

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

GUILHERME DE SOUZA
LUIZ GUSTAVO SALONSKI DA SILVA
LUIZ HENRIQUE SALONSKI DA SILVA JUNIOR

DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

GUILHERME DE SOUZA
LUIZ GUSTAVO SALONSKI DA SILVA
LUIZ HENRIQUE SALONSKI DA SILVA JUNIOR

DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

Trabalho de conclusão do curso de Graduação em Engenharia Elétrica apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.
Orientador: Prof. Dr. Bruno Akihiro Tanno Yamamura

CURITIBA
2019

Luiz Henrique Salonski da Silva Junior
Luiz Gustavo Salonski da Silva
Guilherme de Souza

DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 21 de novembro de 2019.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Ma.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Bruno Akihiro Tanno Yamamura, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Bruno Akihiro Tanno Yamamura, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago de Paula Machado Bazzo, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

SALONSKI, Luiz Henrique, A; SALONSKI, Luiz Gustavo, B; DE SOUZA, Guilherme, C. **Diagnóstico de falhas em motores de indução**. 2019. 78 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Os motores de indução trifásicos são os principais ativos de grandes empresas. Estes realizam a conversão eletromecânica de energia nos processos produtivos e estão sujeitos a diversos modos de falha durante o seu ciclo de vida. Este trabalho analisa os defeitos mais frequentes e aplica a técnica de MCSA para identificar defeitos antes que causem a falha do motor, evitando paradas não programadas e prejuízos ao patrimônio das empresas. O método proposto é baseado na análise da assinatura do espectro de corrente do estator e parte da premissa de que defeitos mecânicos no motor são refletidos no espectro de frequência das correntes do estator.

Palavras-chave: MCSA. Análise espectral. Assinatura de corrente. Diagnóstico de falhas.

ABSTRACT

SALONSKI, Luiz Henrique, A; SALONSKI, Luiz Gustavo, B; DE SOUZA, Guilherme, C. **Induction motors fault diagnosis**. 2019. 78 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Three-phase induction motors are critical assets to a company. They are responsible for the conversion of electrical energy into mechanical energy, used in industrial processes, and are subject to several faults during their operational cycle. This paper analyses the usual faults and applies MCSA technique to identify the faults before they happen and cause an unexpected break in the production chain. The method identifies the faults by their individual signatures on the frequency spectrum of the electrical currents in the stator coils and is based on the premise that mechanical defects are reflected on the stator currents.

Key-words: MCSA. Spectral analysis. Current signature. Fault diagnosis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo de energia industrial	14
Figura 2 - Distribuição de falhas em MIT.....	15
Figura 3 - Fluxograma de falhas dos MIT.....	16
Figura 4 - Construção do motor de indução	21
Figura 5 - Estator	22
Figura 6 - Gaiola de esquilo	23
Figura 7 - Campo magnético resultante	24
Figura 8 - Campo girante e campo no rotor	24
Figura 9 - Diagrama de blocos do método LTSA	29
Figura 10 - Exemplo da mudança detectada na densidade de fluxo magnético.....	30
Figura 11 - Falha na bobina da fase.....	31
Figura 12 - Barra do rotor rompida por completo	32
Figura 13 - Barra do rotor rompida parcialmente.....	32
Figura 14 - Espectro de envelope – Vibração dianteira.....	33
Figura 15 – Periodograma Welch para motor à vazio	34
Figura 16 – Periodograma Welch para motor com 85% de carga.....	35
Figura 17 - Espectro para motor sem falhas.....	36
Figura 18 - Espectro para motor com 1 barra do rotor quebrada com 100% de carga.....	37
Figura 19 - Espectro para motor com 5 barras do rotor quebradas com 100% de carga.....	37
Figura 20 - Espectro para motor com 12 barras do rotor quebradas com 100% de carga	37
Figura 21 - Espectro da corrente de um motor sem problemas (B1) e de um com problemas de rolamento (B2).....	39
Figura 22 - Sonda Tektronix	39
Figura 23 - Catálogo WEG.....	41
Figura 24 - Curva de torque e corrente x rotação	42
Figura 25 - Curva de desempenho em carga	43
Figura 26 - Curva de limite térmico.....	44
Figura 27 - Soldagem dos terminais	45
Figura 28 - Resultado do preparo dos motores.....	45
Figura 29 - Módulo Experimental	46
Figura 30 - Bancada dos experimentos	47
Figura 31 - Freio magnético	48

Figura 32 - Dados de placa máquina secundária	48
Figura 33 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga. Motor sem defeitos, fase 2	50
Figura 34 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio a vazio. Motor sem defeitos, fase 2	51
Figura 35 - Painel com as formas de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga. Todos os motores, fase 2.....	52
Figura 36 - Painel com as formas de onda no domínio do tempo. Ensaio a vazio. Todos os motores, fase 2.....	53
Figura 37 – Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga. Motor com defeito no enrolamento, fase 2	55
Figura 38 - Espectro de frequência para o defeito no enrolamento. Ensaio com carga, fase 2.	55
Figura 39 - Espectro de frequência ampliado para o defeito de enrolamento. Ensaio com carga, fase 2.	56
Figura 40- Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio a vazio, fase 2 do motor com defeito no enrolamento.	56
Figura 41 - Espectro de frequência ampliado para o defeito de enrolamento. Ensaio a vazio, fase 2	57
Figura 42 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga, fase 2 do motor com defeito nas barras do rotor.....	58
Figura 43 - Espectro de frequência para o defeito nas barras do rotor. Ensaio com carga, fase 2	59
Figura 44 - Espectro de frequência ampliado para o motor com defeito nas barras. Ensaio com carga, fase 2.....	60
Figura 45 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga, fase 2 do motor com defeito nas barras do rotor.....	61
Figura 46 – Espectro de frequência para o defeito nas barras do rotor. Ensaio a vazio, fase 2	61
Figura 47 - Espectro de frequência ampliado para o motor com defeito nas barras. Ensaio com carga, fase 2.....	62
Figura 48 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga, fase 2 do motor com defeito no rolamento.	64
Figura 49 - Espectro de frequência para o defeito no rolamento. Ensaio com carga, fase 2. ..	64
Figura 50 - Espectro de frequência ampliado para o defeito no enrolamento. Ensaio com carga,	

fase 2.	65
Figura 51 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio a vazio, fase 2 do motor com defeito no rolamento.	65
Figura 52 -Espectro de frequência ampliado para o defeito no enrolamento. Ensaio a vazio, fase 2.	66
Figura 53 - Repetição do sinal.....	73
Figura 54 - Novos pontos.....	73
Figura 55 - Gráfico em curvas.....	74
Figura 56 - Gráfico gerado.....	75
Figura 57 - Planilha exemplo	76
Figura 58 - Dados utilizados	77
Figura 59 - Sinal capturado	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência elétrica dos enrolamentos.	41
Tabela 2 – Frequências das bandas laterais, defeito no enrolamento.	54
Tabela 3 – Grandezas medidas no ensaio com carga, defeito no enrolamento.	54
Tabela 4 – Frequências do defeito de barras quebradas.....	58
Tabela 5 – Grandezas medidas no ensaio com carga, barras quebradas.....	58
Tabela 6 – Frequências das bandas laterais para o defeito de rolamento.	63
Tabela 7 – Grandezas medidas no ensaio com carga, defeito no rolamento.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DTFT	Transformada de Fourier de Tempo Discreto
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSA	<i>Flux SignatureAnalysis</i>
FT	<i>Fourier Transform</i>
LTSA	<i>Load torque SignatureAnalysis</i>
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
MIT	Máquina de indução trifásica
MWh	Megawatt-hora
p.u.	Por Unidade
SEMAP	Setor de Almoarifado/Manutenção dos laboratórios.
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
s	Escorregamento por unidade	%
n_s	Velocidade síncrona	rpm
n	Frequência	Hz
p	Número de polos	-
ω	Componente senoidal de frequência	Hz
$\delta_T(t)$	Sinal periódico de período T	-
T	Período	s
$\bar{x}(t)$	Sinal periódico amostrado no domínio do tempo	-
$x(t)$	Sinal periódico no domínio do tempo	-
ω_s	Frequência angular	rad/s
t	Tempo	s
f_{st}	Frequência do enrolamento curto-circuitado	Hz
f_{brd}	frequência da barra do rotor defeituosa	Hz
f_g	Frequência da fonte	Hz
p	Número de pares de polos	-
f_0	Frequência inferior	Hz
f_1	Frequência superior	Hz
n	Número de bolas do rolamento	-
f_{rm}	Frequência mecânica do rotor	rpm

