradas utilizado nos ensaios.



**Figura 11: Rotor com 4 barras quebradas.**

**Fonte: Autoria própria.**

Foram realizados ensaios com o MIT operando com rotores com uma barra quebrada, duas barras quebradas consecutivas, quatro barras quebradas consecutivas e quatro barras quebradas, sendo duas barras quebradas consecutivas e duas barras quebradas consecutivas e diametralmente opostas. A cada ensaio, a troca foi feita tomando um procedimento adequado que não prejudicasse a estrutura física da bancada de ensaios nem do motor propriamente dito. O MIT utilizado no ensaio de falhas de rotor é o mesmo cujos dados são apresentados na Tabela 2. Em Gongora (2013), a mesma estrutura de ensaios e os mesmos rotores de Suetake (2012) foram utilizados no desenvolvimento de sua dissertação.

### 3.3 FALHAS MECÂNICAS

Dentre as falhas mecânicas destacam-se o rolamento danificado, a excentricidade, eixo empenado e o desalinhamento. No contexto destas falhas, analisou-se apenas sinais de corrente de motores de indução trifásicos submetidos a diferentes tipos de falhas de rolamento.

#### 3.3.1 Falhas de rolamento

Falhas de rolamento são falhas mecânicas e representam o maior percentual da ocorrência de falhas em motores de indução, de acordo com os dados da Figura 3. Os rolamentos constituem-se de anel externo, anel interno, gaiola e os elementos rolantes. A maioria das máquinas elétricas usam rolamentos com elementos rolantes do tipo esférico, os quais giram dentro dos anéis. Vibrações e excentricidade implicam no desenvolvimento deste tipo de falha, além de montagem incorreta, lubrificação excessiva ou insuficiente, sobrecarga, entre outras. (RABELO, 2012)

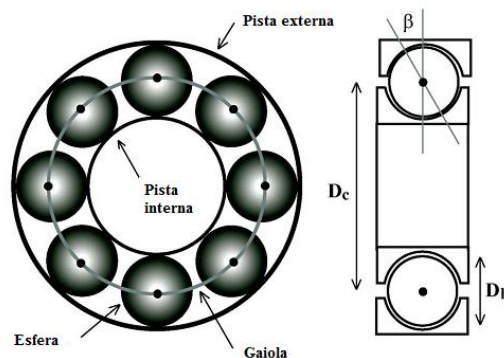
Falhas de rolamento podem ser classificadas em defeitos localizados e defeitos distribuídos. Os primeiros são defeitos pontuais nos elementos construtivos do rolamento, já os últimos, por sua vez, atingem toda uma região do rolamento, podendo incluir vários elementos construtivos e são difíceis de ser determinados por frequências características.

(BLÖDT *et al*, 2008; GONGORA, 2013; RABELO, 2012; SILVA, 2008). O primeiro tipo de falha de rolamento será tratado neste trabalho em seus aspectos quantitativo e qualitativo.

A detecção de falhas de rolamento pode ser feita através de sinais vibratórios ou sinais elétricos. Essa detecção será feita a partir da análise espectral dos sinais de corrente da máquina sob esse tipo de falha.

A análise espectral utilizando a transformada rápida de Fourier permite identificar as frequências características das falhas de rolamento. De acordo com Blödt *et al* (2008), “as frequências características são funções da geometria do rolamento e da frequência mecânica do rotor  $f_r$ ”. Em rolamentos, defeitos localizados podem ser classificados de acordo com os seguintes elementos afetados: defeito na pista externa, defeito na pista interna, defeito na gaiola e defeito na esfera ou elemento rolante.

A geometria de um rolamento com elementos rolantes do tipo esférico é ilustrada na Figura 12. As esferas, alojadas na gaiola, percorrem o caminho entre as pistas interna e externa.



**Figura 12: Geometria do rolamento.**

**Fonte: Blödt *et al* (2008)**

A seguir são apresentados alguns exemplos de falhas de rolamento, consultados no manual de diagnóstico rápido de ocorrências em rolamentos, conforme NSK BRASIL LTDA (2005). Os exemplos tem uma abordagem voltada para rolamentos cujos elementos rolantes são do tipo esférico e que apresentaram defeitos localizados, visto que os ensaios realizados neste trabalho também abordaram tais características.

A Figura 13 apresenta a gaiola de um rolamento de uma carreira de esferas que apresentou o defeito classificado como fratura, conforme NSK BRASIL LTDA (2005). Falha na instalação, falha no manuseio, carga elevada, impactos ou grandes vibrações, rotação excessiva, acelerações e desacelerações repentinas, falha de lubrificação e aumento de temperatura são possíveis causas que expõe este elemento a este tipo de dano.

A Figura 14 consiste num anel interno de um rolamento de uma carreira de esferas que apresenta escamamento na pista e cuja causa pode ser devido a algum impacto na instalação. Quando o rolamento gira com carga, ocorre saída de material pela fadiga do aço nas superfícies dos elementos rolantes ou nas superfícies das pistas interna ou externa. Esse tipo de defeito pode ser considerado como localizado. (GONGORA, 2013)



**Figura 13:** Gaiola de rolamento de uma carreira de esferas. Sintoma: Fratura.

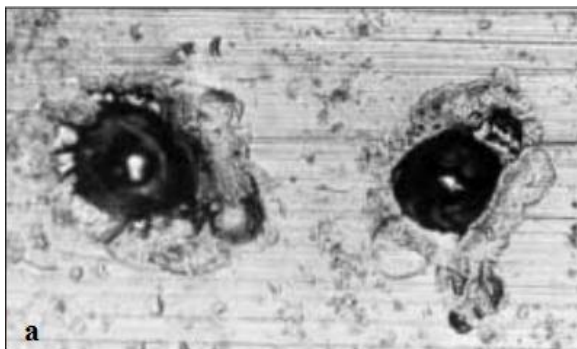
Fonte: NSK BRASIL LTDA (2005)



**Figura 14:** Anel interno de rolamento de uma carreira de esferas. Sintoma: Escamamento na pista.

Fonte: NSK BRASIL LTDA (2005)

Outro tipo de falha de rolamento relevante é devido a descarga elétrica conforme apresentado na Figura 15. Isto acontece quando há a passagem de corrente elétrica pelo rolamento. A corrente elétrica em forma de arco passa do eixo do motor, pelos anéis e esferas derretendo os componentes afetados. Diferença de potencial entre o anel interno e externo é uma das causas para este tipo de defeito.



**Figura 15 (a e b):** Componente: Anel interno de rolamento de uma carreira de esferas. Defeito: Derretimento do material pela passagem de corrente elétrica.

Fonte: NSK BRASIL LTDA (2005)



### 3.3.1.1 Modelos de falhas de rolamento: defeitos localizados.

Os modelos de falha na pista externa, na pista interna, nas esferas e na gaiola são dados, respectivamente, pelas equações (6), (7), (8) e (9) e considerados no desenvolvimento dos trabalhos acadêmicos de Gongora (2013), Rabelo (2012) e Brito (2002), e nas publicações de Bellini *et al* (2008), Blödt *et al* (2008), Devaney e Eren (2004), Silva e Cardoso (2005), Mohamed(2000).

$$\text{Pista externa } (f_o): \quad f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (6)$$

$$\text{Pista interna } (f_i): \quad f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (7)$$

$$\text{Esfera } (f_b): \quad f_b = \frac{D_c}{2D_b} f_r \left( 1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta \right) \quad (8)$$

$$\text{Gaiola } (f_c): \quad f_c = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (9)$$

onde:

$f_o$  é a frequência de falha no anel externo;

$f_i$  é a frequência de falha no anel interno;

$f_b$  é a frequência de falha na esfera;

$N_b$  é o número de esferas;

$f_r$  é a frequência de rotação mecânica;

$D_b$  é o diâmetro da esfera;

$D_c$  é o diâmetro da gaiola;

$\beta$  é o ângulo de contato.

Para rolamentos de 6 a 12 esferas, as frequências de falha no anel externo, no anel interno e na gaiola são estatisticamente aproximadas, respectivamente, pelas equações (10), (11) e (12).

$$f_o = 0,4 \cdot N_b \cdot f_r \quad (10)$$

$$f_i = 0,6 \cdot N_b \cdot f_r \quad (11)$$

$$f_c = 0,4 \cdot f_r \quad (12)$$

Substituindo as frequências características calculadas na equação (13), calcula-se as frequências de falha de rolamento.

$$f_{bf} = |f \pm k f_{car}| \quad (13)$$

onde:

$f_{bf}$  é a frequência de falha de rolamento;

$f_{car}$  é a frequência característica de falha;

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

Conhecendo-se a geometria do rolamento, a frequência de rotação do motor e a frequência de alimentação do estator, ou seja, da rede elétrica  $f$ , pode-se encontrar as frequências de falha de rolamento.

Sistemas industriais ainda baseiam sua detecção em sinais vibratórios. Entretanto, atividades de pesquisa focam a detecção de falhas de rolamento baseada em sinais de corrente, os quais podem ser usados em casos de grandes falhas quando é desejável uma detecção incipiente de falhas que rapidamente degeneram em outros defeitos.

Esses modelos de falha serão agregados ao algoritmo de identificação de falhas desenvolvido neste trabalho de pesquisa.

### 3.3.1.2 Inserção das falhas de rolamento em laboratório

Os ensaios de falha de rolamento foram realizados no CIPECA na UTFPR, câmpus Cornélio Procópio. As falhas foram recriadas objetivando reproduzir as mesmas condições de falha de um motor de indução operando em ambiente industrial. Tais experimentos e procedimentos metodológicos estão descritos em Gongora (2013).

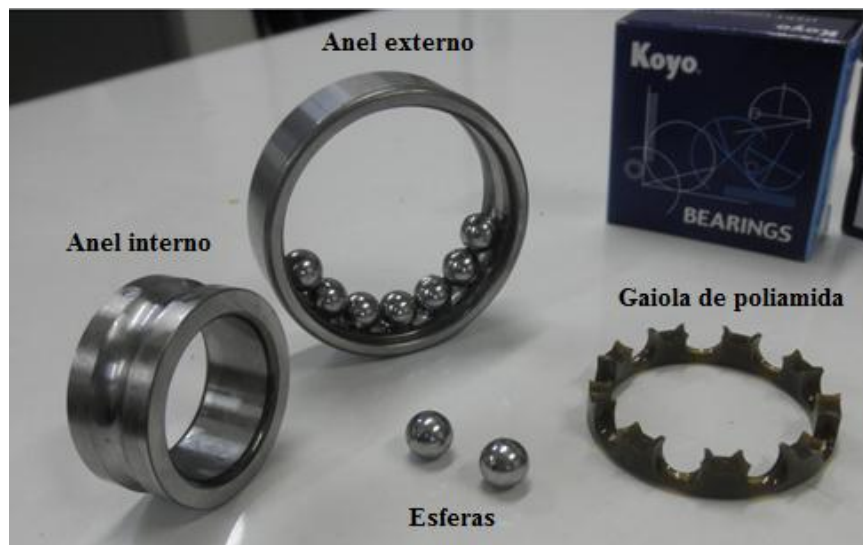
Dois motores de indução com classes de potência distintas foram utilizados nos ensaios, um de potência de 1 CV e outro com potência de 2 CV, ambos de 4 polos. A Tabela 4 apresenta a relação da potência dos motores e os códigos dos rolamentos dianteiro e traseiro utilizados no ensaio, conforme determinação de fabricação.

**Tabela 4: Relação da potência do motor e os rolamentos utilizados nos ensaios.**

<b>Fabricante</b>	<b>Potência</b>	<b>Rolamento dianteiro</b>	<b>Número de esferas</b>	<b>Rolamento traseiro</b>	<b>Número de esferas</b>
WEG	1 CV	6204	08	6203	08
WEG	2 CV	6205	09	6204	08

Fonte: Gongora (2013).

A Figura 16 mostra um rolamento desmontado e seus elementos identificados, tais como o anel externo, o anel interno, as esferas e a gaiola.

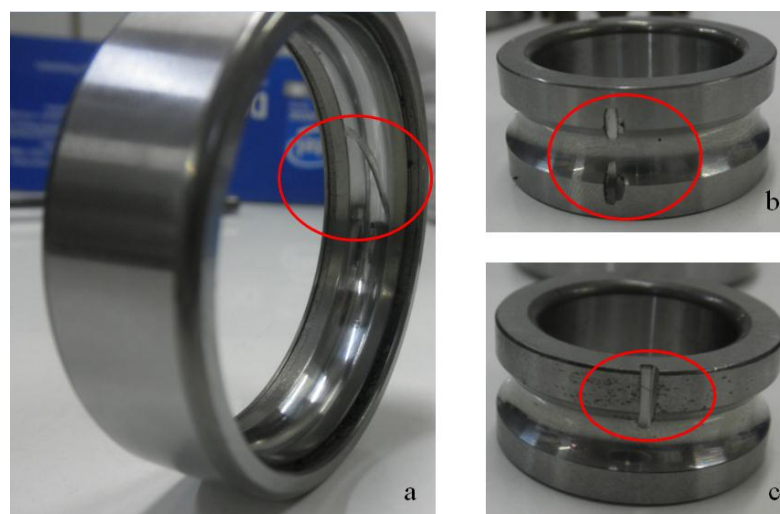


**Figura 16: Rolamento da marca Koyo® com gaiola de poliamida.**

**Fonte: Autoria própria.**

No trabalho de Gongora (2013), optou-se por utilizar os rolamentos com gaiola de poliamida, pois isto facilita a desmontagem do componente. Os rolamentos da NSK, por sua vez, possuem gaiola de aço que impedem a desmontagem do rolamento sem danificá-la.

A Figura 17 mostra os anéis externo e interno de um rolamento fixo de uma carreira de esferas, com defeitos localizados no caminho que as esferas percorrem. Este tipo de defeito foi inserido com uma ferramenta mini retífica de alta rotação.



**Figura 17: a) Defeito localizado no anel externo do rolamento no caminho das esferas; b) Defeito localizado no anel interno do rolamento no caminho das esferas; c) Idem b.**

**Fonte: Adaptado de Gongora (2013).**

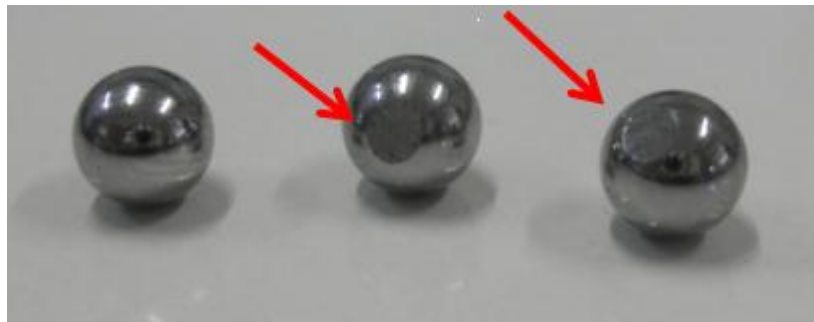
A Figura 18 mostra o método utilizado para inserir o defeito localizado nos anéis do rolamento.



**Figura 18: Inserção do defeito localizado no anel interno do rolamento.**

Fonte: Adaptado de Gongora (2013).

A Figura 19 mostra o defeito localizado nas esferas inserido no laboratório. Neste caso, o defeito consiste num achatamento da superfície esférica.



**Figura 19: Defeito localizado nas esferas.**

Fonte: Adaptado de Gongora (2013).

Por outro lado, o defeito localizado nas esferas da Figura 20, consiste na inserção de uma ranhura neste elemento.



**Figura 20: Defeito localizado nas esferas.**

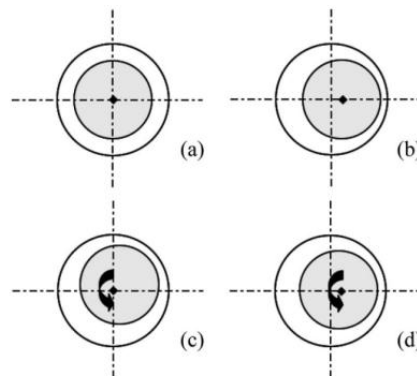
Fonte: Adaptado de Gongora (2013).

Uma descrição detalhada sobre os materiais utilizados na inserção das falhas de rolamento e o procedimento utilizado pode ser consultado em Gongora (2013).

### 3.3.2 Falha de excentricidade

Outro tipo de falha mecânica relevante de citação é a excentricidade de um cilindro rotativo, a qual pode ser classificada como estática, dinâmica ou mista. A excentricidade estática ocorre quando o centro de rotação está simplesmente deslocado do centro original de certa distância. A excentricidade dinâmica ocorre quando o centro de rotação ainda está em sua origem, enquanto o cilindro está deslocado. Já na excentricidade mista, ambos o cilindro e o centro de rotação estão deslocados de suas respectivas origens. A

Figura 21 ilustra os tipos de excentricidades que podem ocorrer.