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	23
Equação 2	23
Equação 3	23
Equação 4	24
Equação 5	25
Equação 6	26
Equação 7	26
Equação 8	26
Equação 9	26
Equação 10	26
Equação 11	27
Equação 12	27
Equação 13	28
Equação 14	33
Equação 15	35
Equação 16	38
Equação 17	38
Equação 18	53
Equação 19	57
Equação 20	63
Equação 21	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	TEMA.....	14
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	16
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos.....	18
1.4	JUSTIFICATIVA.....	18
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS	19
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	21
2.1.1	Aspectos construtivos	21
2.1.2	Estator	22
2.1.3	Rotor.....	22
2.1.4	Princípios de funcionamento	23
2.2	PROCESSAMENTO DE SINAIS.	25
2.2.1	Amostragem de sinais	25
2.2.2	Transformada de Fourier: Definição e conceitos.....	26
2.2.3	Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT)	27
2.2.4	Transformada Discreta de Fourier (TDF)	27
2.2.5	Transformada rápida de Fourier	28
2.3	FERRAMENTAS DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS	28
2.3.1	Análise De Assinatura Da Corrente Elétrica.....	28
2.3.2	Técnica da Assinatura do Torque de Carga (LTSA)	28
2.3.3	Técnica da Análise de Fluxo Magnético (FSA)	30
2.4	MOTORES ESTUDADOS E SEUS DEFEITOS.....	30
2.4.1	Falha no Enrolamento (Motor 3)	33
2.4.2	Barra do Rotor Falhada (Motor 4)	35
2.4.3	Problema no Rolamento (Motor 5).....	38
2.5	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO.....	39
2.5.1	Sonda de Corrente.....	39

2.5.2	Osciloscópio	40
3	DESENVOLVIMENTO.....	41
3.1	DESCRIÇÃO DOS MOTORES	41
3.2	ADAPTAÇÕES DOS MOTORES E BANCADA EXPERIMENTAL	45
3.2.1	Adaptação dos motores	45
3.2.2	Adaptação do módulo experimental	46
3.2.3	Máquina secundária e freio magnético	47
3.3	FERRAMENTA PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS	49
4	RESULTADOS.....	50
4.1	MOTOR SEM DEFEITOS.....	50
4.2	MOTOR COM DEFEITO NO ENROLAMENTO	53
4.3	MOTOR COM DEFEITO NAS BARRAS DO ROTOR.....	57
4.4	MOTOR COM DEFEITO NO ROLAMENTO	63
5	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS.....	69
	APÊNDICES	72
	APÊNDICE A – PROJETO DA FERRAMENTA.....	72
	APÊNDICE B – TRATAMENTO DE DADOS	76
	APÊNDICE C – ÁREA DA PLOTAGEM	78

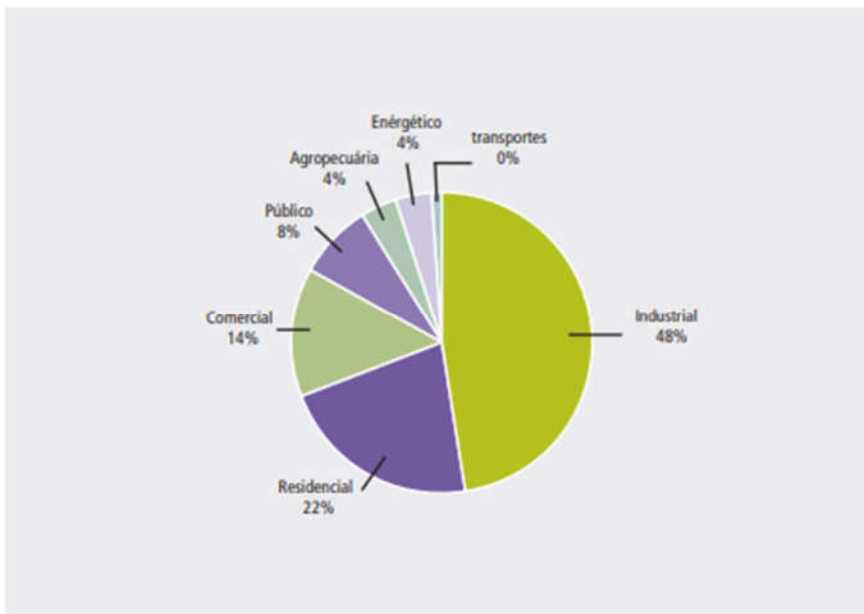
1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Os motores de indução, principais máquinas de conversão eletromecânica de energia, estão presentes na maior parte dos processos fabris e são estudados exaustivamente por pesquisadores e setores industriais, visto que também são suscetíveis a diversos tipos de falhas.

Estudos demonstram que a maioria da energia produzida no Brasil é destinada ao setor industrial (EPE, 2005), como apresentado na Figura 1. Isto representa aproximadamente 346 bilhões de MWh, e desta parcela de energia, 50% é consumida por motores elétricos (SUETAKE, 2012).

Figura 1 - Consumo de energia industrial



Fonte: EPE (2005).

Neste contexto, especial atenção deve ser dada aos motores de indução, que são utilizados em larga escala devido à sua simplicidade de construção e menor custo. Entre os motores de indução, o Motor de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo é o mais utilizado, pois possui características marcantes como robustez, longa vida útil, facilidade de fabricação e a pouca necessidade de manutenção. Características que o tornam mais atraente, principalmente no quesito econômico (SUETAKE, 2012).

Devido à relevância do motor de indução no panorama energético, estudos relacionados à qualidade de energia elétrica, eficiência energética, identificação e predição de falhas bem

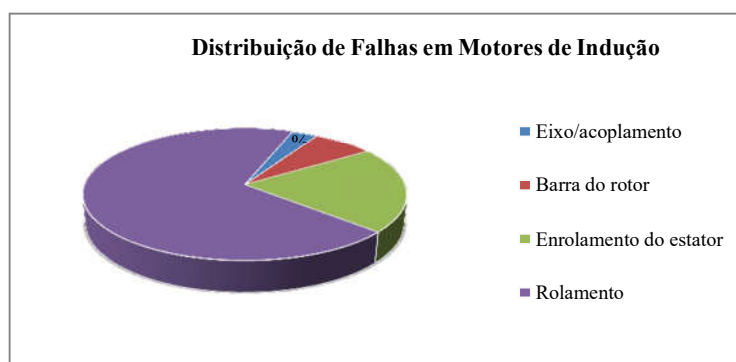
como o adequado dimensionamento, são assuntos de extrema importância.

Outro campo que demanda atenção é a manutenção industrial. De acordo com Baccarini (2005), estudos de gerenciamento de manutenção indicaram que o custo médio da manutenção chega a representar 15% do custo total do produto e procedimentos inadequados e desnecessários consomem um terço do custo total de manutenção. O diagnóstico de falhas em motores de indução é um assunto amplamente estudado há mais de 20 anos. Novas tecnologias relacionadas aos diagnósticos são desenvolvidas anualmente e as antigas são substituídas ou melhoradas. O objetivo dessa área de pesquisa é obter um diagnóstico confiável utilizando sensores com baixo custo de aquisição e algoritmos eficientes (HENAO; DEMIAN; CAPOLINO, 2003).