**Figura 21: Diferentes tipos de excentricidade: a linha de fronteira é o anel interno do estator, o rotor está em cinza, as linhas tracejadas são a centralização do estator. (a) Sem excentricidade. (b) Excentricidade estática. (c) Excentricidade dinâmica. (d) Excentricidade mista.**

**Fonte: Bellini *et al*, 2008.**

A excentricidade do entreferro é uma das condições de falha mais comuns em uma máquina de indução. É interessante observar que existem interações entre as falhas. Uma excentricidade pode ser causada por muitos problemas, tal como um mau posicionamento do rolamento durante a montagem do motor, rolamentos desgastados, eixo do rotor inclinado ou operação em velocidade crítica.

A referida falha gera uma força no rotor que tenta empurrá-lo do núcleo do estator. Isso também causa de um desgaste excessivo da máquina e aumenta consideravelmente o desgaste do rolamento.

O padrão de excentricidade pode ser caracterizado com base na frequência das ranhuras, conforme equação (14). (SILVA, 2008; RABELO, 2012, BENBOUZID, 2000)

$$f_{ran} = f \left[ (kR \pm n_d) \left( \frac{1-s}{p/2} \right) \pm n_s \right] \quad (14)$$

onde:

$k$  é a ordem de excentricidade e igual a 1,2,3...;

$n_r$  é o número de barras do rotor;

$n_d = 0,1,2,3 \dots$  é a ordem do harmônico da excentricidade dinâmica;

$n_s = 1,3,5,7 \dots$  é a ordem do harmônico da excentricidade estática.

Para o caso em que  $n_d = 0$ , os valores de  $f_{ran}$  calculados, para cada  $n$  e  $n_s$ , são frequências características de excentricidade estática. A desvantagem desse modelo é a necessidade do conhecimento de aspectos construtivos da máquina, como o número de barras do rotor. Ainda, a severidade da excentricidade estática também pode ser avaliada monitorando-se a diferença entre a amplitude em  $dB$  da frequência fundamental e a maior amplitude em das frequências calculadas a partir dos harmônicos considerados. Já a severidade da excentricidade dinâmica pode ser avaliada monitorando-se a diferença da amplitude em  $dB$  da componente de frequência da excentricidade dinâmica em relação a componente de frequência de excentricidade estática. (SILVA, 2008)

Contudo, no escopo deste trabalho, as falhas de excentricidade são consideradas apenas teoricamente, visto que não foram realizados ensaios com o MIT submetido a tais falhas.

## 4 CONCEITOS DA ANÁLISE ESPECTRAL DE SINAIS

Este Capítulo visa abordar os principais conceitos pertinentes a teoria de processamento dos sinais, relacionado ao presente trabalho. Algumas das principais definições matemáticas são apresentadas, bem como o teorema da amostragem de um sinal e os aspectos fundamentais da transformada de Fourier, de sua definição no espaço contínuo ao discreto, passando por uma breve apresentação do cálculo da TDF.

### 4.1 TEOREMA DA AMOSTRAGEM

Para iniciar o assunto sobre amostragem, apresenta-se um pequeno trecho tratando o que é este conceito.

O teorema da amostragem é a ponte entre os mundos de tempo contínuo e de tempo discreto. A informação inerente em um sinal em tempo contínuo amostrado é equivalente à de um sinal em tempo discreto. Um sinal em tempo contínuo amostrado é uma sequência de impulsos, enquanto que um sinal em tempo discreto apresenta a mesma informação em uma sequência de números. Essas são basicamente duas formas de representar o mesmo dado. Claramente, todos os conceitos da análise de sinais amostrados se aplicam a sinais em tempo discreto. Não devemos ficar surpresos ao ver que o espectro de Fourier dos dois tipos de sinais é o mesmo. (LATHI, 2007, p. 678)

Um sinal cujo espectro é limitado em faixa  $B \text{ Hz}$  [ $X(\omega) = 0$  para  $|\omega| > 2\pi B$ ] pode ser reconstruído, sem qualquer erro, de suas amostras tomadas uniformemente a uma taxa de  $f_a > 2B$  amostras por segundo. Ou seja, a menor frequência de amostragem é  $f_a = 2B \text{ Hz}$ .

Considerando um sinal  $x(t)$ , cujo espectro seja limitado a  $B \text{ Hz}$ . A amostragem de  $x(t)$  em uma taxa de  $f_a$  amostras por segundo, pode ser feita multiplicando  $x(t)$  por um trem de impulsos  $\delta(t)$  constituídos por impulsos unitários periodicamente repetidos a cada  $T$  segundos, sendo  $T = 1/f_a$  (intervalo de amostragem). O  $n$ -ésimo pulso, localizado em  $t = nT$ , possui força  $x(nT)$ . (LATHI, 2007, p. 678). A equação (15) refere-se ao sinal amostrado resultante.

$$\bar{x}(t) = x(t)\delta_T(t) = \sum_n x(nT)\delta(t - nT) \quad (15)$$

Como o trem de impulso  $\delta(t)$  é um sinal periódico de período  $T$ , este pode ser representado por uma série trigonométrica de Fourier, equação (16).

$$\delta_T(t) = \frac{1}{T} [1 + 2 \cos \omega_a t + 2 \cos 2\omega_a t + 2 \cos 3\omega_a t + \dots] \quad (16)$$

Em que:

$$\omega_a = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_a$$

Logo,

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{T} [x(t) + 2x(t)\cos \omega_a t + 2x(t)\cos 2\omega_a t + 2x(t)\cos 3\omega_a t + \dots] \quad (17)$$

A transformada de Fourier de  $\bar{x}(t)$ , ou seja,  $\bar{X}(\omega)$ , pode ser obtida a partir da transformada de Fourier, termo a termo, do lado direito da equação (17). Logo,

$$\bar{X}(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(\omega - n\omega_a) \quad (18)$$

## 4.2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA TRANSFORMADA DE FOURIER

A Transformada de Fourier de uma função  $x = x(t)$  é definida pela equação (19) como segue:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (19)$$

onde  $X(\omega)$  é o sinal  $x(t)$  representado no domínio da frequência ( $\omega$ ),  $\omega = 2\pi f$  em que  $f$  é a frequência da sinal e o símbolo " $e$ " é a função exponencial. (LYONS, 1997, p.49).

### 4.2.1 Transformada Discreta de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) é uma operação fundamental no processamento digital de sinais, porém esta é complexa e, se calculada diretamente a partir de sua definição. A mesma exige um grande processamento computacional, que pode ser notado na quantidade de operações que são feitas ou até mesmo no tempo requerido para a resolução. Assim, será abordada a FFT do inglês *Fast Fourier Transform* ou Transformada Rápida de Fourier que se trata do algoritmo rápido de cálculo da transformada discreta de Fourier. O algoritmo FFT permite uma redução significativa no número de operações necessárias, bem



como o tempo de cálculo para a TDF. A utilização da FFT por esses motivos tem sido usada em uma larga escala no processamento digital de sinais e com ela é possível o processamento de informações em tempo real, no domínio da frequência, com vantagens sobre o processamento no domínio do tempo (ORTIGUEIRA, 2005).

No domínio de espaço discreto a expressão (19) recebe a denominação de Transformada Discreta de Fourier (TDF) é expressa pela equação (20). (LATHI, 2007, p. 705)

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N_a-1} x(n) e^{-jm(2\pi/N_a)n} \quad (20)$$

#### 4.2.2 A Transformada Rápida de Fourier

Um algoritmo desenvolvido por Cooley e Tukey em 1965, denominado transformada rápida de Fourier, reduziu drasticamente o número de cálculos necessários para executar a TDF. Esse algoritmo é o que torna a transformada de Fourier acessível ao processamento digital de sinais. (LATHI, 2007)

Escolhendo-se a quantidade de amostras  $N_a$  da janela de dados como sendo uma potência de 2, o algoritmos FFT é simplificado, conforme Equação (21, porém, tal escolha não é essencial.

$$N_a = 2^u \quad (21)$$

onde  $u$  é um número inteiro positivo.

Em situações que a quantidade de amostras adquiridas não coincide com a equação (21), complementa-se com valores nulos até a potência de 2 subsequente (LYONS, 1997, p.130).

Na ferramenta desenvolvida neste trabalho, a Transformada Rápida de Fourier é realizada pelo comando *fft* disponível no *software* Matlab.

## 5 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS

Este capítulo apresenta uma descrição da instrumentação e dos motores elétricos que compõem a bancada de ensaios, bem como apresenta uma explicação do funcionamento do conjunto.

Para a realização das aquisições de sinais do MIT submetido às diversas condições de falha, de desbalanceamento de tensão e torque que ele enfrentaria em ambiente industrial, foram utilizadas duas bancadas de ensaios com estruturas físicas similares, porém alocadas em diferentes espaços físicos. A bancada de ensaios do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) do Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação (CIPECA), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) de Cornélio Procópio, foi utilizada nos ensaios de falhas de rolamento. Por outro lado, os ensaios de falhas de estator e rotor foram realizados no Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas da Escola de Engenharia da USP de São Carlos. Em Goedtel (2007) é apresentada uma descrição detalhada dos aspectos quantitativos e qualitativos da bancada de testes. A descrição apresentada nas próximas linhas é referente a bancada do LSI.

O MIT pode ser submetido à diversos níveis de tensão nas três fases de sua alimentação, os quais são variados através de variadores de tensão, denominados variacs. Estes, por sua vez, estão diretamente ligados à rede, conforme pode ser visto na Figura 22.

Os sinais de corrente e tensão podem ser obtidos através de sensores *Hall*, os quais são mostrados na Figura 23, que mostra também o interior do painel utilizado na alimentação do MIT.



**Figura 22:** Variacs de tensão.



**Figura 23:** Sensores *Hall* de corrente e Tensão

A Figura 24 apresenta um MIT, que por sua vez é acoplado ao motor de corrente contínua, mostrado na Figura 25, o qual foi ligado como gerador e isto simula o conjugado no

eixo do motor de indução. Desse modo, conforme a tensão de campo do motor CC for variada o conjugado mecânico também é alterado, assim é possível obter diferentes situações de operação, desde o motor trabalhando numa situação com carga abaixo até acima da nominal.



**Figura 24: Motor de Indução trifásico**



**Figura 25: Motor de Corrente Contínua.**

A tensão de campo pode ser variada e a leitura de torque e velocidade é obtida através de um torquímetro Kistler, o qual pode ser observado na Figura 26. Os enrolamentos de armadura foram ligados a uma carga resistiva de valor igual a 28 Ohms, cuja função é a de dissipar a potência gerada durante os testes.



**Figura 26: Torquímetro Kistler.**

Os sinais obtidos pelos sensores *Hall* são enviados para a placa de aquisição NI USB 6221 da *Texas Instruments*, apresentada na Figura 27, a qual dispõe de 16 entradas analógicas e permite a comunicação com o computador por meio de cabo USB. Com auxílio do *software* Matlab, foi possível ler, manipular e gerar as curvas dos sinais adquiridos.



**Figura 27: Placa de aquisição.**

A Figura 28, mostra a bancada por inteiro, com os motores de indução e de corrente contínua acoplados pelo torquímetro.



**Figura 28: Bancada dos motores.**

A Figura 29, é uma visão externa do painel utilizado no comando da bancada e da carga resistiva.



**Figura 29 – Painel de comando e carga resistiva.**

Uma descrição detalhada da bancada utilizada nos ensaios realizados no laboratório da USP também pode ser consultada em Suetake (2012).

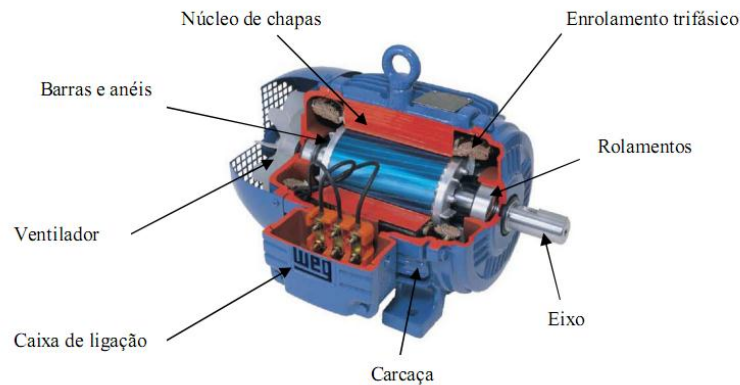
### 5.1 O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Nesse motor, as correntes que circulam no rotor são geradas pela tensão induzida através do fluxo magnético do entreferro originado pelas correntes circulando no estator. Não existe conexão elétrica direta entre o circuito de alimentação e o circuito secundário e este aspecto implica num dos pontos da sua redução de custos.

A maioria dos motores de indução usa o rotor gaiola de esquilo no secundário, pois este tipo é o de menor custo e mais robusto. Este rotor não requer anéis coletores e não tem escovas que se desgastam. Motores polifásicos, algumas vezes utilizam rotores bobinados, com anéis coletores e escovas. Esse conjunto permite controle de velocidade e torque pelo uso de reostato externo para aplicações especiais.

No caso do rotor gaiola de esquilo o enrolamento consiste de condutores individuais em cada uma das ranhuras do pacote do rotor, os quais são curto-circuitados em cada extremidade do eixo do rotor por um anel condutor. Esses condutores podem ser de cobre, latão ou metal, alumínio ou qualquer material condutor (VEINOTT, 1959).

A Figura 30 mostra alguns elementos de um motor de indução trifásico com rotor do tipo gaiola de esquilo.



**Figura 30: Motor de indução trifásico com rotor do tipo gaiola de esquilo.**

**Fonte: WEG (2008).**

### 5.1.1 Aspectos quantitativos do MIT

Esta secção apresenta os aspectos quantitativos do MIT, pois os mesmos são levados em consideração no cálculo das frequências características de falhas e, portanto, no algoritmo da ferramenta desenvolvida neste trabalho.

Quando a excitação é feita por uma fonte polifásica equilibrada, um campo magnético é produzido no entreferro girando na velocidade síncrona. A velocidade síncrona é determinada, conforme a equação (24) (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

$$\omega_s = \left(\frac{2}{p}\right) f \quad (22)$$

onde:

$\omega_s$  é a velocidade síncrona do campo do estator em *Hertz (Hz)*;

$p$  é o número de polos;

$f$  é a frequência de alimentação em *Hz*.

Supondo que o rotor esteja girando na velocidade constante de  $f_r$  no mesmo sentido que o campo girante do estator, a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor é comumente chamada escorregamento do rotor, conforme Equação (23).

$$s = \omega_s - f_r \quad (23)$$

onde:

$s$  é o escorregamento do rotor em  $Hz$ ;

$f_r$  é a velocidade do eixo em  $Hz$ ;

O escorregamento é usualmente expresso como sendo uma fração da velocidade síncrona. O escorregamento fracionário  $s$  em  $p.u$  é definido pela equação (24).

$$s = \frac{v_s - f_r}{v_s} \quad (24)$$

O movimento relativo entre o fluxo do estator e os condutores do rotor induz tensões de frequência  $f_s$  dada pela equação (25).

$$f_s = sf \quad (25)$$

onde  $f_s$  é a frequência de escorregamento.

A equação (26) define a velocidade do rotor  $f_r$  em  $Hz$  e pode ser deduzida a partir das equações (22) e (24).

$$f_r = f \left( \frac{1-s}{p/2} \right) \quad (26)$$

A Tabela 5 apresenta algumas velocidades síncronas em  $rpm$  para as frequências usuais de  $60 Hz$  e  $50Hz$  e alguns números de polos  $p$ .

**Tabela 5: Velocidade síncrona para frequências usuais.**

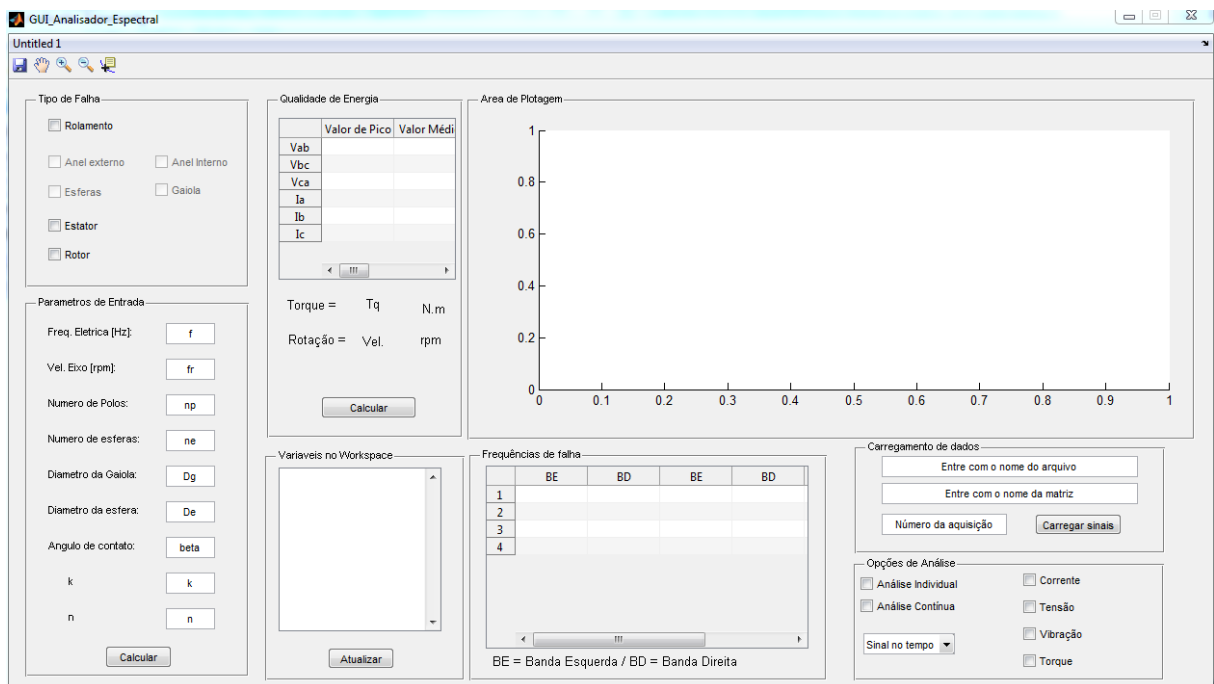
Número de polos $p$	Velocidade síncrona em $rpm$	
	$f = 60 Hz$	$f = 50 Hz$
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750

**Fonte: Autoria própria.**

## 6 A FERRAMENTA PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Este capítulo apresenta a principal contribuição deste trabalho que é a ferramenta para a detecção e o diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos a partir da análise espectral de sinais de corrente.