Os motores elétricos estão expostos a uma variedade de condições ambientais, operando sob diversos tipos de cargas, os quais em conjunto com o envelhecimento natural podem ocasionar falhas inerentes às próprias máquinas ou associadas às condições severas (BONNETT, 2012).

Algumas das falhas as quais os Motores de Indução Trifásico estão sujeitos são: 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%), conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição de falhas em MIT



Fonte: Bellini et al. (2008).

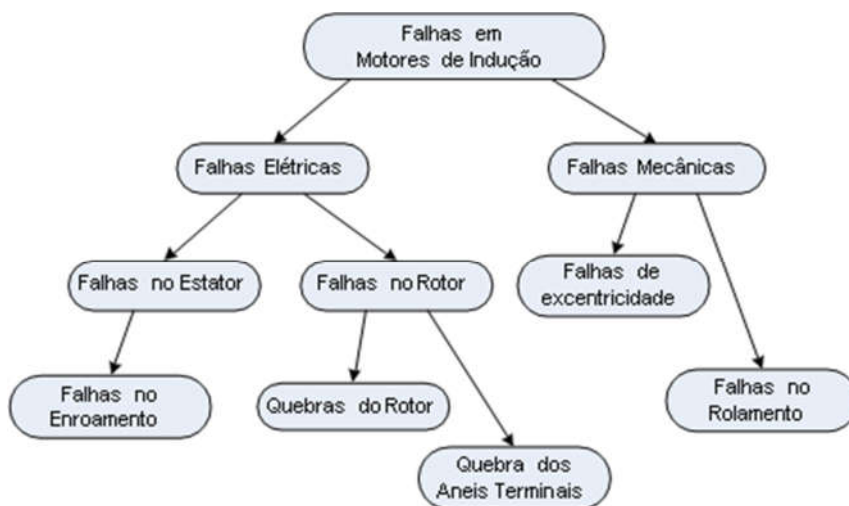
Dentre estas falhas, as de origem elétrica mais comuns são relacionadas ao estator e ao rotor. As falhas de origem estatórica estão relacionadas ao material isolante das bobinas do estator. Este material isolante se degrada por elevados períodos de transitórios na tensão de alimentação, alta temperatura da bobina ou do núcleo estatórico, folga na laminação do núcleo

magnético estático, perda da proteção das conexões de bobinas, contaminação provocada por óleo, umidade ou sujeira e descargas elétricas. Técnicas de predição indicam quando o estator deve ser rebobinado e evitam que o núcleo da máquina sofra danos irreversíveis causados pela falha de isolamento entre bobinas de fase e terra (SUETAKE,2012).

As quebras das barras do rotor ou rachaduras de anéis da gaiola de esquilo contribuem com cerca de 5% a 10% das falhas em motores de indução. As principais consequências residem no aumento na oscilação de conjugado, vibração excessiva, ruído, centelhamento, pobre dinâmica de partida e redução do desempenho mecânico.

As falhas ocorrentes em motores de indução, em geral, podem ser classificadas conforme esquema ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma de falhas dos MIT.



Fonte: Ye, Wu e Sadeghian (2003).

A implementação de um sistema de monitoramento alerta sobre as falhas iminentes e informa o operador das máquinas que se deve efetuar uma parada para manutenção da máquina, o que evita a parada repentina do processo de produção e evita ainda possíveis danos irreversíveis à máquina.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A Técnica da Assinatura do Espectro da Corrente (MCSA) é uma técnica usada para diagnosticar problemas elétricos e mecânicos no MIT. O seu conceito surgiu no final do século passado e foi primeiramente proposto para diagnosticar motores fisicamente inacessíveis ou localizados em áreas de risco, como em usinas nucleares. Seu uso é crescente pois além de ser

não invasivo, permite a realização de testes online sem a necessidade de interromper o funcionamento do MIT (KORDE, 2002).

Esta técnica consiste em utilizar uma sonda de corrente para obter a forma de onda da corrente de uma das fases do estator do MIT e utilizar um artifício matemático: a *Fast Fourier Transform* (transformada rápida de Fourier) - FFT. O objetivo é obter um padrão de assinatura de um MIT saudável e identificar a magnitude e a frequência de cada componente do espectro, para que o diagnóstico de falhas em MITs seja feita comparando-se as assinaturas dos respectivos motores (MILJKOVIC, 2015).

Geralmente, a ocorrência de falhas mecânicas em MITs pode resultar em assimetrias nos enrolamentos estáticos e variações do entreferro, os quais geram alterações na distribuição do fluxo magnético no entreferro. Estas anormalidades podem ser observadas no espectro de corrente do estator por meio de componentes harmônicas fora do padrão. O espectro de corrente pode ser obtido através de uma transformada rápida de Fourier (FFT) da corrente estática de um dos enrolamentos sob condições constantes de carga e torque (YE; WU; SADEGHIAN, 2003).

Métodos tradicionais de medição da corrente do motor podem resultar em alarmes falsos e/ou diagnósticos equivocados de máquinas saudáveis, devido à presença de componentes de corrente com frequência resultantes de variações de carga ou caixa de engrenagens, quando presentes. Avanços teóricos tornaram possível prever tais componentes de corrente e tornaram MCSA um método muito mais robusto e confiável (BACCARINI, 2005).

A utilização da FFT como ferramenta matemática para gerar os espectros de corrente no domínio da frequência e distinguir motores saudáveis de motores com falhas é confiável, desde que o sinal de corrente seja estacionário, o motor opere próxima a plena carga e a tensão terminal seja senoidal. Apesar de possuir alguns contrapontos, como a variação de propriedades da corrente estática (devido a alterações de carga e transitórios na tensão de alimentação), e sofrer influência de harmônicos gerados pela utilização da eletrônica de potência na partida das MIT (soft-starters, inversores de frequência), a utilização desta ferramenta é adequada para este trabalho (YE; WU; SADEGHIAN, 2003).

Uma desvantagem da MCSA é o custo adicional envolvido para diagnósticos off-line (fora do processo industrial). Seria necessário operar o motor próximo à plena carga, visto que medições realizadas com a máquina operando com pouca carga não garantem um resultado confiável. Fazer o motor operar próximo as condições nominais pode ter custo econômico elevado (YE; WU; SADEGHIAN, 2003).

Em condições de operação com baixo escorregamento, o método MCSA requer uma

boa resolução espectral, o que exige equipamentos com maior frequência de amostragem e mais espaço de memória para salvar os pontos da forma de onda medida. A relação entre a resolução em frequência e o tempo de aquisição é inversamente proporcional e conflitante (MABROUK; ZOUZOU, 2015).

Uma alternativa seria captar o sinal de corrente durante a partida do motor, porém a FFT não é um bom artifício para analisar sinais transientes. O método baseado *wavelet detection* poderia ser utilizado para analisar o sinal nessas condições (YE; WU; SADEGHIAN, 2003).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é utilizar a análise espectral de assinatura de corrente estatórica com a finalidade de diagnosticar defeitos em rolamentos, estatores e rotores de motores de indução trifásicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Nesta subseção, os objetivos particulares deste trabalho são listados a seguir:

- a) Aplicar a ferramenta de análise espectral de corrente, com a finalidade de identificar defeitos em motores de indução trifásicos;
- b) Analisar a influência de defeitos em rolamento, estator e rotor na assinatura da corrente de armadura dos motores de teste, e comparar com as correntes de motores sem defeitos (padrão);
- c) Avaliar a viabilidade de aplicar os métodos utilizados neste trabalho para a indústria, como forma de manutenção preditiva;
- d) Analisar teses, dissertações e artigos científicos, para produzir a base do trabalho e atestar a relevância do presente trabalho;

1.4 JUSTIFICATIVA

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; WU; SADEGHIAN, 2003).