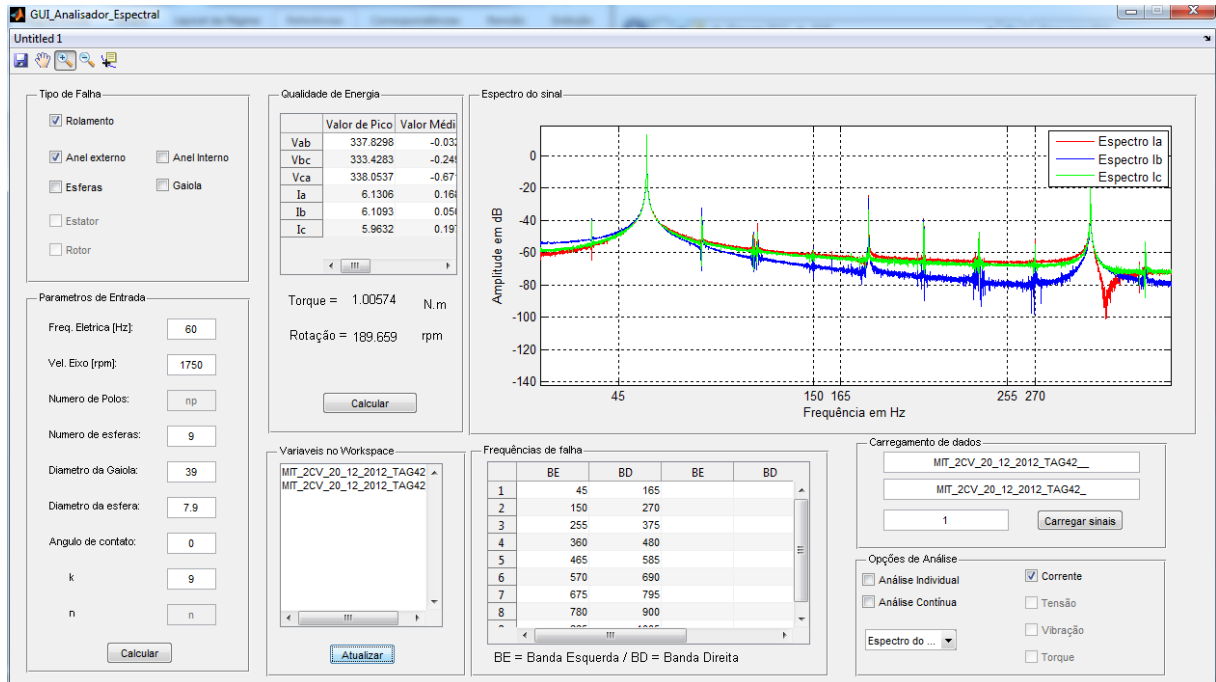
A ferramenta possui módulos de entrada de dados e apresentação dos resultados para o usuário, os quais são: Tipo de Falha, Parâmetros de Entrada, Qualidade de Energia, Variáveis no *Workspace*, Frequências de Falha, Área de Plotagem e Carregamento de Dados. A Figura 31 apresenta a GUI (*Graphical User Interface*) Analisador Espectral de Sinais, tal como ela é apresentada ao usuário após a inicialização.



**Figura 31: GUI – Analisador Espectral de Sinais**

A Figura 32 apresenta a GUI Analisador Espectral de Sinais em execução, exemplificando uma análise espectral de sinais de corrente, com as frequências características de falha sendo exibidas e alguns parâmetros relacionados à qualidade de energia.

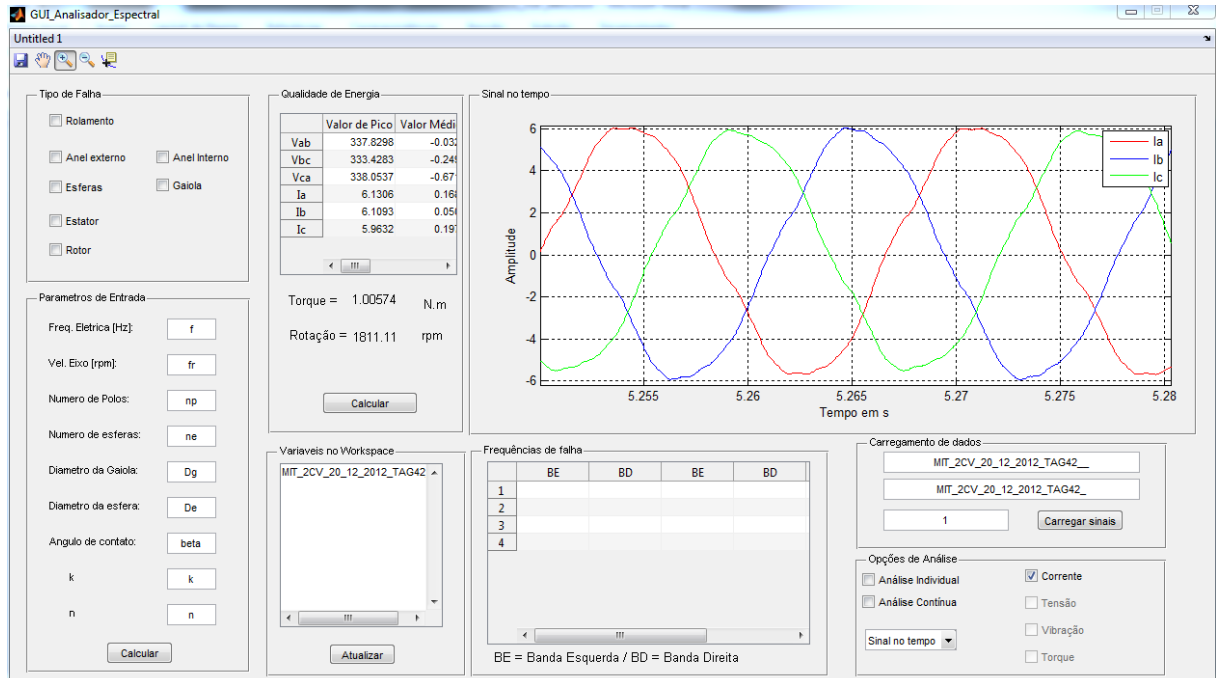




**Figura 32: Analisador Espectral de Sinais – Análise no domínio da frequência.**

Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 apresenta um exemplo da interface sendo utilizada na análise de sinais no domínio do tempo.



**Figura 33: Analisador Espectral de Sinais – Análise no domínio do tempo.**

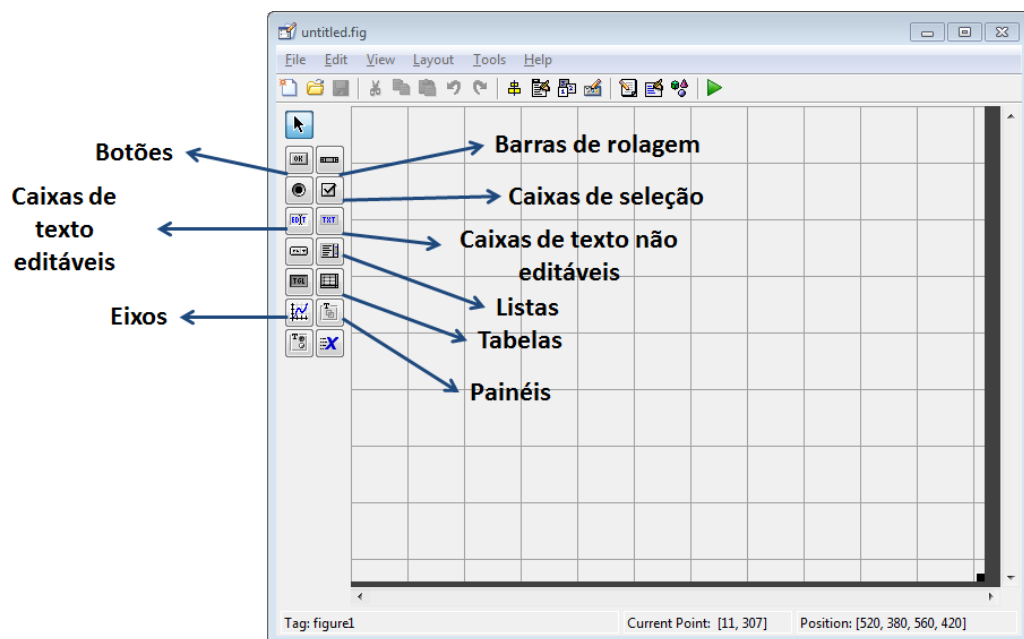
Fonte: Autoria própria.

A GUI desenvolvida consiste numa ferramenta para detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos. O usuário pode escolher qual tipo de falha deseja analisar, calcular frequências características de falha, para diferentes dimensões de um rolamento de

uma carreira de esferas, várias condições de rotação e diferentes números de polos. Também tem a opção de analisar os sinais no domínio do tempo, permitindo avaliar se há distúrbios na tensão de alimentação. A partir das informações provenientes das análises, pode-se determinar a severidade da falha, as condições da alimentação do motor, a velocidade de operação e a condição de torque.

## 6.1 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DA FERRAMENTA

A ferramenta foi projetada, implementada e desenvolvida no ambiente Guide do Matlab, utilizando-se os recursos disponíveis no mesmo, o qual conta com botões, caixas de seleção, caixas de texto editáveis, caixas de texto não editáveis, barras de rolagem, listas, tabelas, painéis, eixos, entre outros. A Figura 34 apresenta o ambiente Guide e alguns dos recursos disponíveis para o projeto de interfaces gráficas com o usuário.



**Figura 34: Ambiente Guide.**

**Fonte: Autoria própria.**

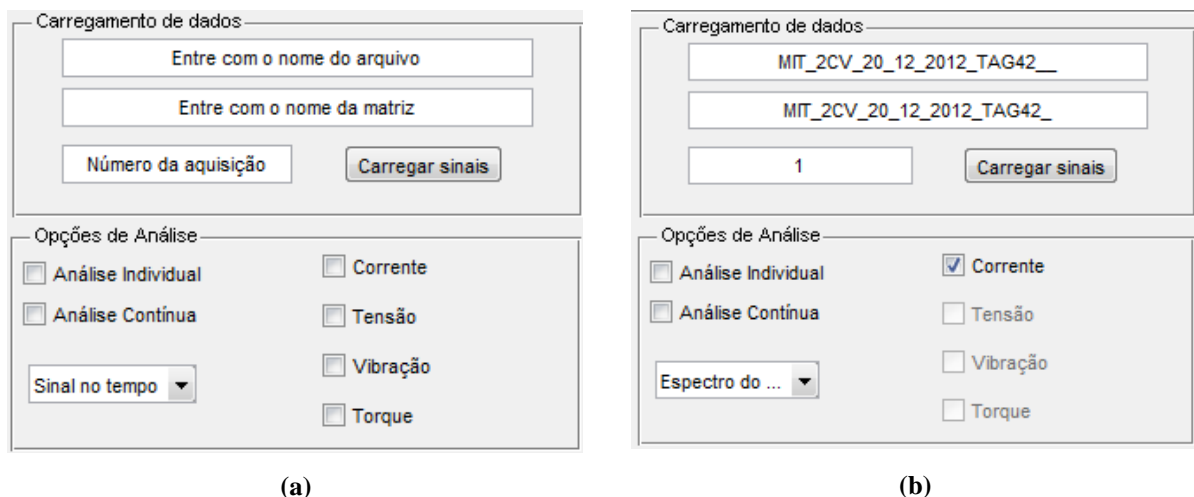
Para cada elemento adicionado a este ambiente, é criada automaticamente uma função do Matlab, onde um código deve ser inserido. Este código será executado quando o usuário executar algum dos elementos presentes na interface.

A apresentação e explicação da utilização e funcionamento da ferramenta desenvolvida no Matlab para cada um dos módulos ou etapas práticas que o usuário deve seguir para realizar a análise desejada são apresentadas nas seções seguintes.

## 6.2 CARREGAMENTO DE DADOS

Ao inicializar o Analisador Espectral, no módulo ‘Carregamento de dados’, como mostra a Figura 35 (a), o usuário deverá entrar com o nome da aquisição, o nome da matriz atribuídos no momento da aquisição dos sinais e o número da aquisição que deseja analisar. Depois de preenchidos os campos, basta clicar no botão ‘Carregar sinais’. Esta ação carrega o a aquisição que deve estar na pasta de trabalho do Matlab.

O próximo passo consiste na seleção do sinal de interesse e a escolha do tipo de plotagem ‘Sinal no tempo’ ou ‘Espectro do sinal’ que são exibidos numa lista suspensa. A Figura 35 (b) exemplifica o carregamento de uma aquisição. Aqui o usuário optou por analisar o espectro do sinal de corrente. Automaticamente, os espectros dos sinais de corrente trifásicos serão exibidos na área de plotagem. As opções de análise ‘Individual’ e ‘Contínua’ não estão implementadas e podem ser desenvolvidas em futuros trabalhos.

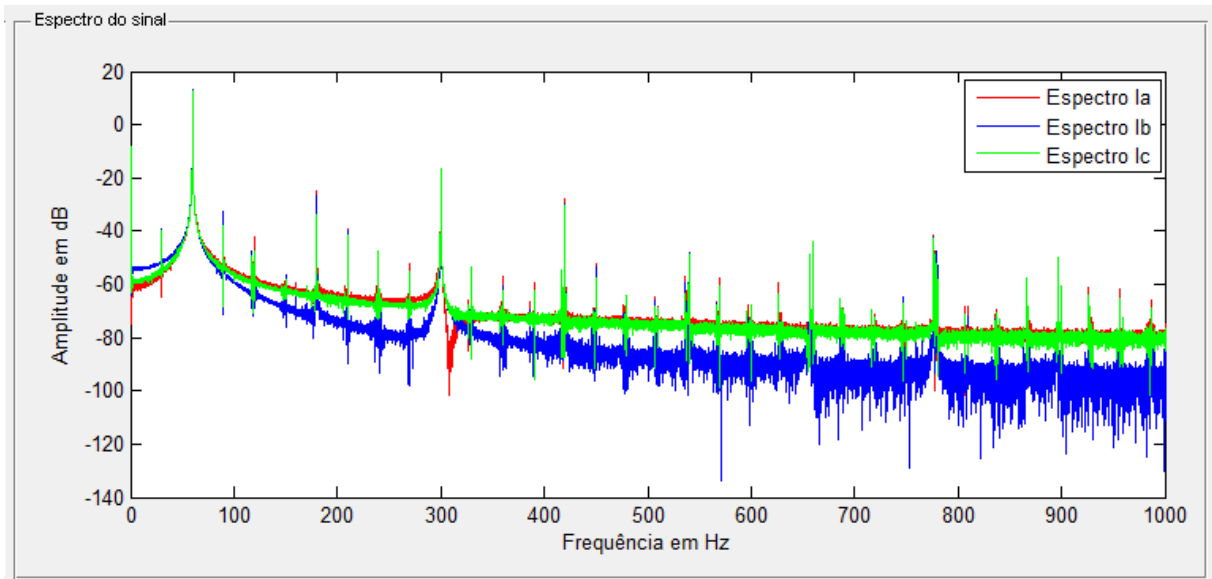


**Figura 35: Módulo Carregamento de dados. (a) Modo padrão. (b) Exemplo de seleção de dados.**

Em resumo, as combinações possíveis são: Análise de correntes trifásicas, das tensões trifásicas, torque e vibração no tempo, espectros dos sinais de corrente, tensão e vibração.