Suetake (2012) afirma que:

(...) a necessidade crescente de busca por processos mais racionais e econômicos no que tange a utilização eficiente da energia elétrica tem implicado na realização de estudos detalhados para otimização das técnicas de manufatura, os quais visam também a adequada conservação da energia elétrica. Dentro deste contexto, os motores elétricos tornaram-se equipamentos indispensáveis na maioria dos processos que envolvem os setores produtivos, pois estes se destacam como principais elementos de conversão de energia elétrica em mecânica. Como consequência, essas máquinas elétricas passaram, e tendem a continuar passando, por melhorias que atendam às necessidades emergentes dos processos produtivos frente a sua importância energética (SUETAKE, 2012, p. 29).

Embora o MIT seja robusta, inevitavelmente sofrerá desgaste e estará sujeita a falhas, as quais são aceleradas por aspectos ambientais e características de operação. Em casos extremos, a falha pode imobilizar completamente um processo industrial e dependendo da importância deste processo, pode gerar grande prejuízo. Em outros casos, o rendimento da máquina diminui e consome mais energia para realizar o mesmo trabalho de uma máquina saudável. A diminuição do rendimento da máquina também está associada a um sobreaquecimento dos enrolamentos, o que pode gerar danos irreversíveis ao MIT.

Os métodos de manutenção têm evoluído significativamente, e líderes industriais estão investindo cada vez mais em sistemas para diagnóstico de falhas, com ênfase na análise de vibrações (BACCARINI, 2005).

Apesar de não ser um processo simples, a técnica de MCSA permite diagnosticar precocemente motores com defeitos que prejudicam a eficiência energética, possíveis paradas não programadas e ainda prejuízos causados por falhas irreversíveis em MITs críticos ao processo de produção.

Por tais motivos, a técnica de MCSA será aplicada para diagnosticar defeitos em motores de indução trifásicos, sendo estes: 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

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

A metodologia de pesquisa refere-se ao planejamento em sua dimensão mais ampla, envolvendo tanto a sua diagramação, quanto à previsão de análise (GIL, 1991 apud BUCH JUNIOR; GRUNEWALDER, 2013). O caráter classificatório do presente trabalho é de natureza bibliográfica e experimental. Desse modo, ele foi dividido em duas etapas: A primeira etapa será destinada à pesquisa. A segunda etapa é destinada ao desenvolvimento experimental. Nesta etapa, serão analisadas as assinaturas de corrente das falhas já determinadas pelo fabricante e comparadas com a assinatura de corrente de motores idênticos sem defeitos, para

validar o método da análise espectral de corrente.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A divisão desse trabalho será feita em cinco capítulos:

O primeiro capítulo é o presente e é uma introdução ao trabalho em geral, onde foram levantados os problemas, objetivos e justificativas do estudo, assim como um cronograma para sua realização. O segundo capítulo trata de uma revisão dos conhecimentos que serão utilizados como base nesse estudo, assim como de máquinas de indução e a técnica da assinatura do espectro da corrente (MCSA). No terceiro capítulo será desenvolvido o estudo de fato. Para o quarto capítulo será feita uma análise dos dados obtidos durante o trabalho e finalmente um capítulo para concluir o trabalho.

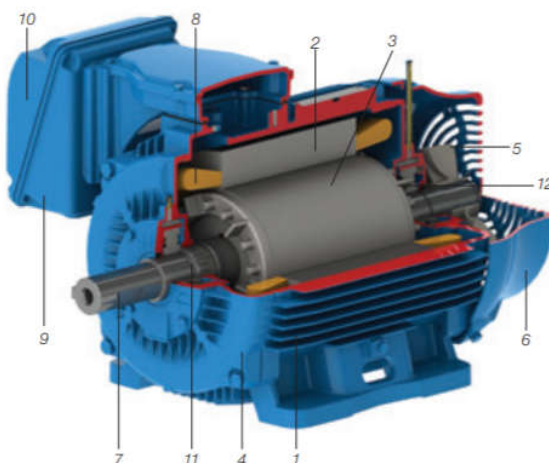
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

2.1.1 Aspectos construtivos

O motor de indução trifásico é composto fundamentalmente por duas partes: estator e rotor. O estator é a parte fixa e o rotor é apoiado nas extremidades, em dois mancais, e pode girar livremente. Na Figura 4 encontram-se as principais partes de um motor de indução trifásico, a carcaça (1) é a estrutura suporte do conjunto; de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas. O Núcleo de chapas (2) - as chapas são de aço magnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas no ferro. O Enrolamento trifásico (8) - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação. Eixo (7) - transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor. É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga. Núcleo de chapas (3) - as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator. Barras e anéis de curto-circuito (12) - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça. Outras partes do motor de indução trifásico: Tampa (4), Ventilador (5), Tampa defletora (6), Caixa de ligação (9), Terminais (10), Rolamentos (11).

Figura 4 - Construção do motor de indução



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

2.1.2 Estator

É constituído de chapas de material magnético, isoladas entre si, com ranhuras distribuídas uniformemente na superfície interna, onde as bobinas são dispostas. A maneira como os enrolamentos são construídos determina o número de polos do motor, e outras características operacionais do motor. Os finais desses enrolamentos são levados até a caixa de ligação, onde estão localizados os terminais de ligação com a rede do motor. A Figura 5 apresenta uma construção comum de um estator.

Figura 5 - Estator

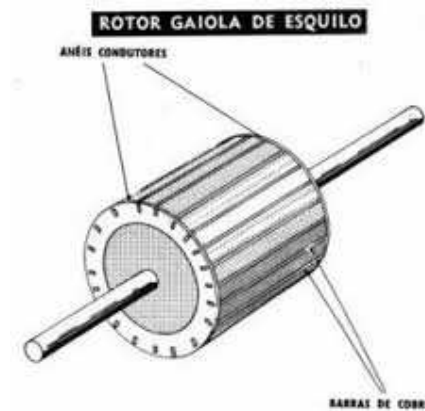


Fonte: Augusto Júnior e Amorim Filho (2007)

2.1.3 Rotor

É constituído, também, de um núcleo laminado de material magnético, formado pelo empilhamento das lâminas cortadas no formato cilíndrico, com ranhuras próximas às superfícies externas, onde fica alojado o enrolamento. O enrolamento rotórico é constituído de barras condutoras de cobre ou alumínio, eletricamente conectadas em cada extremidade do rotor por meio de anéis de curto circuito. Por construção, o conjunto forma um curto circuito elétrico, desse modo, o rotor de gaiola não permite nenhum acesso elétrico ao enrolamento rotórico. Os motores utilizados neste trabalho são do tipo gaiola (Figura 6).

Figura 6 - Gaiola de esquilo



Fonte: Aleixo *et al.* (2007).

2.1.4 Princípios de funcionamento

Conforme Chapman (2013, p. 160) “Se correntes trifásicas, todas de mesma intensidade e defasadas de 120° entre si, estiverem fluindo em um enrolamento trifásico, um campo magnético girante de intensidade constante será produzido”. O funcionamento é baseado na formação do campo magnético girante, devido à aplicação de correntes alternadas e defasadas nos enrolamentos trifásicos do estator, os quais são espaçados de 120° elétricos entre si. Assumindo que as três correntes no estator são dadas pelas Equações 1, 2 e 3:

$$i_{aa'}(t) = I_m \text{sen } \omega t \text{ A} \quad (1)$$

$$i_{bb'}(t) = I_m \text{sen } (\omega t - 120^\circ) \text{ A} \quad (2)$$

$$i_{cc'}(t) = I_m \text{sen } (\omega t - 240^\circ) \text{ A} \quad (3)$$

E que cada corrente produz um campo magnético, representado pelos vetores:

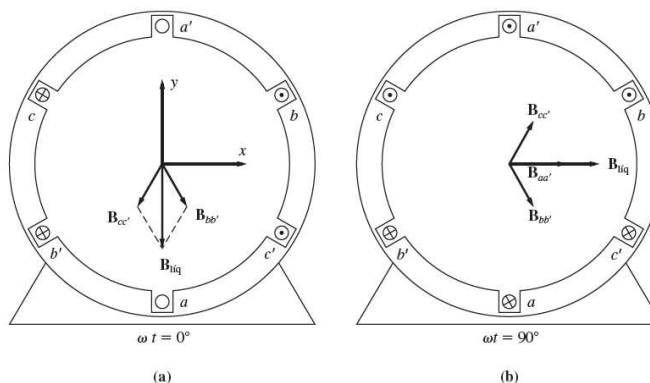
$$B_{aa'}$$

$$B_{bb'}$$

$$B_{cc'}$$

O campo magnético Líquido, $B_{líq}$ é mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Campo magnético resultante

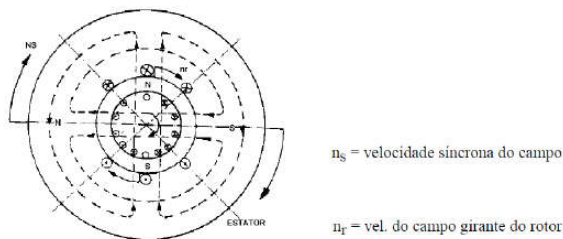


Fonte: Chapman (2013).

Na Figura 7, (a) mostra o vetor de campo magnético no estator para $\omega t = 0^\circ$, enquanto (b) para $\omega t = 90^\circ$.

“Embora o sentido do campo magnético tenha mudado, a intensidade manteve-se constante. O campo magnético gira em sentido anti-horário e sua intensidade permanece constante” (CHAPMAN, 2013, p. 163). O mesmo é válido para qualquer ωt , formando o campo magnético girante no estator.

Figura 8 - Campo girante e campo no rotor



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

A velocidade síncrona (n_s) é calculada pela Equação 4.

$$n_s = \frac{120 * f}{p} [\text{rpm}] \quad (4)$$

Sendo:

f = frequência em hertz

p = número de polos

É possível controlar a velocidade síncrona, e variar a frequência do rotor, manipulando ou o número de polos do motor ou variando a frequência, utilizando eletrônica de potência.

Segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006), esse campo magnético girante, segundo a lei de Faraday, induz tensões nas barras da gaiola de esquilo, que estão curtos-circuitadas através dos anéis, permitindo a circulação de correntes, da mesma natureza, porém de polaridade contrária, segundo a lei de Lenz. Com a circulação de correntes no rotor, é criado outro campo magnético girante, que será atraído pelo campo girante presente no estator, impondo um conjugado mecânico no rotor. O rotor gira a uma frequência (n), sempre inferior à velocidade síncrona (n_s) no caso de um motor, pois se o campo magnético do rotor fosse levado à mesma frequência do campo magnético do estator ($n = n_s$), não haveria velocidade relativa entre eles, e por consequência, cessariam as correntes no rotor devido à falta de tensão induzida. A diferença entre a velocidade síncrona e a do rotor é denominada velocidade de escorregamento. Assim, o escorregamento é dado pela Equação 5.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5)$$

2.2 PROCESSAMENTO DE SINAIS.

Sinais de corrente estatórica são medidos no domínio do tempo. Depois, a conversão analógico-digital é feita. O espectro de frequências da corrente estatórica é analisado usando alguma forma de análise espectral. Se o sinal medido $x(t)$ é representado por N amostras discretas, ele pode ser expresso como um somatório de N componentes senoidais de frequências ω .

A forma mais comum de análise espectral é por meio da utilização da FFT. Os conceitos necessários para aplicar essa ferramenta matemática serão abordados na seção a seguir.

2.2.1 Amostragem de sinais

Lathi (2007) apresenta o conceito definido por Nyquist, que um sinal real cujo espectro é limitado em faixa a B Hz [$X(\omega) = 0$ para $|\omega| > 2\pi B$] pode ser reconstruído, sem qualquer erro, de suas amostras tomadas uniformemente a uma taxa de $f_s > 2B$ amostras por segundo.

Para essa demonstração, o autor toma como exemplo um sinal $x(t)$, cujo espectro é limitado em B Hz. A amostragem de $x(t)$ em uma taxa de f_s Hz pode ser realizada multiplicando $x(t)$ por um trem de impulsos $\delta_T(t)$, constituído de impulsos unitários espaçados

periodicamente repetidos a cada T segundos, sendo $T = \frac{1}{f_s}$. O n ésimo pulso, localizado em $t=nT$, possui força $x(nT)$, o valor de $x(t)$ em $t=nT$.

$$\bar{x}(t) = x(t)\delta_T(t) = \sum_n x(nT)\delta(t - nT) \quad (6)$$

Como o trem de impulso $\delta_T(t)$ é um sinal periódico de período T , ele pode ser descrito por uma série trigonométrica de Fourier, conforme Equação 7.

$$\delta_T(t) = \frac{1}{T} [1 + 2 \cos(\omega_s t) + 2 \cos(2\omega_s t) + 2 \cos(3\omega_s t) + \dots] \quad (7)$$

Sendo:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_s \quad (8)$$

Logo,

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= x(t)\delta_T(t) \\ &= \frac{1}{T} [x(t) + 2x(t) \cos(\omega_s t) + 2x(t) \cos(2\omega_s t) + 2x(t) \cos(3\omega_s t) + \dots] \end{aligned} \quad (9)$$

A transformada de Fourier de $\bar{x}(t)$, $\bar{X}(\omega)$, é obtida a partir da aplicação da Transformada de Fourier ao lado direito da equação, termo a termo:

$$\bar{X}(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(\omega - \omega_s) \quad (10)$$

Se deseja-se reconstruir $x(t)$ de $\bar{x}(t)$, deve-se ser capaz de recuperar $X(\omega)$ de $\bar{X}(\omega)$. Essa recuperação é possível se não existir sobreposição entre ciclos sucessivos, ou seja, se $f_s > 2B$.

2.2.2 Transformada de Fourier: Definição e conceitos.

Haykin e Veen (2005) afirmam que a Transformada de Fourier (FT) é usada para representar um sinal não-periódico de tempo contínuo como uma superposição de senoides complexas. A representação FT de um sinal de tempo envolve uma integral de frequência,

conforme Equação 11.

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (11)$$

A transformada $X(j\omega)$ descreve o sinal $x(t)$ como uma função de frequência senoidal ω e é denominada representação de domínio de frequência para $x(t)$.

2.2.3 Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT)

A transformada de Fourier de tempo discreto (DTFT) é a transformada de Fourier de um sinal de tempo discreto. A equação resultante é um sinal contínuo no espectro da frequência e periódico.

Hayken e Veen (2005) demonstram que a transformada de Fourier de tempo discreto de um sinal discreto $x(n)$:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (12)$$

A transformada $X(e^{j\omega})$ descreve o sinal $X[n]$ como uma função de frequência senoidal Ω e é denominada representação no domínio da frequência de $x[n]$.

2.2.4 Transformada Discreta de Fourier (TDF)

A transformada discreta de Fourier (TDF) é uma versão amostrada da DTFT. É utilizada para calcular o espectro de frequência de um sinal de tempo discreto com o auxílio de um computador.

Lathi (2007) mostra que cálculos numéricos da transformada de Fourier de $x(t)$ necessitam de valores amostrados de $x(t)$, pois um computador digital pode trabalhar somente com dados discretos (sequência de números). Além disso, um computador pode calcular $X(j\omega)$ apenas para alguns valores discretos de ω [amostras de $X(j\omega)$]. Portanto, é necessário relacionar as amostras de $X(j\omega)$ com as amostras de $x(t)$. Essa tarefa pode ser realizada utilizando o teorema da amostragem, apresentado na seção 2.2.1.

Quando um sinal $x(t)$ é amostrado e, então, periodicamente repetido, o espectro correspondente também é amostrado e periodicamente repetido.

No domínio de espaço discreto, a equação é denominada Transformada Discreta de

Fourier (TDF), e é expressa pela Equação 13 (LATHI, 2007).