## 6.3 ÁREA DE PLOTAGEM

Conforme a escolha de análise do usuário, a figura é exibida na área de plotagem como mostra a Figura 36. No caso da figura, a opção do usuário foi ‘Espectro do sinal’.



**Figura 36: Área de plotagem.**

Caso o usuário tenha calculado as frequências de falha no módulo ‘Parâmetros de entrada’, elas serão destacadas no espectro, caso contrário, o espectro será visualizado como na Figura 36.

#### 6.4 QUALIDADE DE ENERGIA

Uma breve descrição dos aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica também é apresentada no módulo ‘Qualidade de Energia’ como pode ser visto na Figura 37. Uma vez carregados os sinais, conforme apresentado na seção 6.2, clicando no botão ‘Calcular’ deste módulo, o valor de pico, valor médio, valor eficaz de linha, valor eficaz de fase para as tensões  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  e correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  são calculados e exibidos na tabela. O desequilíbrio de tensão também é apresentado ao usuário.

Neste módulo os valores de torque aplicado ao motor de indução e velocidade do eixo são apresentados logo abaixo da tabela.



habilitado, enquanto os demais tipos de falha serão desabilitados. De forma análoga, se o usuário habilitar 'Rotor', as demais caixas de seleção serão desabilitadas.

O usuário também tem a opção de habilitar apenas os defeitos localizados, cujas frequências de falha características deseja visualizar no espectro. Dessa forma, se o usuário habilitar a caixa de seleção 'Anel externo', ele visualizará no espectro apenas as frequências características deste tipo de defeito localizado. Não é permitida ao usuário a análise de falhas de rolamento, rotor e estator simultaneamente.

## 6.6 PARÂMETROS DE ENTRADA

Após a seleção do tipo de falha que será analisado, o usuário fornece os parâmetros de entrada, para o cálculo das frequências de falha do defeito selecionado. A Figura 39 mostra este módulo para o caso em que o usuário optou por analisar falha de rolamento e isto explica as caixas inativas na mesma.

Parâmetros de Entrada	
Freq. Elétrica [Hz]:	60
Vel. Eixo [rpm]:	1750
Número de Polos:	np
Número de esferas:	9
Diâmetro da Gaiola:	39
Diâmetro da esfera:	7.9
Ângulo de contato:	0
k	9
n	n
<input type="button" value="Calcular"/>	

**Figura 39: Módulo Parâmetros de Entrada.**

Tem-se como exemplo da aplicabilidade do módulo, a falha de rolamento. Caso o usuário deseje analisar este tipo de falha, inicialmente o mesmo terá habilitado a caixa de seleção 'Rolamento'. Ao executar esta ação, as caixas de texto que recebem os parâmetros de entrada, não relacionadas ao defeito habilitado, serão desabilitadas. Apenas as caixas de texto

relacionadas ao tipo de falha em análise, permanecerão habilitadas. Isso evita, por exemplo, que o usuário forneça o número de polos do motor, um parâmetro de entrada desnecessário para o cálculo das frequências características de falha de rolamento, cujos modelos foram apresentados no item 3.3.1.1.

Assim que o usuário fornecer todos os parâmetros de entrada do tipo de falha em análise, pressionando-se o botão ‘Calcular’ deste módulo, o algoritmo executa o cálculo das frequências características e exporta os valores para a tabela denominada ‘Frequências de falha’.

A Tabela 6 apresenta um resumo dos parâmetros de entrada que o usuário deve fornecer para cada tipo de defeito que será analisado.

**Tabela 6: Parâmetros de entrada necessários por tipo de defeito no motor.**

Defeito	Parâmetros de entrada								
	$f$	$f_r$	$n_p$	$N_b$	$D_c$	$D_b$	$\beta$	$k$	$n$
Rolamento	S	S	N	S	S	S	S	S	N
Estator	S	S	S	N	N	N	N	S	S
Rotor	S	S	S	N	N	N	N	S	N

Fonte: Autoria própria.

onde:

S significa que é necessário o parâmetro para o tipo de falha;

N significa que não é necessário o parâmetro para o tipo de falha.

## 6.7 MÓDULO ‘FREQUÊNCIAS DE FALHA’

A Figura 40 mostra o módulo ‘Frequências de falha’, o qual é uma matriz que receberá todas as frequências características de falha calculadas quando o botão ‘Calcular’ deste módulo for executado.

Frequências de falha				
	BE	BD	BE	BD
1				
2				
3				
4				

BE = Banda Esquerda / BD = Banda Direita

Frequências de falha				
	BE	BD	BE	BD
1	45	165		
2	150	270		
3	255	375		
4	360	480		
5	465	585		
6	570	690		
7	675	795		
8	780	900		

BE = Banda Esquerda / BD = Banda Direita

(a)

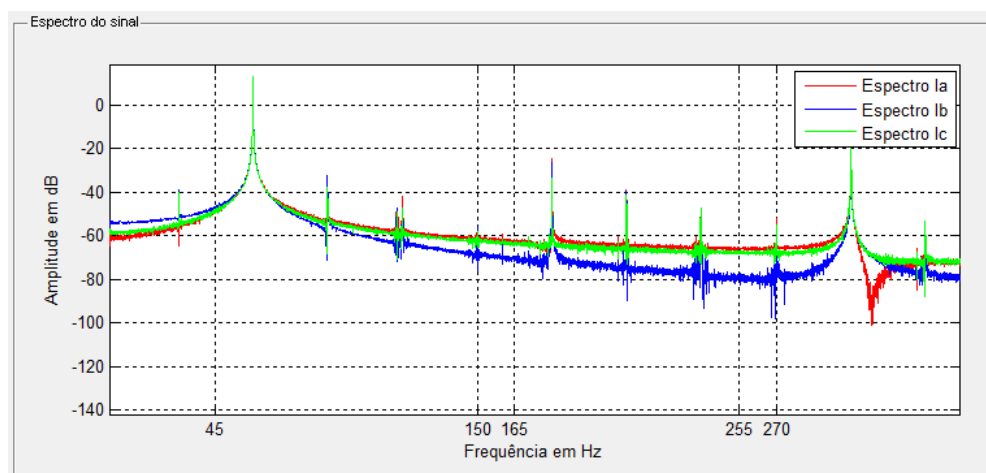
(b)

**Figura 40: Módulo ‘Frequências de falha’: (a) Padrão. (b) Exemplo.**

Apenas a matriz de frequências da falha em análise é enviada e exibida neste módulo. Se o usuário optar por analisar apenas defeitos localizados no anel externo, como é o caso da Figura 31, apenas as frequências associadas a este tipo de defeito serão enviadas para a matriz. As bandas laterais a esquerda da frequência de falha, ficam dispostas na coluna da esquerda, enquanto que as bandas laterais a direita da frequência de falha ficam dispostas na coluna da direita.

Outro ponto importante em relação a disposição dos valores de frequências na matriz é o fato desta ser dependente do tipo de falha que está sendo analisado. No caso de análise de falhas de curto-circuito, a matriz de frequências de falha será da seguinte ordem:  $n$  linhas  $\times$   $2k$  colunas, onde  $n$  e  $k$  são os parâmetros da Equação (4) e no caso de análise de falha de barras quebradas será  $k$  linhas  $\times$   $2$  colunas, onde  $k$  é o parâmetro da equação (5). Já em relação a matriz de frequências de falha de rolamento, esta terá  $k$  linhas  $\times$   $8$  colunas.

A Figura 41 apresenta um exemplo de espectro de corrente na área de plotagem, com algumas das frequências características de falha no anel externo apresentadas na Figura 40 (b).



**Figura 41: Espectros dos sinais de corrente com as frequências de falha em destaque.**



## 6.8 MÓDULO ‘VARIÁVEIS NO WORKSPACE’

A Figura 42 apresenta o módulo ‘Variáveis no Workspace’. Este módulo se trata de uma lista das variáveis existentes na área de trabalho do Matlab. Caso sejam criadas ou excluídas variáveis, durante a execução da GUI, o botão “Atualizar”, a lista de variáveis será atualizada automaticamente.



**Figura 42:** Módulo ‘Variáveis no Workspace’: (a) Nenhuma variável no workspace do Matlab. (b) Variáveis no workspace do Matlab.

## 7 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos, a partir da utilização da ferramenta para detecção e diagnóstico de falhas, para cada um dos tipos de falhas inseridos em laboratório. Serão analisados os espectros de corrente do MIT submetido a falhas de estator ou curto-circuito, falha de rotor e falhas de rolamento.

### 7.1 ENSAIO DE FALHA NO ENROLAMENTO DO ESTATOR: CURTO-CIRCUITO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise espectral dos sinais de corrente para os quatro casos de curto-circuito ensaiados em laboratório. As frequências características de curto-circuito serão destacadas nos espectros de corrente, permitindo a identificação da falha. Os ensaios de falha de curto-circuito foram realizados no Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas da Escola de Engenharia de São Carlos.

#### 7.1.1 Caso 1: Curto-circuito entre espiras de uma mesma bobina – Combinação 1

O motor de indução utilizado nos ensaios de curto-circuito, tal como o procedimento de inserção de falha foram descritos na seção 3.1 deste trabalho. A Tabela 7 resume todas as condições de tensão de alimentação, impostas nos ensaios. Essas condições da tensão de alimentação foram combinadas com as condições de carga resumidas pela Tabela 8.

**Tabela 7: Condições aplicadas nos ensaios de curto-circuito. (continua)**

<i>Tensão de alimentação</i>			
<i>Condição</i>	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>
<i>V1</i>	127,0	127,0	127,0
<i>V2</i>	124,5	127,0	127,0

**Tabela 6: Condições aplicadas nos ensaios de curto-circuito. (conclusão)**

<i>Tensão de alimentação</i>			
<i>Condição</i>	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>
V3	121,9	127,0	127,0
V4	119,4	127,0	127,0
V5	116,8	127,0	127,0
V6	114,3	127,0	127,0
V7	127,0	129,5	124,5
V8	127,0	132,1	121,9
V9	127,0	134,6	119,4
V10	127,0	135,9	118,1

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 8 resume as condições de torque, às quais o MIT utilizado no ensaio de curto-circuito, foi submetido. A primeira condição de torque igual a 0,5 N.m é referente a condição de operação à vazio.

**Tabela 8: Condições de Torque aplicadas nos ensaios de curto-circuito.**

<i>Conjugados aplicados</i>					
T1	T2	T3	T4	T5	T6
0,5 Nm	1 Nm	2 Nm	3 Nm	4 Nm	5 Nm

Fonte: Autoria própria.

Para cada uma das condições de tensão da Tabela 7, foi aplicada uma condição de carga da Tabela 8, totalizando 60 ensaios para cada tipo de falha de curto-circuito empregada nos experimentos.

A Tabela 9 apresenta os valores das frequências características de curto-circuito calculadas conforme o modelo de falha da Equação (4). Os dados de placa do MIT utilizado no ensaio foram apresentados na Tabela 2. A condição de alimentação do MIT é 127 V de tensão nas três fases e condição de carga à vazio, ou seja, torque em 0,5 N.m

**Tabela 9: Frequências de falha de curto-circuito para  $k = 1$  e  $n = 1$  a  $n = 5$ .**

$k = 1$		
	$fccbe$	$fccbd$
$n = 1$	31,3	88,7
$n = 2$	2,7	117,3
$n = 3$	26,0	146,0
$n = 4$	54,7	174,7
$n = 5$	83,3	203,3

Fonte: Autoria própria.

onde:

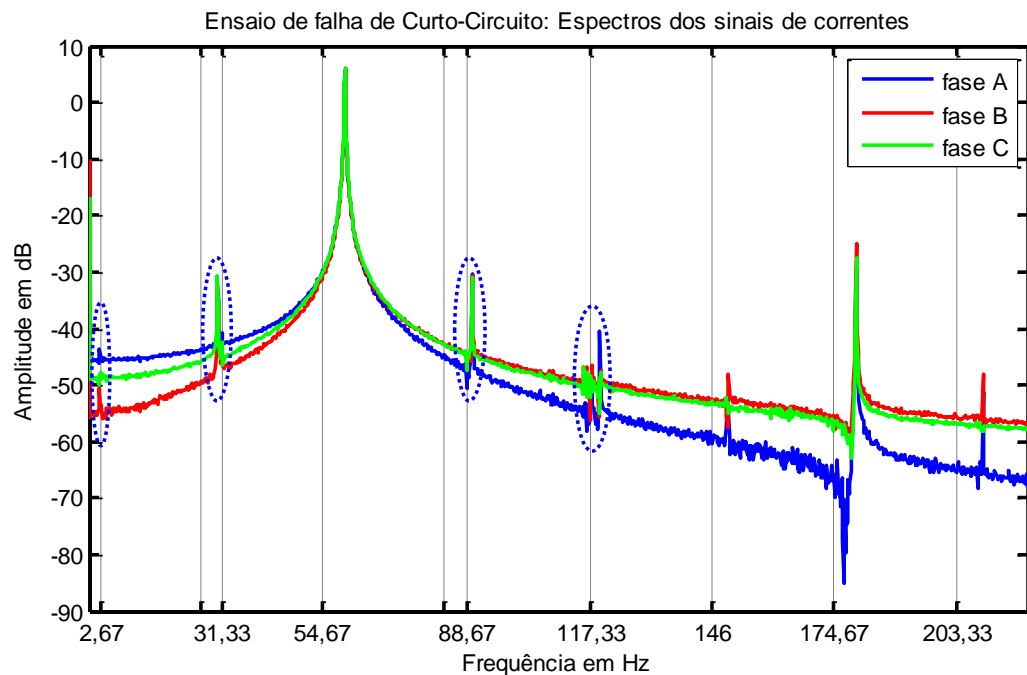
$fccbe$  é a banda lateral esquerda da frequência de curto-circuito;

$fccbd$  é a banda lateral direita da frequência de curto-circuito;

$n$  e  $k$  são os parâmetros do modelo de falha de curto-circuito.

Como comentado na seção 3.1.1, em Baccarini (2005), para análise de frequências características no espectro de corrente de falha de curto-circuito, as componentes  $k = 1$  e  $n = 3$  e  $k = 1$  e  $n = 5$  devem ser avaliadas. No espectro de corrente da Figura 43 está evidente a presença de tais frequências, as quais comprovam a existência da falha no motor. Para outros valores de  $k$  e  $n$  as frequências também aparecem, com amplitudes que se sobressaem e podem ser identificadas analisando-se o espectro.

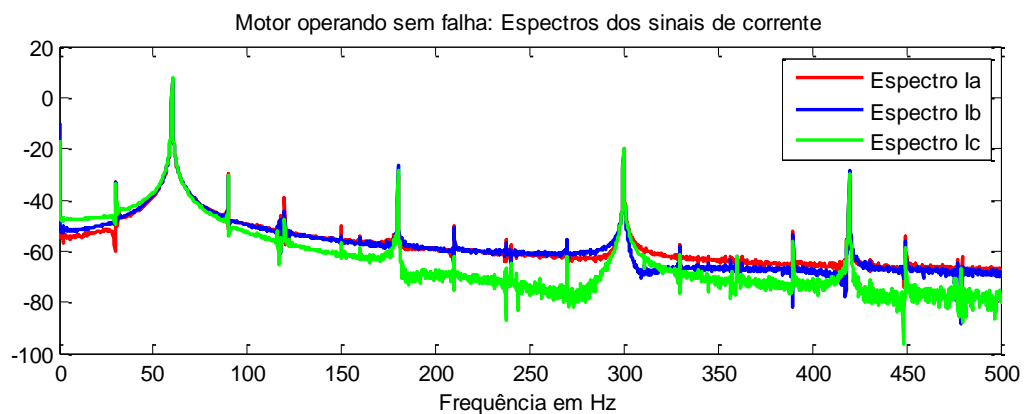
A Figura 43 mostra os espectros dos sinais de corrente nas três fases do MIT. As frequências calculadas estão na Tabela 9 e destacadas na figura pelas linhas verticais. As frequências de falha cujas amplitudes sobressaem no espectro são destacadas pelas elipses.



**Figura 43:** Espectros dos sinais de corrente do MIT submetido a curto-circuito. Tensões balanceadas e sem imposição de carga.

**Fonte:** Autoria própria.

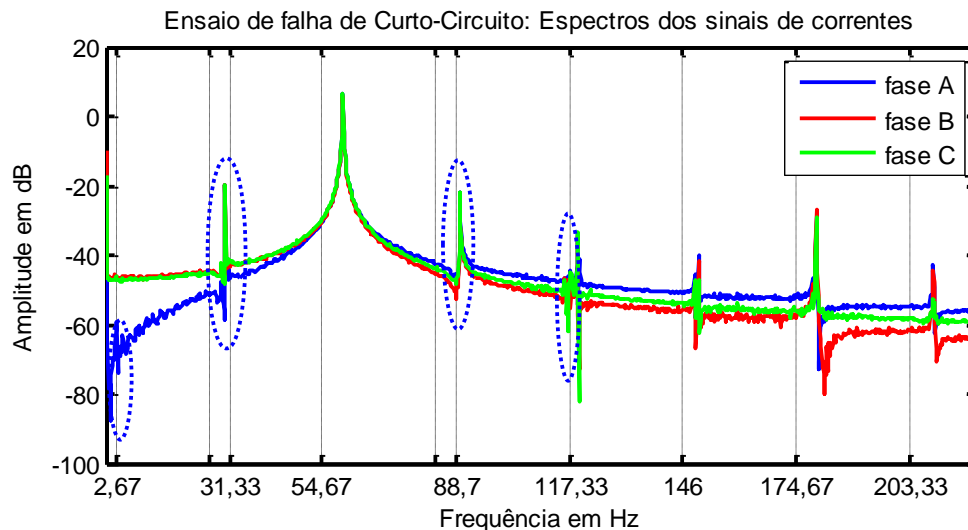
A Figura 44 apresenta os espectros de corrente do MIT operando sem falha e condição de carga à vazio. Observam-se nos espectros dos sinais de correntes que as mesmas componentes de frequência da Figura 43 estão presentes. Contudo, os espectros para o MIT operando em condições sem falha não foram comparados com os espectros do MIT operando sob as condições de falha relatadas neste trabalho. Uma averiguação das amplitudes de ambos os espectros fica como proposta para trabalhos futuros relacionados à identificação de falhas em máquinas elétricas, com a utilização da ferramenta proposta neste trabalho.



**Figura 44:** Espectros dos sinais de corrente do MIT operando sem falha e à vazio.

**Fonte:** Autoria própria.

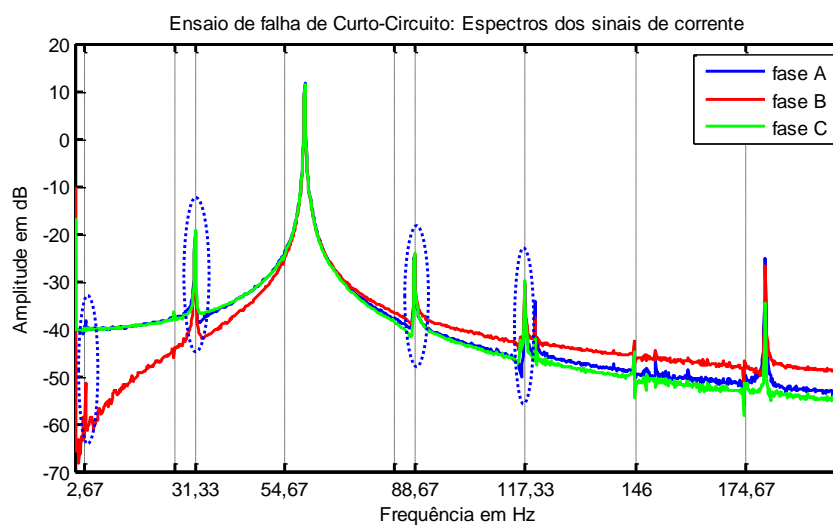
A Figura 45 representa os espectros de corrente das três fases, sobrepostos, para a mesma condição de tensão da análise anterior, porém com imposição de 1 N.m de carga no eixo no MIT. As frequências de curto-circuito também são as mesmas compiladas pela Tabela 9 e destacadas pelas elipses. Observa-se que a amplitude das frequências de falha aumentaram com a imposição de carga de 1 N.m, ou seja, a diferença entre a amplitude da frequência de falha e a amplitude da frequência fundamental diminuiu.



**Figura 45:** Espectros dos sinais de corrente do MIT submetido a curto-circuito. Tensões balanceadas e torque de 1 N.m.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 46 apresenta os sinais de corrente do MIT, nas três fases, com tensões balanceadas e imposição de carga de 5 N.m, ou seja, acima do nominal. As frequências de falha, conforme Tabela 9, são destacadas no espectro.



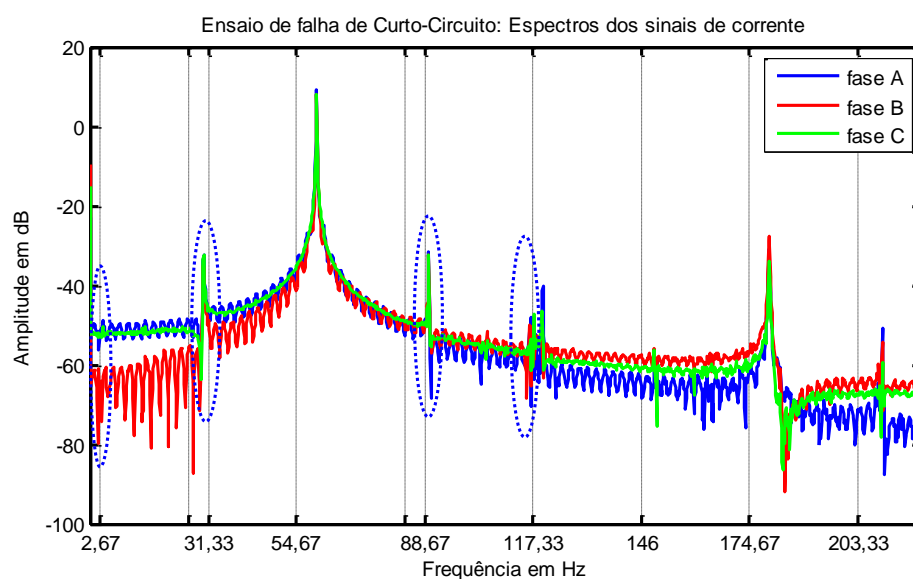
**Figura 46:** Espectros dos sinais de corrente do MIT submetido a curto-circuito. Tensões balanceadas e torque de 5 N.m.

Fonte: Autoria própria.

A velocidade de rotação do eixo em rotações por minuto (rpm) considerada, é a nominal, ou seja 1720 rpm. Este é um dos parâmetros de entrada para cálculo das frequências de curto-circuito, visto que para cálculo do escorregamento presente no modelo apresentado na Equação (4) necessita-se o conhecimento desta variável. Contudo, durante os ensaios não foram realizadas aquisições da velocidade de operação do motor e isto implica no não conhecimento do valor exato dessa grandeza. Conseqüentemente, essa imprecisão é transferida para o valor das frequências características de falha calculadas. Apesar disso, a partir da análise dos espectros, pode-se inferir certa proximidade, para algumas frequências, ou a imprecisão, para outras, entre aquelas calculadas e as que se sobressaem no espectro. Pode-se destacar, desta forma, uma das limitações do método, pois há a necessidade do monitoramento da velocidade no eixo da máquina para o cálculo das frequências características de falhas.

#### 7.1.2 Caso 2: Curto-circuito entre espiras de uma mesma bobina – Combinação 2

A Figura 47 exibe os espectros dos sinais de corrente, para uma alimentação de tensão balanceada em 127 V nas três fases e sem imposição de carga. As mesmas frequências de falha de curto-circuito consideradas na seção 7.1.1 também estão sendo analisadas neste caso.



**Figura 47:** Espectros dos sinais de corrente do MIT submetido a curto-circuito. Tensões balanceadas e condição de carga à vazio.

**Fonte:** Autoria própria.

Destacam-se na Figura 47 as componentes 31,33 Hz e 88,67 Hz que são referentes a  $k = 1$  e  $n = 1$ .

## 7.2 ENSAIO DE FALHA DE ROTOR: BARRAS QUEBRADAS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise espectral dos sinais de corrente para os três dos quatro casos de falha no rotor ensaiados em laboratório. Tanto os tipos de falha de barras quebradas quanto os ensaios realizados, estão divididos em quatro grupos, os quais são: Rotor com uma barra quebrada, rotor com duas barras quebradas consecutivas, rotor com quatro barras quebradas consecutivas e rotor com quatro barras quebradas dispostas da seguinte forma: duas barras quebradas consecutivas e duas barras quebradas consecutivas diametralmente opostas. As frequências características de barras quebradas, obtidas pelo uso da interface gráfica, serão destacadas nos espectros de corrente, permitindo a identificação da falha.

### 7.2.1 Caso 1: Uma barra quebrada

O primeiro caso a ser tratado é o rotor com apenas uma barra quebrada. O intuito dessa seção é apresentar alguns espectros de corrente com as frequências características de falhas identificadas para este tipo de defeito. As frequências características de falha de barras quebradas são calculadas conforme modelo da Equação (5). A diferença entre a amplitude da fundamental e a amplitude de  $2f_s$ , conforme Tabela 3, também será monitorada, a fim de determinar a severidade da falha.

A Tabela 10 mostra as frequências características de barras quebradas calculadas para  $k = 1$  a  $k = 11$ .



**Tabela 10:** Frequências características de falha de barras quebradas calculadas para  $k=1$  a  $k=11$ .

	<i>fbbbe</i>	<i>fbbsd</i>
$k = 1$	26,00	31,33
$k = 3$	83,33	88,67
$k = 5$	140,67	146,00
$k = 7$	198,00	203,33
$k = 9$	255,33	260,67
$k = 11$	312,67	318,00

Fonte: Autoria própria.

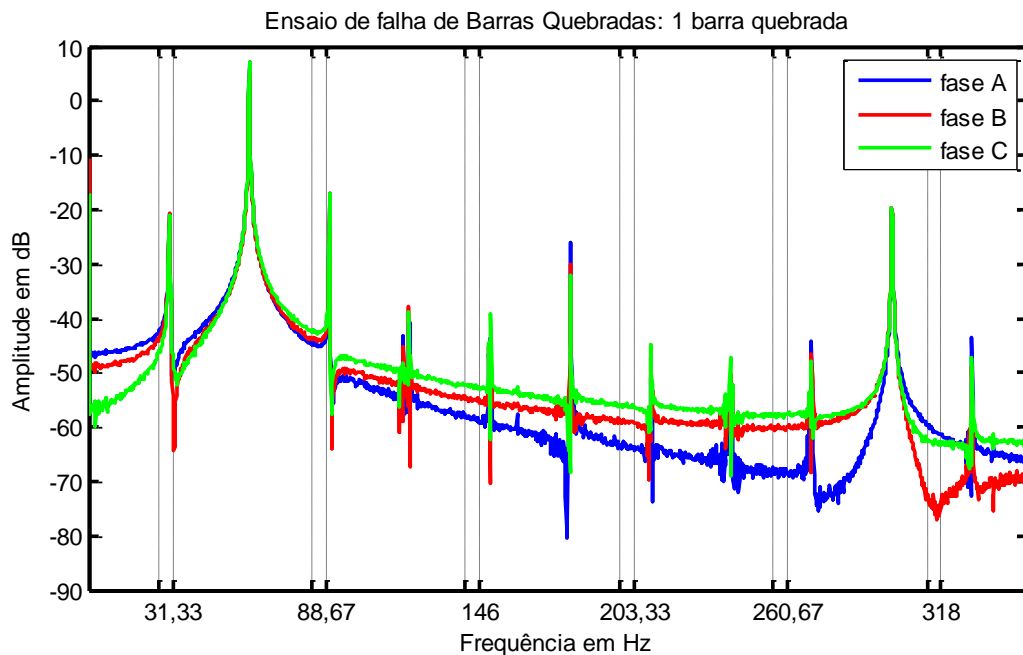
onde:

*fbbbe* é a banda lateral esquerda da frequência característica de barra quebrada;

*fbbsd* é a banda lateral direita da frequência característica de barra quebrada;

$k$  é o parâmetro do modelo de falha de barra quebrada.

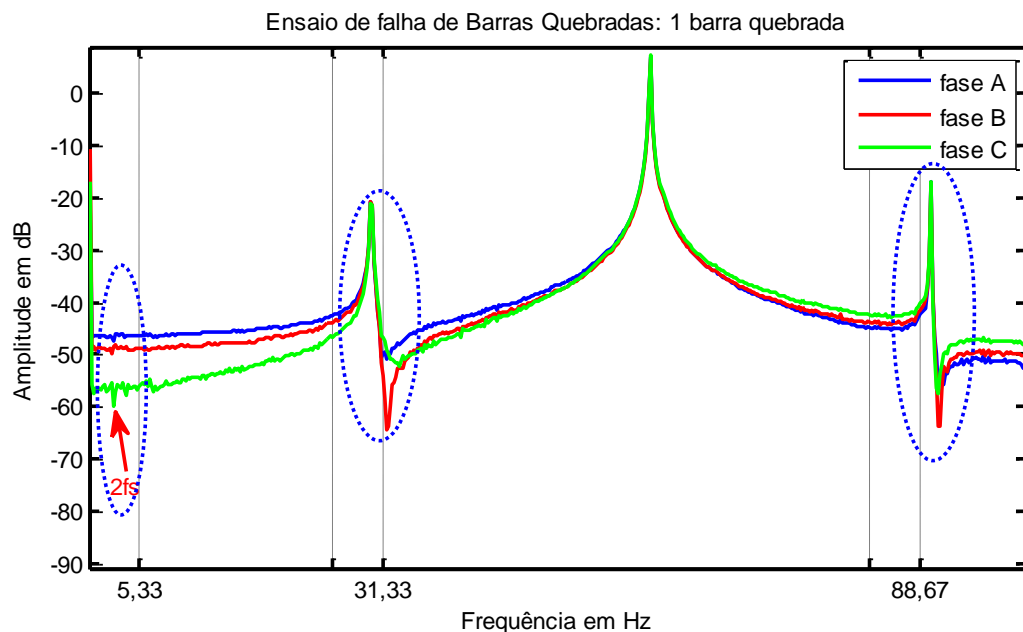
A Figura 48 mostra os espectros de correntes para o MIT operando nesta condição de falha, com tensões de alimentação balanceadas e condição de carga à vazio. Parte das frequências características da Tabela 10 está destacada.



**Figura 48:** Espectros de corrente para o rotor com uma barra quebrada e condição de carga à vazio. Parte das frequências características da Tabela 10 está destacada na figura.

Fonte: Autoria própria.

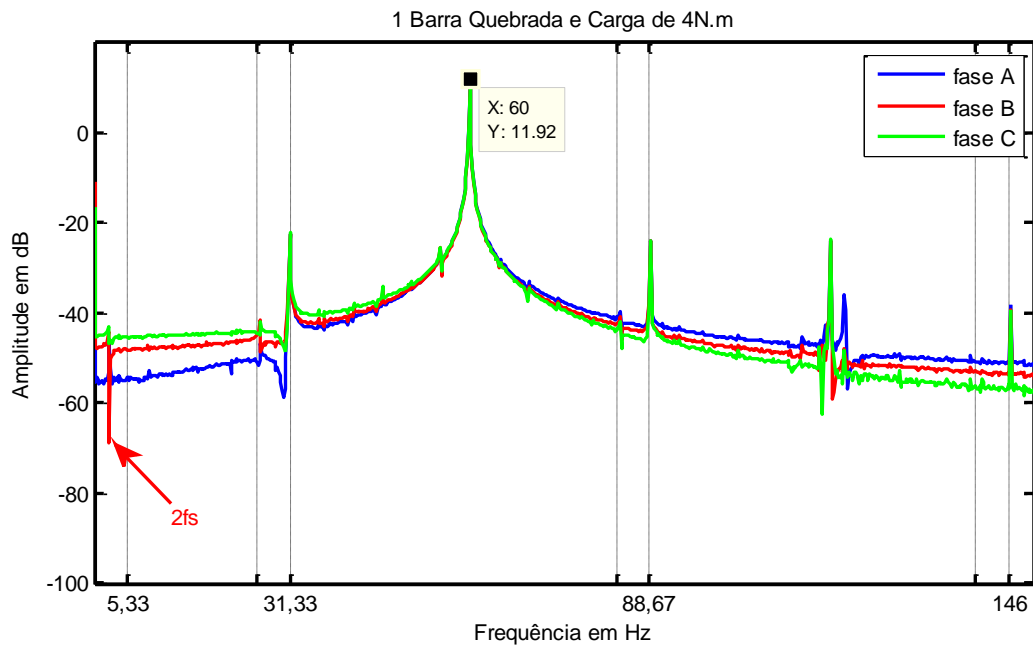
A Figura 49 mostra os mesmos espectros de corrente da Figura 48. Contudo, a componente de frequência de duas vezes a frequência de escorregamento do motor, também está identificada na figura. A componente  $f_s$  foi calculada em  $2,667 \text{ Hz}$ . Logo, a componente  $2f_s$  é calculada em  $5,33 \text{ Hz}$ . A seta vermelha na Figura 49 aponta para esta componente cuja amplitude está em torno de  $-56,8 \text{ dB}$ . A amplitude da componente fundamental está em  $7,3 \text{ dB}$ . Com essas informações pode-se calcular a diferença entre as amplitudes das duas componentes analisadas, a qual resulta em  $64,1 \text{ dB}$ , aproximadamente. Desta forma, se fossem levadas em consideração as informações da Tabela 3: ‘Severidade e recomendações de procedimentos para a análise do espectro de corrente do motor’, nenhuma ação seria recomendada, porém isso não condiz com a realidade do ensaio. Este fato deve ser investigado em trabalhos futuros.