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N_a} x(n)e^{-jm\left(\frac{2\pi}{N_a}\right)n} \quad (13)$$

2.2.5 Transformada rápida de Fourier

O número de cálculos necessários para executar a TDF foi drasticamente reduzido por um algoritmo desenvolvido por Cooley e Tukey em 1965. Esse algoritmo, chamado de transformada rápida de Fourier (FFT), reduz o número de cálculos da ordem de N_0^2 para $N_0 \log N_0$. Para calcular uma mostra X_r da equação (Eq. Da DFT) são necessárias N_0 multiplicações complexas e $N_0 - 1$ somas complexas. Para calcular N_0 valores destes, precisamos de um total de N_0^2 multiplicações complexas e $N_0(N_0 - 1)$ somas complexas. Para um N_0 grande, esses cálculos podem consumir muito tempo, sendo proibitivos, mesmo em um computador muito rápido. O algoritmo de FFT é o que torna a DFT acessível para o processamento digital de sinais (LATHI, 2007).

Devido à linearidade da FT e DFT, pode-se calcular a transformada de Fourier de um sinal $x(t)$ como a soma de transformadas de Fourier de segmentos $x(t)$ de duração mais curta (LATHI, 2007).

2.3 FERRAMENTAS DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS

2.3.1 Análise De Assinatura Da Corrente Elétrica

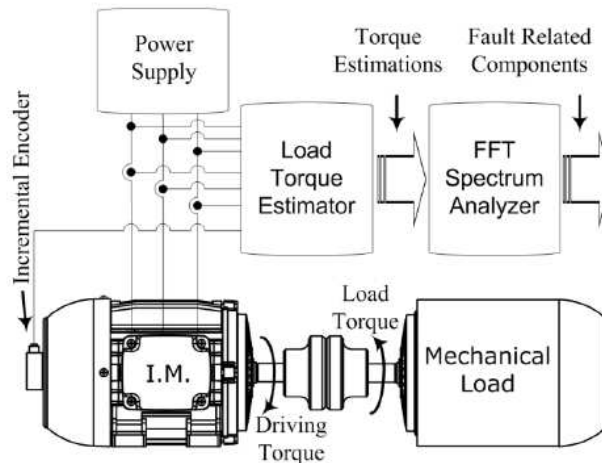
Motor Current Signature Analysis (MCSA) é uma valiosa ferramenta de manutenção preditiva para detectar falhas em seu início, evitando falhas mais graves. Essa ferramenta tem origem no início dos anos 70, com a ideia de ser utilizada em motores de restrito acesso em usinas nucleares. Os testes são feitos em tempo real, sem interromper a operação do motor, permitindo o planejamento para realizar as intervenções no momento mais apropriado. Apesar de ser uma tecnologia desenvolvida há algumas décadas, está cada vez mais ganhando espaço nas indústrias.

2.3.2 Técnica da Assinatura do Torque de Carga (LTSA)

O diagrama de blocos da Figura 9 demonstra a estrutura deste método, ele é simples e constituído por um estimador do torque de uma carga e um analisador do espectro FFT

(STOPA; CARDOSO FILHO, 2012).

Figura 9 - Diagrama de blocos do método LTSA



Fonte: Stopa e Cardoso Filho (2012).

O método LTSA se baseia na ideia de que a maior parte das falhas que ocorrem nas cargas irão causar vibrações e oscilações no torque que serão passadas para o motor, esses ruídos então poderão ser percebidos, na velocidade angular do motor e, também, na sua posição. Esses dados serão usados pela LTSA como variáveis de entrada para estimador de torque de carga, que irá utilizá-los para fazer uma reconstrução do sinal do torque de carga. Assim como no método MCSA, a LTSA irá usar uma FFT para encontrar os componentes do espectro relacionados à alguma possível falha (STOPA; CARDOSO FILHO, 2012).

Uma grande vantagem da técnica LTSA em relação a MCSA é que ela não está limitada pela banda de frequência da corrente do motor analisado. A MCSA é muito dependente desses limites, assim no emprego deste método e de um motor que tenha sua frequência de excitação fora destes limites, há dificuldade na detecção de falhas. Apesar disso, a MCSA tem uma vantagem em relação ao LTSA, por não ter a necessidade de outros equipamentos de medição que teriam que ser instalados diretamente na carga monitorada ou no motor. O MCSA funciona sem nenhum sensor mecânico, sendo necessário apenas um sensor para medição de correntes elétricas, o que normalmente já vem instalado em painéis de controle. Já o LTSA tem seu preço mais elevado, visto que o custo de um sensor para fazer a medição de torque, necessário para as medidas utilizadas neste método, é alto. Além deste sensor, o método necessita de outros equipamentos e um sensor de tensão, o que ajuda a aumentar ainda mais o seu valor já elevado (STOPA; CARDOSO FILHO, 2012).

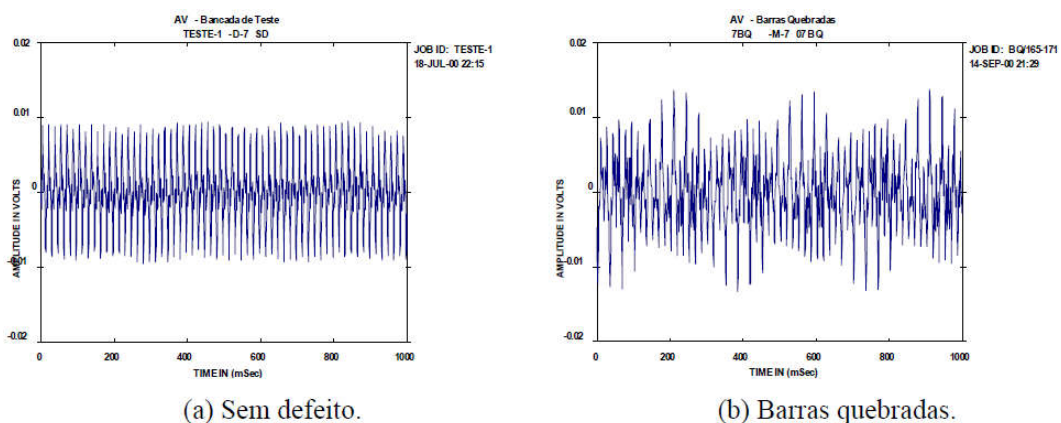
2.3.3 Técnica da Análise de Fluxo Magnético (FSA)

Apesar de ter sido estudada em pouca profundidade até o momento, a análise de fluxo magnético tem sido proposta como forma de monitoramento de máquinas (ROSA; SILVA, 2014).

Defeitos nos enrolamentos, no rotor e no rolamento causam uma alteração no fluxo magnético do motor. Estas alterações podem ser percebidas na análise do fluxo magnético do motor (ROSA; SILVA, 2011).

Barras quebradas ou trincadas em motores de indução provocam perturbações no fluxo magnético do MIT, o que causa uma variação da frequência mecânica do rotor da corrente elétrica. Analisando o fluxo magnético no interior do motor, pode-se perceber esta variação, conforme a Figura 10 (ROSA; SILVA, 2011).

Figura 10 - Exemplo da mudança detectada na densidade de fluxo magnético.



Fonte: Rosa e Silva (2011).

A FSA é mais sensível do que a MCSA, logo é mais adequada para a detecção de defeitos menos severos. Assim como na LTSA, a FSA encontra defeitos fora do espectro de corrente do motor (ROSA; SILVA, 2011). Além disso, a FSA é mais eficiente para detecção de defeitos no estator e no rotor, quando comparado aos outros métodos apresentados. (YAZIDI *et al.*, 2005).

2.4 MOTORES ESTUDADOS E SEUS DEFEITOS

Os motores estudados foram uma doação da empresa WEG motores e fabricados exclusivamente para UTFPR. Os cinco motores estudados são do mesmo lote e modelo, sendo que três deles possuem diferente tipos de defeitos, inseridos durante o processo de fabricação.