**Figura 49:** Espectros de corrente para o rotor com uma barra quebrada e funcionamento a vazio.

**Fonte:** Autoria própria.

Os espectros dos sinais de corrente para o MIT operando com tensões de alimentação balanceadas e torque de carga nominal, correspondente a  $4 \text{ N.m}$  e com frequências características calculadas para  $k$  até 5 são exibidos na Figura 50. As linhas verticais tracejadas sem valores são referentes às bandas laterais esquerdas para cada valor de  $k$ . A seta vermelha aponta para a componente de frequência que se sobressai e está nas proximidades da componente  $2f_s$ . Observa-se o aumento no valor da amplitude em dB da componente fundamental que é correspondente ao aumento do valor eficaz da corrente quando analisada no domínio do tempo. Com a imposição de torque de carga nominal no eixo do MIT a rotação diminui.



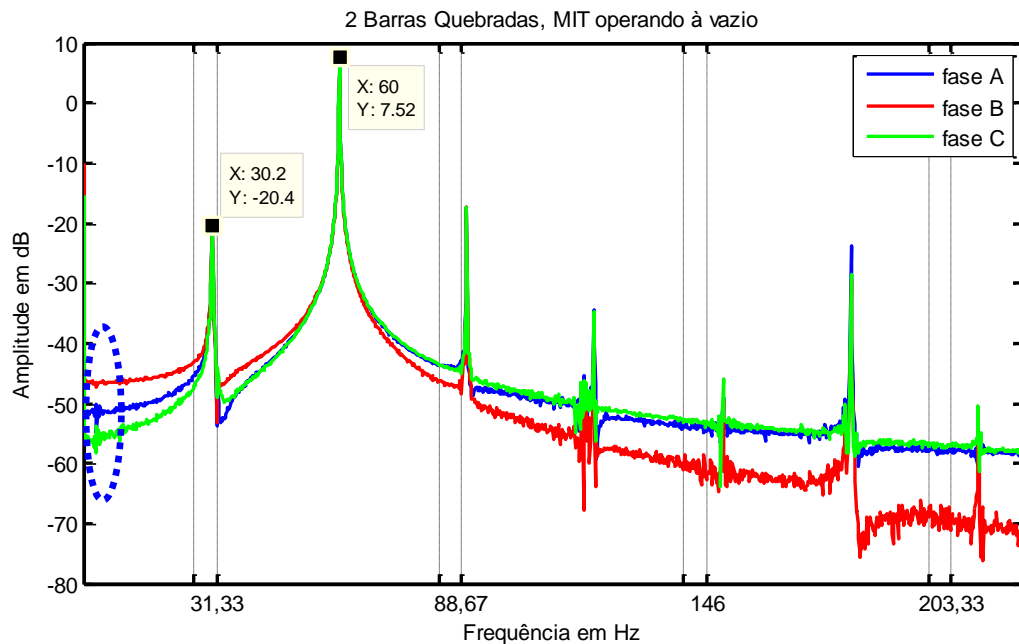
**Figura 50: Espectros de corrente para o rotor com uma barra quebrada e 4 N.m de carga.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 7.2.2 Caso 2: Duas barras quebradas

No segundo caso considerado, o MIT opera com um rotor que possui duas barras consecutivas quebradas, tensões balanceadas e sem imposição de torque no eixo. Com um número maior de barras quebradas, a severidade da falha deve ser maior em relação ao primeiro caso analisado.

A Figura 51 também retrata espectros dos sinais de corrente com algumas componentes de frequência identificadas, as quais foram apresentadas na Tabela 10, associadas aos respectivos valores de  $k$  do modelo.



**Figura 51:** Espectros de corrente para o rotor com duas barras quebradas e consecutivas operando sem imposição de carga.

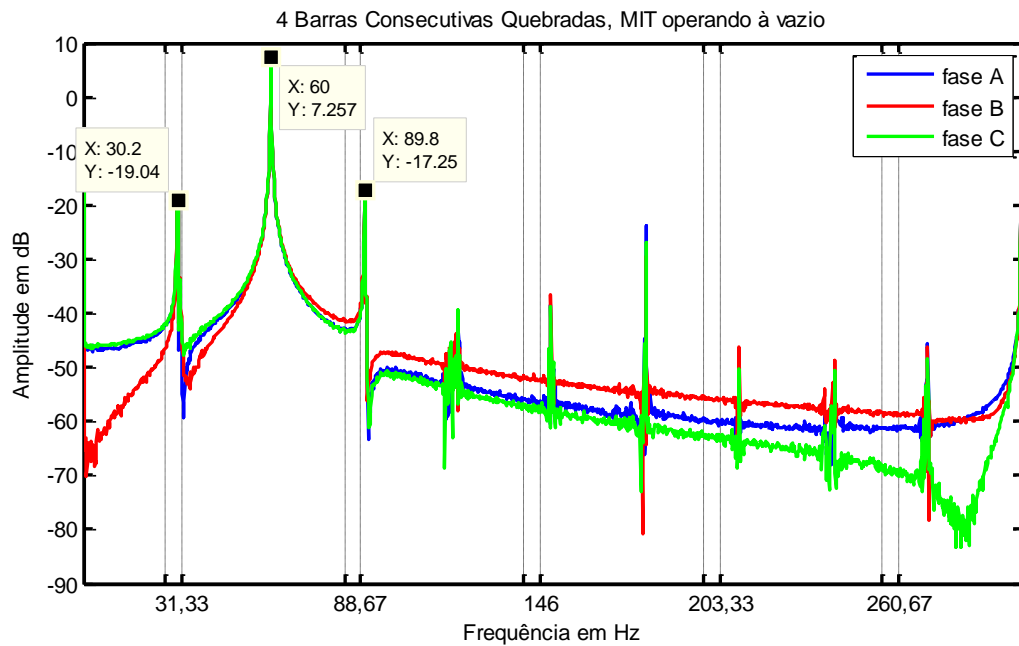
**Fonte:** Autoria própria.

Nota-se que a amplitude da componente fundamental está próximo do valor desta componente na Figura 49 e menor em relação ao da Figura 50, visto que no caso desta aquisição o MIT opera à vazio. A elipse em azul na figura engloba a região da componente  $2f_s$  nos três espectros.

### 7.2.3 Caso 3: Quatro barras quebradas consecutivas

A terceira condição de falha de rotor imposta ao MIT trata-se de um rotor com quatro barras quebradas e consecutivas. Os espectros de corrente analisados referem-se à aquisição realizada com tensões balanceadas e sem imposição de torque no eixo.

A apresentação da Figura 52 segue o mesmo procedimento das figuras anteriores consideradas nas outras situações de falha. As amplitudes em dB, da componente fundamental  $f$ , da componente  $f_{bbbd} = 31,33 \text{ Hz}$ , referente a  $k = 1$  e  $f_{bbbd} = 88,67 \text{ Hz}$ , referente a  $k = 2$  são exibidas na figura. A diferença entre as amplitudes da fundamental e da componente de falha  $f_{bbbd} = 31,33 \text{ Hz}$  dos dois casos anteriores para este, diminuiu, permitindo inferir que aumentando a severidade da falha, a amplitude desta componente tende a aumentar.



**Figura 52: Espectros de corrente para o rotor com quatro barras quebradas e consecutivas operando sem imposição de carga.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 7.3 ENSAIO DE FALHA DE ROLAMENTO

Nesta seção serão analisados os espectros dos sinais de corrente para duas condições nas quais o MIT opera com falhas de rolamento. Dois tipos de defeitos localizados serão considerados: defeito nas esferas e defeito na pista externa. As falhas de defeito localizado na gaiola não foram abordadas neste trabalho, em termos de ensaios e aquisição de sinais.

Serão considerados apenas os espectros de corrente do MIT operando com tensões trifásicas balanceadas, sem imposição de conjugado. A Tabela 11 resume as condições de tensão aplicadas nos ensaios de falha de rolamento para o MIT de 2 CV e é apresentada aqui apenas para efeito de conhecimento, visto que apenas uma condição de tensão será analisada, conforme dito anteriormente. São seis condições de tensão, onde a fase A foi colocada numa situação de subtensão, a fase B na tensão nominal e a fase C, colocada em sobretensão. Os percentuais de desbalanceamento, para casa fase, são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11: Condições de tensão aplicadas nos ensaios de falha de rolamento.**

<i>Condição da tensão de alimentação</i>						
<i>Condição</i>	<i>Fase A</i>		<i>Fase B</i>		<i>Fase C</i>	
	$xV_n$	$V_A$	$xV_n$	$V_B$	$xV_n$	$V_C$
V1	1	127,0	1	127,0	1	127,0
V2	0,98	124,5	1	127,0	1,02	129,5
V3	0,96	121,9	1	127,0	1,04	132,1
V4	0,94	119,4	1	127,0	1,06	134,6
V5	0,92	116,8	1	127,0	1,08	137,2
V6	0,90	114,3	1	127,0	1,1	139,7

**Fonte: Autoria própria.**

onde:

$V_n$  é o valor eficaz da tensão nominal monofásica;

$V_a$  é o valor eficaz da tensão na fase A;

$V_b$  é o valor eficaz da tensão na fase B;

$V_c$  é o valor eficaz da tensão na fase C.

Os conjugados aplicados nos ensaios de falha de rolamento são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12: Conjugados aplicados nos ensaios de falha de rolamento realizados com o MIT de 2 CV.**

<i>Conjugados aplicados</i>									
$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	$T5$	$T6$	$T7$	$T8$	$T9$	$T10$
0,5 Nm	1 Nm	2 Nm	3 Nm	4 Nm	5 Nm	6 Nm	7 Nm	8 Nm	9 Nm

**Fonte: Autoria própria.**

Para cada uma das diferentes condições das tensões trifásicas da Tabela 11, foi aplicada uma condição de conjugado da Tabela 12, totalizando 60 ensaios experimentais na bancada. Este procedimento foi repetido para cada tipo de defeito localizado.

Complementando as informações apresentadas na Tabela 4, com informação acerca da geometria do rolamento, a Tabela 13 agrupa as principais características do elemento, as quais são solicitadas pela GUI para realizar o cálculo das componentes características,

conforme os modelos estudados na seção 3.3.1.1. Para os rolamentos utilizados nos ensaios, o ângulo de contato é considerado zero, conforme catálogo do fabricante.

**Tabela 13: Dimensional dos rolamentos utilizados nos ensaios.**

Fonte: NSK BRASIL LTDA (2013)

	Características dos Rolamentos			
MIT	1 CV		2 CV	
Código	6204	6203	6205	6204
Posição	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
$N_b$	08	08	09	08
$D_c$	33,5 mm	29 mm	39 mm	33,5 mm
$D_b$	$5/16" \cong 7,9 \text{ mm}$	$17/64" \cong 6,7 \text{ mm}$	$5/16" \cong 7,9 \text{ mm}$	$5/16" \cong 7,9 \text{ mm}$
$\beta$	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Para entender o significado da nomenclatura utilizada no código dos rolamentos, a Tabela 14 expõe o significado de cada símbolo através de um exemplo. O exemplo considerado na tabela não se trata de nenhum rolamento utilizado nos ensaios.

**Tabela 14: Exemplo explicativo da nomenclatura utilizada para rolamentos.**

Fonte: NSK BRASIL LTDA (2013)

Números de Identificação		
Símbolo	Descrição	Significado
6	Rolamento fixo de uma carreira de esferas	Símbolo da Série do Rolamento
3	Série de diâmetro	
0	Diâmetro Nominal do Furo 40 mm	Número do furo
8		
ZZ	Blindado em ambos os lados	Símbolo da blindagem
C3	Folga Radial C3	Símbolo de Folga Interna

Fonte: Autoria própria.

Todos os rolamentos utilizados nos ensaios são fixos de uma carreira de esferas. O diâmetro nominal do furo é equivalente ao diâmetro interno da gaiola. A gaiola deste tipo de rolamento, conforme especificações técnicas, possui três diâmetros, os quais são: diâmetro externo, diâmetro primitivo e diâmetro interno. Conforme NSK BRASIL LTDA (2013), o diâmetro da gaiola levado em consideração nos modelos de falha de rolamento é também chamado de diâmetro primitivo. Os rolamentos avaliados nos ensaios possuem blindagem em ambos os lados, ou seja, ZZ.

### 7.3.1 Defeito na pista externa

Os espectros de corrente analisados nesta seção são referentes a um MIT de 4 polos, da linha W 22 de alto rendimento da WEG, com conjugado nominal de 8 N.m, potência de 2 CV e rotação nominal em torno de 1750 *rpm*, cujos dados de rolamento são fornecidos pela Tabela 4 e pela Tabela 13.

Apenas as frequências características do defeito localizado na pista externa serão destacadas nos espectros de corrente, visto que o motor opera sob essa condição de falha. As primeiras análises serão feitas para o rolamento dianteiro 6205ZZ. A partir dos modelos estudados na seção 3.3.1.1 e das especificações geométricas para este modelo de rolamento, apresentadas na Tabela 13, as frequências características de falha no anel externo são calculadas utilizando-se o algoritmo de cálculo da interface gráfica e apresentadas na Tabela 15.

**Tabela 15: Frequências características de falha no anel externo para o rolamento 6205ZZ.**

**Fonte: Autoria própria.**

<i>Frequências Características de Falha no Anel Externo em Hz – 6205ZZ</i>										
<i>k</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<i>fbfobe</i>	45	150	255	360	465	570	675	780	885	990
<i>fbfobd</i>	165	270	375	480	585	690	795	900	1005	1110

**Fonte: Autoria própria.**



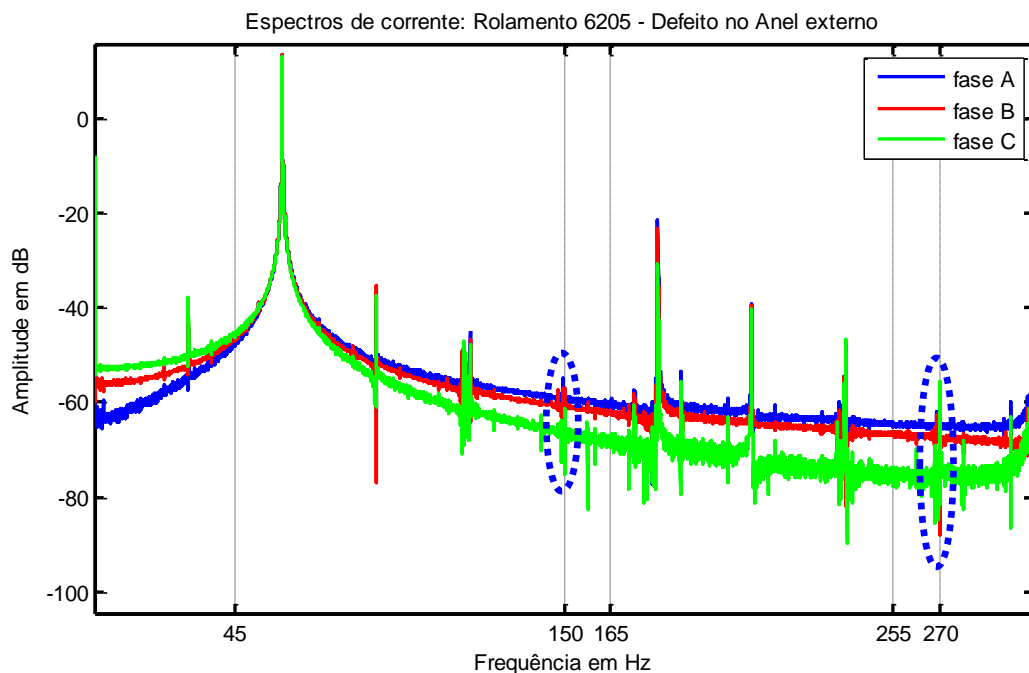
onde:

$fbfobe$  é a banda lateral esquerda da frequência de falha no anel externo;

$fbfobd$  é a banda lateral direita da frequência de falha no anel externo;

$k$  é o parâmetro do modelo.