Os dois motores sem defeitos são rotulados como motores 1 e 2, os com defeitos são rotulados como motores 3, 4 e 5, onde:

- Motor 3: Simula um curto entre espiras. Durante o processo de bobinagem, foram retiradas 12 espiras de uma das bobinas da fase T (Figura 11). Isso representa uma redução de 4% no número de espiras de uma das fases, e provocou um desbalanceamento de 8,5% na corrente à vazio (segundo um ensaio experimental realizado pela Weg após a fabricação). Os valores das resistências por fase foram medidos pela Weg: Fase R 9,597 Ω ; Fase S 9,595 Ω ; Fase T 9,269 Ω .

Figura 11 - Falha na bobina da fase



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

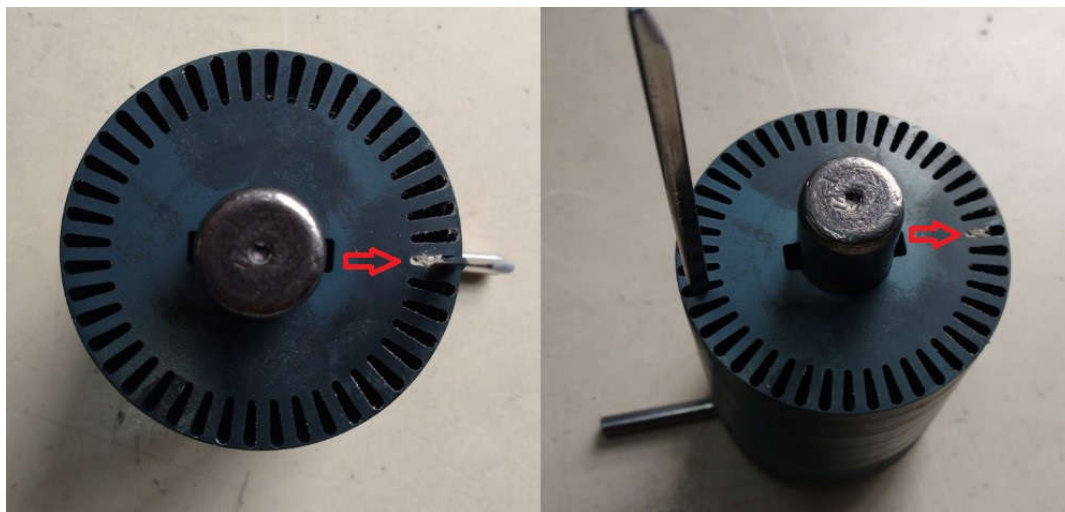
- Motor 4: Defeito na barra de alumínio do rotor. Foram fabricados dois rotores com defeitos nas barras. Em um rotor, uma barra é rompida por completo (Figura 12) e no outro rotor uma barra é rompida parcialmente (Figura 13). Para simular experimentalmente os defeitos, foi inserido um material não condutor e não magnético durante a fabricação. As fotos mostram os rotores antes da injeção de alumínio.

Figura 12 - Barra do rotor rompida por completo



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

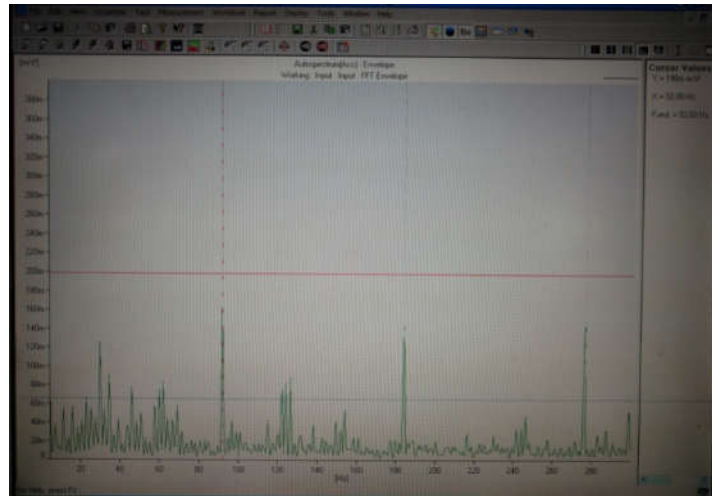
Figura 13 - Barra do rotor rompida parcialmente



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

- Motor 5: Possui um risco na pista externa do rolamento no sentido transversal do rolamento (sentido do eixo do motor). Este defeito causa um sinal no espectro da vibração na frequência de 91,565 Hz e seus múltiplos. Nas medições realizadas no laboratório da WEG, foi amostrado o sinal da Figura 14:

Figura 14 - Espectro de envelope – Vibração dianteira.



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

Segundo Castelli, Fossatti e Terra (2012), para determinar os defeitos usando a MCSA primeiramente deve-se conhecer o escorregamento do motor, que é necessário para encontrar a frequência característica que causará um componente harmônico na corrente. Este componente poderá ser visualizado na análise do espectro da corrente. A seguir são apresentadas algumas características de assinatura de corrente para motores que possuem os três tipos de defeitos presentes nos motores estudados.

2.4.1 Falha no Enrolamento (Motor 3)

As falhas mais comuns do estator de um motor são as falhas do enrolamento. Os componentes da corrente de motores de indução que estão com o enrolamento curto circuitado podem ser detectados em frequências descritas pela Equação 14 (MILIJKOVIĆ, 2015).

$$f_{st} = f_g \left[\frac{n(1-s)}{p} \pm k \right] \quad (14)$$

Sendo:

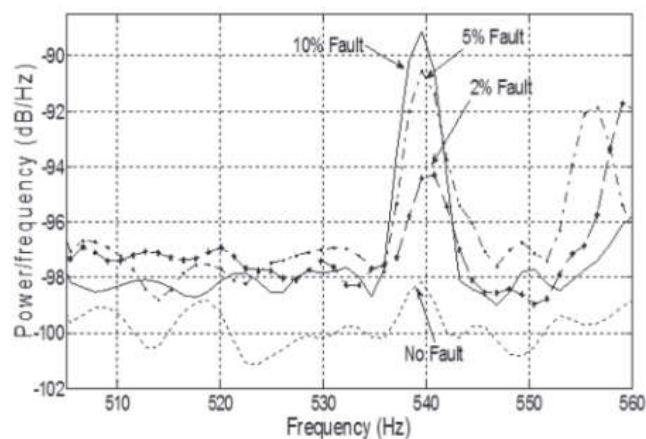
- f_{st} : frequência do enrolamento com curto-circuito
- f_g : frequência da fonte
- n : 1,2,3...

Quando se faz a análise MCSA em um motor de indução com problema no enrolamento espera-se encontrar três exemplos de espectros, a depender da carga conectada ao motor. São

estes: a vazio, a 75% de carga e a 85% de carga. Para a análise destes ensaios, utilizou-se motores com redução de 2%, 5% e 10% das bobinas de uma das fases (OVIEDO; QUIROGA; BORRÁS, 2011).

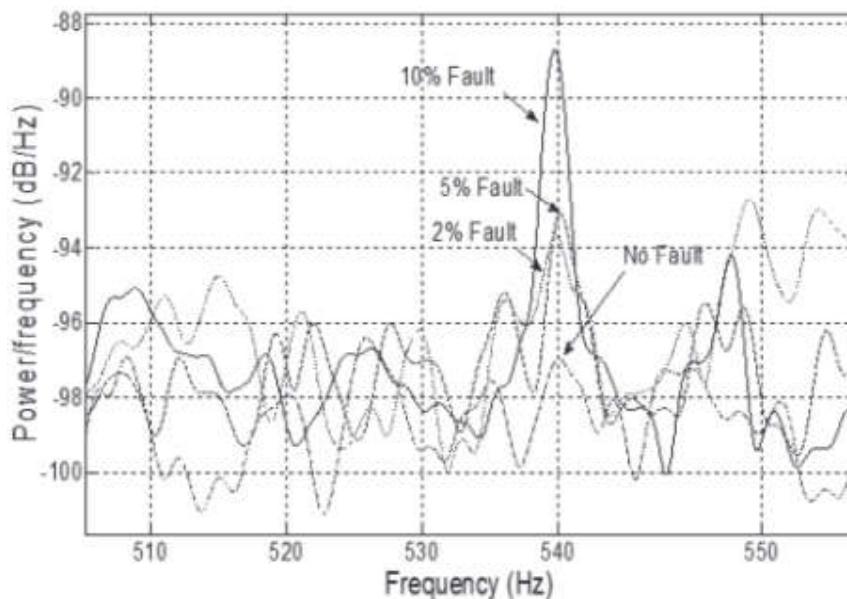
A Figura 15 mostra o ensaio a vazio. Nela, é possível identificar bandas laterais de frequência 540 Hz, de acordo com a faixa calculada no trabalho (de 0 Hz a 2500 Hz). Para analisar com mais detalhes, parte do espectro (de 500 Hz a 600 Hz) foi destacado. Nesta mesma figura, há o espectro de um motor sem defeitos, em operação, indicado por uma linha pontilhada no periodograma (OVIEDO; QUIROGA; BORRÁS, 2011).