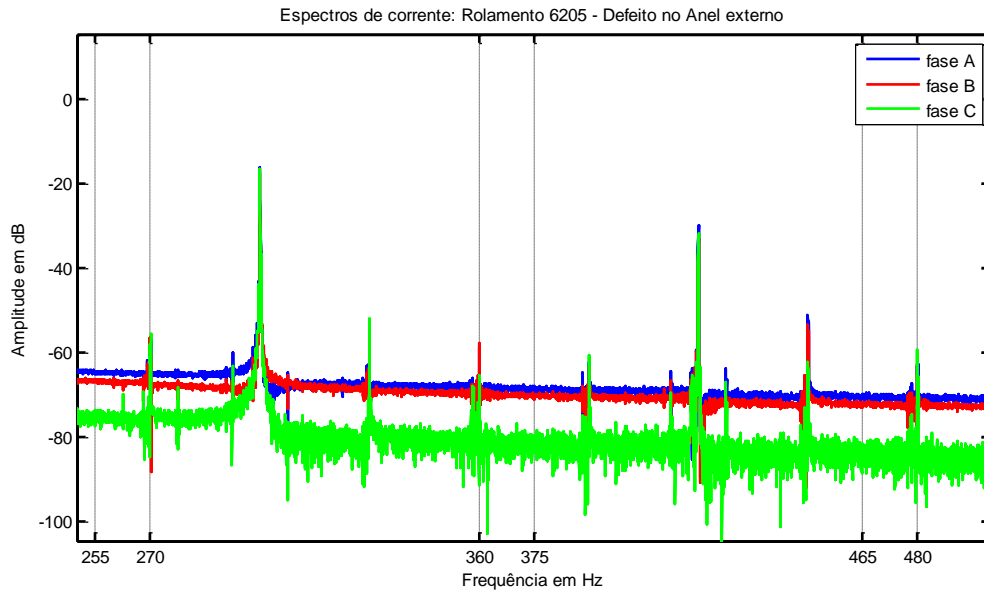
A Figura 53 apresenta os espectros de correntes limitados no eixo da frequência em 300 Hz. As componentes 150 Hz e 270 Hz são as bandas laterais, esquerda e direita, respectivamente, referentes à  $k = 2$ , aparecem no espectro. Em relação às componentes para  $k = 1$ , o mesmo não acontece.



**Figura 53:** Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 0 a 300 Hz

**Fonte:** Autoria própria.

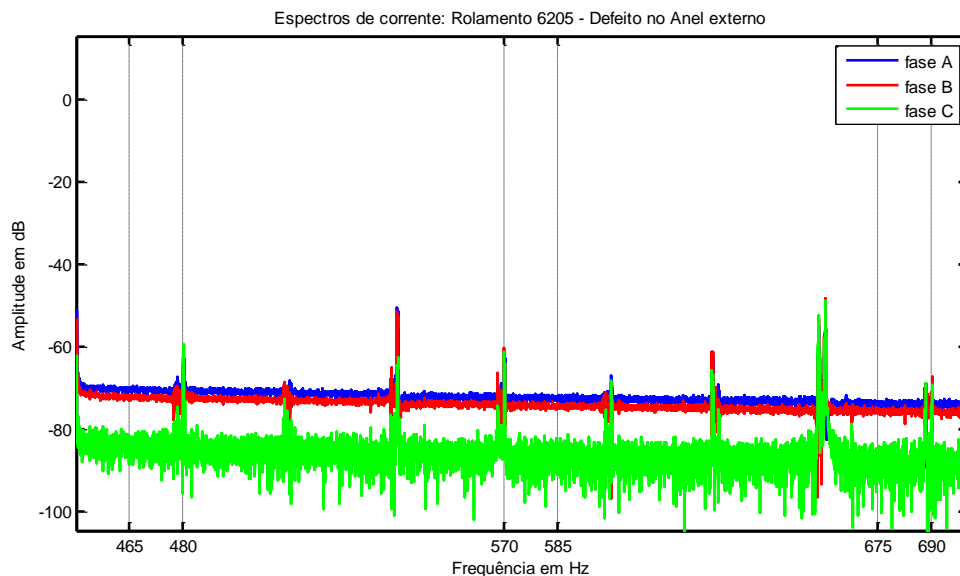
Os mesmos espectros de correntes são exibidos na Figura 54 para uma faixa de frequência de 250 a 500 Hz, permitindo a análise das componentes de frequência para  $k = 3$  e  $k = 4$ . As componentes 255 e 375 Hz referentes a  $k = 3$ , não aparecem no espectro. Por outro lado, 360 e 480 Hz estão presentes e novamente são componentes de frequência referentes a um valor par de  $k$ , neste caso  $k = 4$ .



**Figura 54:** Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 250 a 500 Hz

Fonte: Autoria própria.

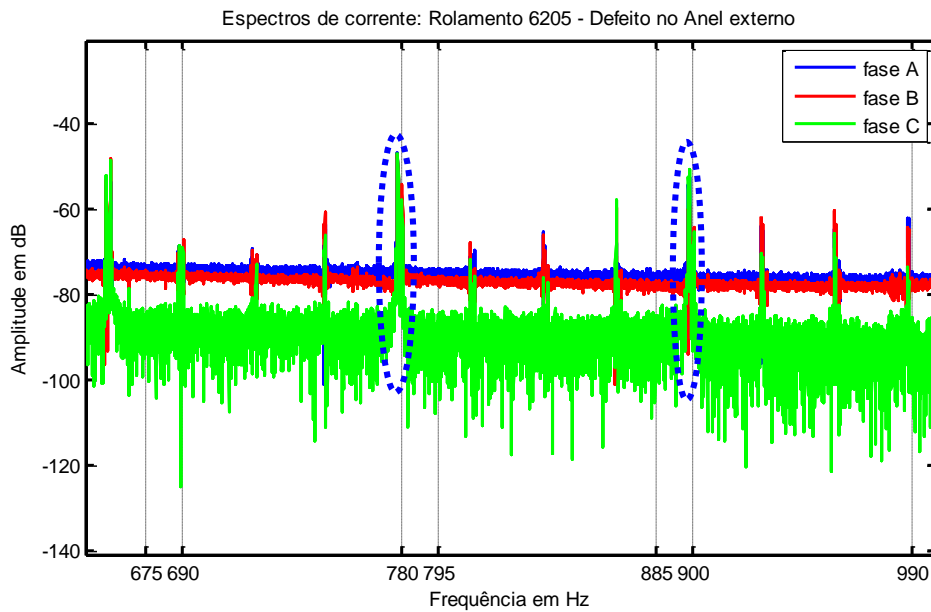
A fim de facilitar a visualização do espectro e a análise das componentes de frequência, será apresentada outra faixa de frequência do espectro, neste caso de 450 a 700 Hz, o que proporciona a análise de frequências referentes a outros dois valores de  $k$ . Analisando a Figura 55, pode-se inferir que as componentes calculadas com  $k = 5$  não aparecem no espectro de frequência. Mais uma vez, um valor par para  $k$  determina o aparecimento das frequências de falha no anel externo.



**Figura 55:** Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 450 a 700 Hz.

Fonte: Autoria própria.

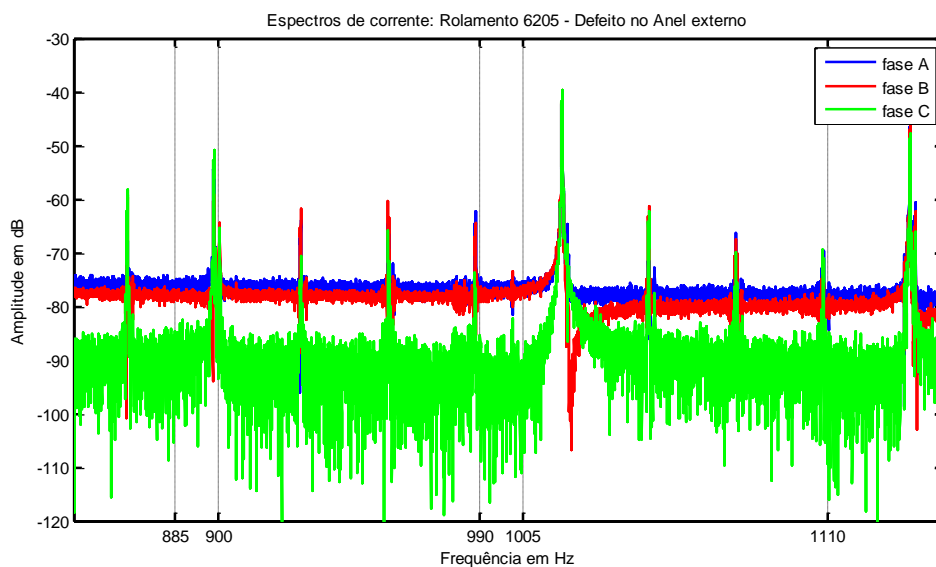
Na sequência da análise estão os espectros na faixa de 650 a 1000 Hz apresentados na Figura 56. As componentes 675 e 795 Hz, não determinam a presença da falha no espectro. Logo, as componentes 780 e 900 Hz, caracterizam a presença do defeito no anel externo.



**Figura 56:** Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 650 a 1000 Hz.

Fonte: Autoria própria.

Para finalizar a análise das componentes de frequência para todos os valores de  $k$  calculados a Figura 57 refere-se a faixa de 850 a 1150 Hz.



**Figura 57:** Espectros de corrente para o rolamento 6205 com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 850 a 1150 Hz.

Fonte: Autoria própria.

Apenas as componentes 990 e 1110 Hz, para  $k = 10$ , determinam a presença do defeito.

Para finalizar a seção de análises de falha na pista externa, será considerado o rolamento traseiro 6204ZZ. Devido às diferenças geométricas, os rolamentos dianteiro e traseiro com defeito produzem oscilações no fluxo do entreferro específicas para cada um. Essas oscilações são percebidas através da análise do espectro de corrente. As aquisições foram realizadas com o motor operando com o par de rolamentos danificados, ou seja, os espectros que serão exibidos a seguir referem-se aos mesmos sinais de corrente dos espectros estudados para o rolamento 6205ZZ. A diferença é que nesta segunda bateria de análises, diferentes componentes de frequência serão identificadas e analisadas nos espectros. As análises das componentes de falha poderiam ser feitas simultaneamente, porém a metodologia de análise não seria muito didática.

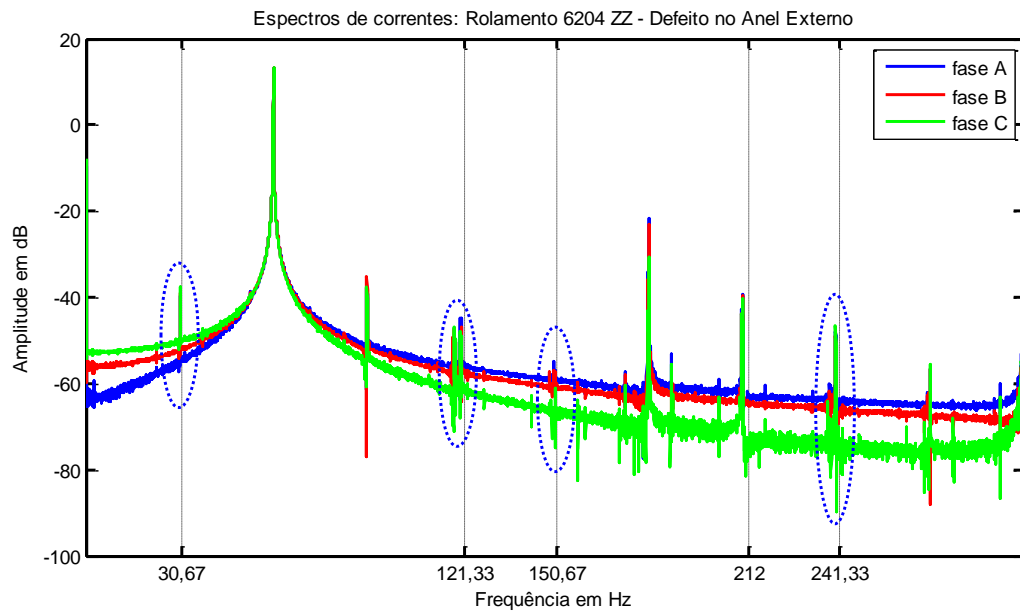
O procedimento para conhecer os valores das componentes de frequência é o mesmo utilizado na análise do rolamento 6204ZZ.

**Tabela 16: Frequências características de falha no anel externo para o rolamento 6204ZZ.**

<i>Frequências Características de Falha no Anel Externo em Hz – 6204ZZ</i>						
<i>k</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>fbfobe</i>	30,67	121,33	212	302,67	393,33	484
<i>fbfobd</i>	150,67	241,33	332	422,67	513,33	604

Fonte: Autoria própria.

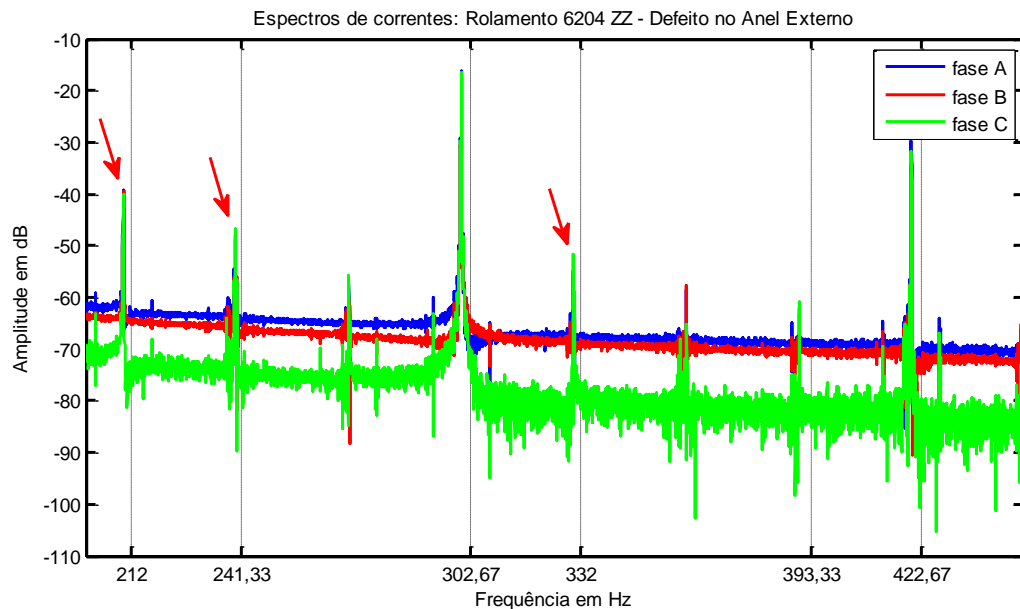
A Figura 58 tem as componentes da Tabela 16, destacadas pelas elipses em azul. As componentes, tanto para  $k = 1$  quanto para  $k = 2$ , estão presentes nos espectros.



**Figura 58:** Espectros de corrente para o rolamento 6204ZZ com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 0 a 300 Hz.

**Fonte:** Autoria própria.

As setas vermelhas apontam para componentes de frequências próximas às linhas tracejadas que identificam as frequências determinísticas de falha no anel externo.



**Figura 59:** Espectros de corrente para o rolamento 6204ZZ com defeito no anel externo. Faixa de frequência de 200 a 450 Hz.

**Fonte:** Autoria própria.

### 7.3.2 Defeito nas esferas

O MIT utilizado no ensaio de defeito localizado nas esferas é o mesmo do ensaio de falhas na pista externa. A Tabela 17 apresenta as componentes relativas ao defeito localizado nas esferas para  $k = 1$  a  $k = 5$ , calculadas conforme Equações (8) e (13). O rolamento em questão é o 6205ZZ.

**Tabela 17: Frequências características de falha nas esferas. Rolamento 6205ZZ.**

<i>Frequências Características de Falha nas Esferas em Hz – 6205ZZ</i>					
<i>k</i>	1	2	3	4	5
<i>fbfbbbe</i>	7,07	74,13	141,20	208,27	275,34
<i>fbfbbd</i>	127,07	194,12	261,20	328,27	395,34

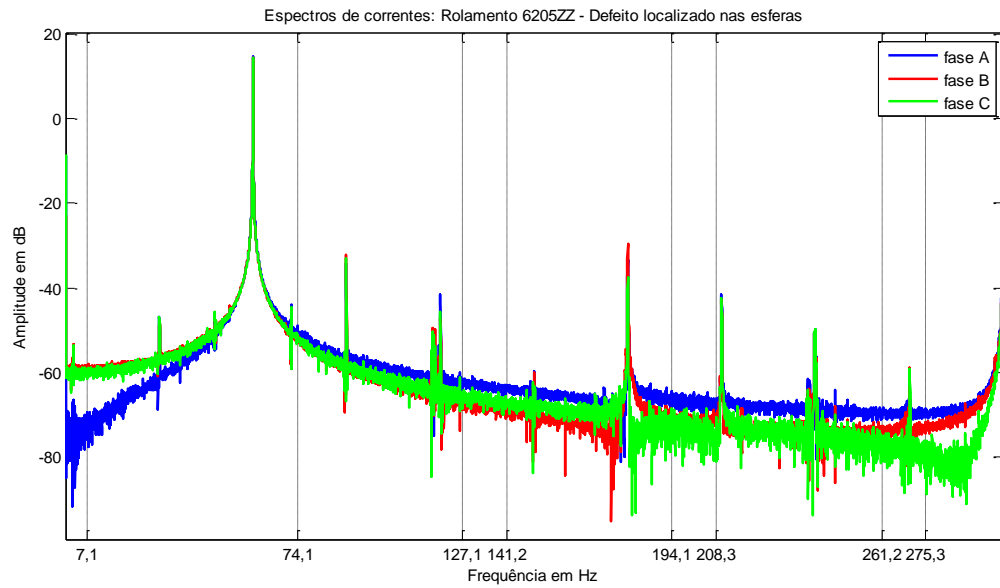
Fonte: Autoria própria.

onde:

*fbfbbbe* é a banda lateral esquerda da frequência de falha nas esferas;

*fbfbbd* é a banda lateral direita da frequência de falha nas esferas.

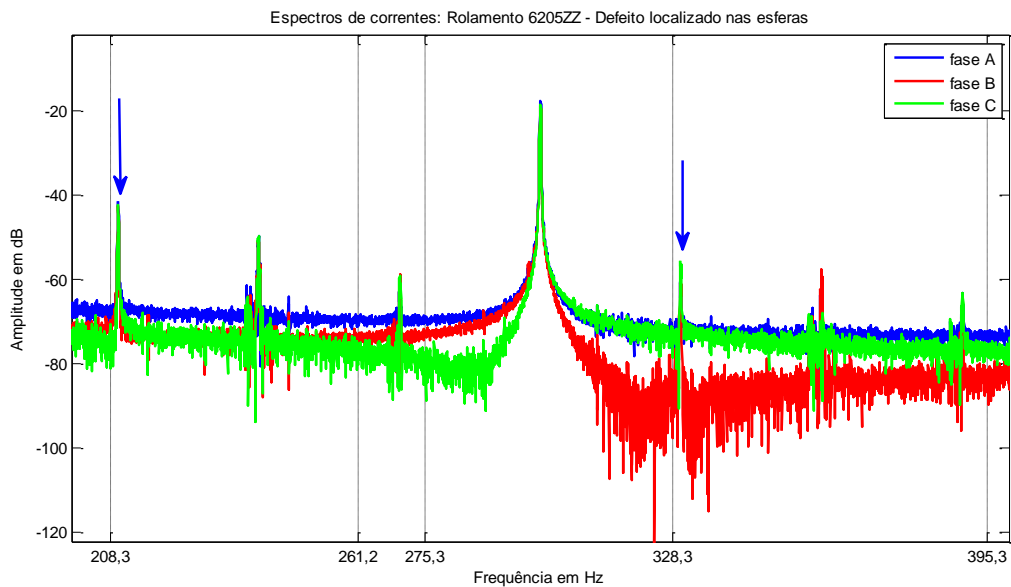
Os espectros de corrente com algumas das frequências da Tabela 17 são exibidos na Figura 60. Para este caso, não estão evidentes as componentes em análise, visto que as linhas tracejadas não estão tão próximas das componentes cujas amplitudes se sobressaem no espectro. Portanto, não é possível inferir que quaisquer componentes presentes no espectro determinam a presença do defeito, exceto pela componente 208,3 Hz.



**Figura 60:** Espectros de corrente para o rolamento 6205ZZ com defeito nas esferas. Faixa de frequência de 0 a 300 Hz.

**Fonte:** Autoria própria.

As componentes 208,27 e 328,27 Hz, são as únicas que determinam defeito na esfera para a faixa de frequência considerada, como mostra a Figura 61.



**Figura 61:** Espectros de corrente para o rolamento 6205ZZ com defeito nas esferas. Faixa de frequência de 200 a 400 Hz.

**Fonte:** Autoria própria.

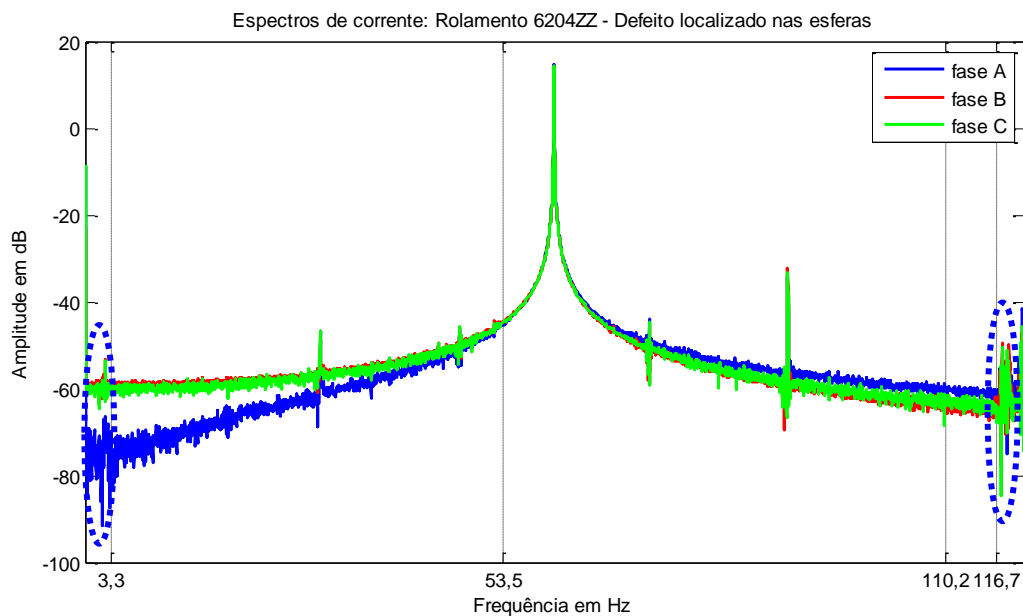
A análise seguinte é referente ao rolamento 6204ZZ. A Tabela 18 mostra as frequências características de falha nas esferas para este rolamento.

**Tabela 18: Frequências características de falha nas esferas. Rolamento 6204ZZ.**

<i>Frequências Características de Falha nas Esferas em Hz – 6204ZZ</i>					
<i>k</i>	1	2	3	4	5
<i>fbfbbbe</i>	3,3	53,5	110,2	166,9	223,7
<i>fbfbbbd</i>	116,7	173,5	230,2	286,9	343,7

Fonte: Autoria própria

As frequências características deste tipo de defeito para  $k = 1$  estão destacadas pelas elipses em azul na Figura 62. Pela análise da figura, a presença destas componentes de falha é perceptível.



**Figura 62: Espectros de corrente para o rolamento 6204ZZ com defeito nas esferas. Faixa de frequência de 0 a 120 Hz.**

Fonte: Autoria própria.

Para os demais valores de  $k$ , as componentes características de falha não aparecem no espectro.

#### 7.4 BANCO DE DADOS

Um banco de dados constituído 484 ensaios experimentais, de corrente, tensão e torque, das quais 198 são sinais do MIT operando em condições normais e 286 com o MIT



operando sob os diferentes tipos de falha de rolamento foi criado durante a execução do projeto. Ainda, o banco de dados foi complementado com mais 480 aquisições de falhas de estator e rotor, das quais, 6 aquisições são do MIT operando em condições normais, 240 de falha de barras quebradas e 234 de falha de curto-circuito.

## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso propôs uma ferramenta para detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos através da análise espectral de sinais de corrente. Esta ferramenta desenvolvida proporcionará ao usuário avaliar o estado de operação da máquina, permitindo-lhe julgar o momento de parada para manutenção regular para substituição dos componentes degradados. Isso permitirá redução de custos com manutenção de componentes que não apresentam falhas e evitará paradas repentinas de processos industriais que podem ocasionar perdas de produção e de máquinas inseridas no processo.

A velocidade no eixo é relevante para o cálculo de todas as frequências de falha, dentre aquelas estudadas e analisadas. Contudo, a velocidade de rotação do MIT não constituiu parte das aquisições realizadas, impossibilitando o conhecimento de seu valor exato. Sendo assim, a rotação nominal foi o parâmetro de entrada.

As falhas de curto-circuito, barras quebradas e de rolamento foram analisadas e as componentes de frequência calculadas para cada tipo de falha foram confrontadas com o que estava presente no espectro. No caso da análise de falha de curto-circuito as componentes calculadas para  $k$  e  $n$  específicos foram detectadas.

Em relação à análise de falha de barras quebradas, três tipos diferentes foram considerados. Na análise de uma barra quebrada, a componente  $2f_s$  foi monitorada e a diferença entre a amplitude desta componente e a fundamental foi maior que  $50\text{ dB}$ , implicando numa incoerência com as informações retratadas na Tabela 3. Este fato não conclusivo fica aberto para futuras investigações, analisando-se as demais aquisições realizadas para as mais diversas condições de tensão, conjugado e tipos de falha, com o uso da ferramenta desenvolvida. Para os rotores com duas e quatro barras quebradas consecutivas, algumas componentes de falha apresentaram amplitudes acentuadas.

Com relação às falhas de rolamento, a aquisição de sinais realizada foi descrita e as características geométricas dos rolamentos utilizados nos ensaios foram apresentadas na Tabela 12. Dois tipos foram analisados: falha no anel externo e falha nas esferas.

A análise do defeito localizado no anel externo foi dividida em duas etapas. A primeira considera o rolamento 6205ZZ enquanto a segunda, o 6204ZZ. As frequências características foram calculadas para  $k$  até 10. Apenas um espectro de corrente foi analisado, ou seja, para uma condição de operação do MIT. A análise deste espectro foi subdividida em várias

faixas de frequência para possibilitar uma averiguação eficaz das componentes. Para todas as componentes calculadas, apenas as referentes à valor par para o parâmetro  $k$ , determinaram a presença, em amplitude, da componente de falha, determinando assim, a presença do defeito em análise. Na segunda etapa, referente ao rolamento 6205ZZ, as componentes foram novamente calculadas e destacadas no espectro. As componentes tanto de  $k=1$  quanto de  $k=2$  são evidenciadas nas figuras.

Ambos os rolamentos 6205ZZ e 6204ZZ foram levados em consideração na análise do defeito localizado nas esferas, as frequências foram calculadas e destacadas no espectro de corrente. Contudo, para o sinal analisado, poucas foram as componentes que determinaram a presença da falha.

Neste trabalho também foi desenvolvido um algoritmo que realiza a identificação das amplitudes, em decibéis, correspondentes às frequências características de falha calculadas. Assim é possível descobrir o valor da amplitude de uma componente específica para o sinal com falha e a amplitude da mesma componente para um sinal sem falha, ou seja, referente um MIT operando em boas condições e compará-las. A comparação é realizada calculando-se a diferença em dB das amplitudes e com este resultado, os critérios estabelecidos para julgar, por exemplo, a severidade de uma falha de barras quebradas, conforme Tabela 3, poderiam ser aplicados. Contudo, este algoritmo não foi incluído no código da GUI. Os critérios citados podem ser utilizados em mensagens de saída para o usuário que está utilizando a ferramenta para tomar uma decisão imediata ou programar uma manutenção preditiva.

## 8.1 TRABALHOS FUTUROS

A análise das aquisições de sinais de corrente do MIT operando em condições de falha sob o efeito do desbalanceamento de tensão e das diferentes situações de conjugado e a influência dessas condições nos espectros de correntes e nas amplitudes das frequências características de falha pode ser realizada em futuros trabalhos utilizando-se a ferramenta criada neste projeto.

Ainda, pode-se em trabalhos futuros agregar esta interface à instrumentação utilizada para aquisição de sinais, bem como desenvolver uma sub *interface* gráfica com o usuário para a parametrização da aquisição. Esta sugestão também é uma oportunidade de desenvolvimento de trabalho futuro, afim de consolidar o produto, visto que os atuais e

consolidados aparelhos presentes no mercado que desempenham a função de análise espectral possuem elevado custo.

## 8.2 PUBLICAÇÃO ASSOCIADA AO TRABALHO

ANICETO, Bruno C. M. “Análise de Falhas em Motores de Indução Utilizando Análise Espectral”, **XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**, 5 p, Curitiba: 2012.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST**. Módulo 8, Qualidade da Energia Elétrica, 2010.

BACCARINI, Lane M.R. “**Deteção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução.**” 2005. 179 f, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais – PDGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2005.

BELLINI, Alberto; FILIPPETTI, Fiorenzo; TASSONI, Carla; CAPOLINO, Gerard-A “Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines” **IEEE Transations on Industrial Electronics.**, vol. 55, no. 12, pp.4109-4126, Dez. 2008.

BENBOUZID, Mohamed El H. “A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection” **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 47, no. 5, pp. 984-993, Out. 2000.

BETTA, Giovanni; LIGUORI, Consolatina; PAOLILLO, Alfredo; PIETROSANTO, Antonio. “A DSP-Based FFT-Analyzer for fhe Fault Diagnosis Of Rotating Machine Based On Vibration Analysis”. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 51, no. 6, pp. 1316-1322, Dez. 2002.

BLÖDT, Martin; GRANJON, Pierre; RAISON, Bertrand; ROSTAING, Gilles “Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring”. **IEEE Transation on Industrial Electronics**. vol. 55, no. 4, pp.1813-1822, Abril 2008.

BOLLEN, Math H. J.; GU, Irene Yu-Hua. **Signal Processing Of Power Quality Disturbances**. Canada: IEEE Press, 2006.

BRITO, Jorge N. “**Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos.**” 2002. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

DEVANEY, Michael J.; EREN, Levent "Detecting motor bearing faults". **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, pp. 30-35, Dez. 2004.

FILHO , Paulo C. M. L. “**Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos Através da Análise de Fluxo Magnético**” 2003. 127 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FILIPPETTI, Fiorenzo; FRANCESCHINI, Giovanni; TASSONI, Carla; VAS, Peter “Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques” **IEEE Transactions on Industrial Electronics.**, vol. 47, no. 5, pp. 994-1004, Out. 2000.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles J.; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**, 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GOEDTEL, A. **Estimador Neural de Velocidade para Motores de Indução Trifásico**. 2007. 159 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GONGORA, Wyllyam S. “**Uma Abordagem Neural no Diagnóstico de Falhas em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos.**” 2013. 91 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2013.

HENAO, Humberto; DEMIAN, Cristian; CAPOLINO, Gérard-André. A Frequency-Domain Detection of Stator Winding Faults in Induction Machines Using an External Flux Sensor. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 39, no. 5, pp 1272-1279, Set./Out. 2003.

LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**, 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

LYONS, Richard G. **Understanding Digital Signal Processing**. Canada: Addison Wesley Longman, 1997.

NSK BRASIL LTDA, “**NSK Bearing Doctor, Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos**”, São Paulo, 2005, 36p.

NSK BRASIL LTDA. **Catálogo Geral de Rolamentos**. São Paulo: Catálogo. Disponível em: <[http://www.nsk.com.br/cat\\_digital/Catalogo.html](http://www.nsk.com.br/cat_digital/Catalogo.html)> . Acesso em: 26 Julho 2013.

OBAID, Ramzy; HABETLER, Thomas. “Current-Based Algorithm For Mechanical Fault Detection In Induction Motors With Arbitrary Load Conditions”. **38th IAS Annual Meeting In Industry Applications Conference**. vol. 2, pp. 1347-1351, Out. 2003.

OLIVEIRA, José E. A. De. **“Modelagem de um motor de indução trifásico operando com tensão trifásicas desequilibradas por meio de redes neurais artificiais.”** 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, 2011.

ORTIGUEIRA, Manuel D. **Processamento Digital de Sinais.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2005.

PROCOBRE, Instituto Brasileiro do Cobre. **Harmônicas nas Instalações Elétricas.** São Paulo, Nov. 2001.

RABELO, Robson C. M. **“Estudo de um método de avaliação preditiva para falha em motores elétricos baseado em sinais de corrente elétrica.”** 2012. 126 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2012.

SHARIFI, Rasool; EBRAHIMI, Mohammad. “Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring”. **ISA Transactions**, vol. 50, pp. 14-20, 2011.

SILVA, José L. H.; CARDOSO, Marques A. J. "Bearing Failures Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach". **IEEE Industrial Electronics** , pp. 2591-2596, 2005

SILVA, Jonas G. B. **“Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) no Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos Através da Assinatura Elétrica de Motores de Indução.”** 2008. 98 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

SINGH, Harapajan; SEERA, Manjeevan; ISMAIL, Ahmad P. “Condition Monitoring of Electrical Supply Voltage Quality to Electrical Machines using RBF Neural Network”. **IEEE International Conference on Power and Energy**, pp. 312-317, Nov./Dez. 2010.

SUETAKE, Marcelo. **“Sistemas Inteligentes para Monitoramento e Diagnósticos de Falhas em Motores de Indução Trifásicos”.** 2012. 132 f, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos. 2012.

SUETAKE, Marcelo. **“Implementação de Sistemas Inteligentes em Processadores Digitais para Controle de Máquinas Elétricas Rotativas”.** 2008. 211 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos. 2008.

THOMSON, William T. "On-line mcsa to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure". **IEEE International In Electric Machines and Drives Conference**, pp. 891-898, 2001.

THOMSON, William. T.; FENGER, Mark. "Current signature analysis to detect induction motor faults". **IEEE Industry Applications Magazine**, pp. 26-34, Julho/Ago. 2001.

VEINOTT, Cyril G. **Theory and Design of Small Induction Motors**. Mc Graw-Hill Book Company, 1959.

WEG, **Danos em enrolamentos Motores Trifásicos**, Santa Catarina, 2009, 1 p.

WEG, **Motores Elétricos de Corrente Alternada**, Santa Catarina, 2008, 146 p.

YE, Zhongming; WU, Bin; SADEGHIAN, Alireza. "Current Signature Analysis Of Induction Motor Mechanical Faults By Wavelet Packet Decomposition" **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 50, no. 6 pp. 1217-1228, Dez. 2003.