Figura 15 – Periodograma Welch para motor à vazio



Fonte: Oviedo, Quiroga e Borrás (2011)

Figura 16 – Periodograma Welch para motor com 85% de carga



Fonte: Oviedo, Quiroga e Borrás (2011).

Finalmente, ajustou-se a carga do motor para 85% e constatou-se que, para a frequência entre 500Hz e 600Hz não é possível detectar as bandas laterais características do defeito (OVIEDO; QUIROGA; BORRÁS, 2011).

2.4.2 Barra do Rotor Falhada (Motor 4)

Uma das principais causas de defeitos no rotor é a aplicação de cargas mecânicas oscilantes ao eixo do motor. É possível detectar este tipo de falha analisando o espectro de frequência das correntes do estator. As prováveis frequências de ocorrência de bandas laterais características do defeito podem ser estimadas pela equação (MILIJKOVIĆ, 2015).

$$f_{brd} = f_g \left[\frac{k(1-s)}{p} \pm s \right] \quad (15)$$

Sendo:

- f_{brd} : Frequência da barra do rotor defeituosa
- f_g : Frequência da fonte
- p : número de pares de polos
- s : escorregamento por unidade

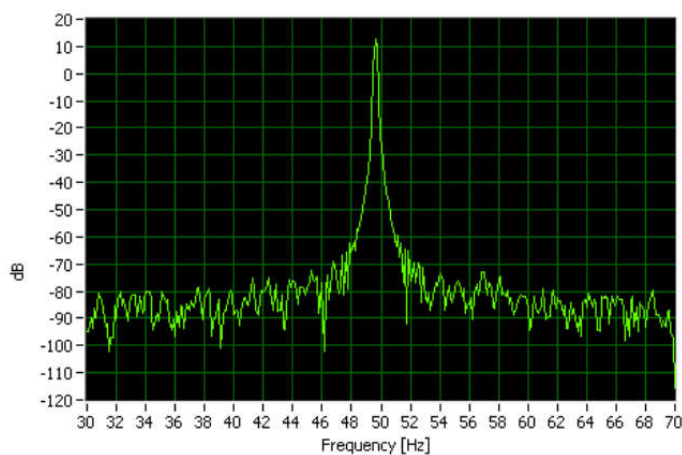
- $k= 1, 2, 3...$

Neelam (2016) mediu sinais de corrente em motores sem defeitos e em motores com barras quebradas no rotor. Foram feitos furos nas barras do rotor, para simular barras quebradas. Utilizou rotores com 1, 5 e 12 barras rompidas. Por fim, comparou os resultados dos motores sem defeitos com os motores defeituosos.

Frequências de banda lateral esquerda e direita são separadas pelo dobro da frequência de escorregamento $f_{slip}=s*f_g$, onde f_{slip} é a frequência de escorregamento, f_g é a frequência da rede e s é o escorregamento do motor. Geralmente, se a diferença de amplitude entre a componente principal (espectro de 60 Hz) e as bandas laterais é superior a 50 db, o rotor não apresenta defeitos. Um valor entre 40 e 50 db indicara uma barra quebrada, e uma diferença menor que 40 db indicaa várias barras defeituosas MILJKOVIC (2015).

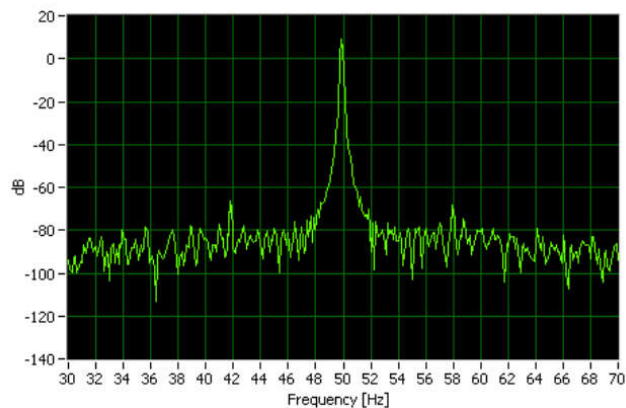
Nas figuras 17, 18, 19 e 20 percebe-se as componentes das frequências características do defeito de barras quebradas do rotor. Nota-se também que um maior número de barras quebradas do rotor gera maiores alterações no espectro de frequência da corrente do estator.

Figura 17 - Espectro para motor sem falhas



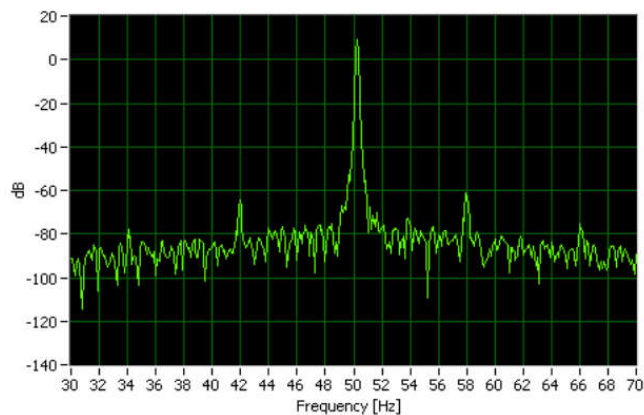
Fonte: Turk (2016).

Figura 18 - Espectro para motor com 1 barra do rotor quebrada com 100% de carga



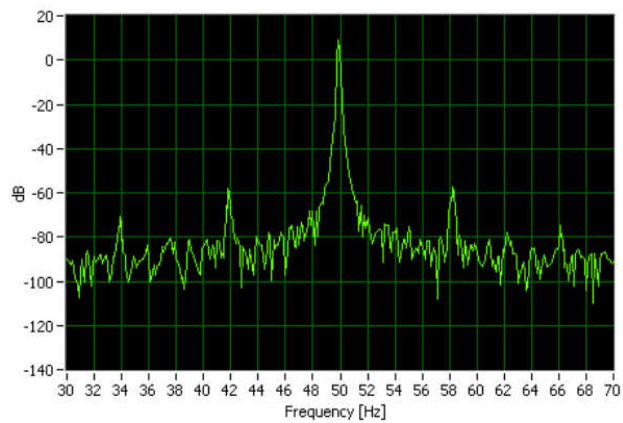
Fonte: Turk (2016).

Figura 19 - Espectro para motor com 5 barras do rotor quebradas com 100% de carga



Fonte: Turk (2016).

Figura 20 - Espectro para motor com 12 barras do rotor quebradas com 100% de carga



Fonte: Turk (2016).

As medições foram feitas em cada fase para 100% de carga. Os resultados das três fases foram muito similares, por isso só se apresentou uma delas.

2.4.3 Problema no Rolamento (Motor 5)

A detecção de problemas no rolamento costuma ser mais difícil do que problemas no rotor, pois existem 4 modos de falha típicos para o rolamento. O método MCSA permite identificar esses tipos de defeitos. O defeito analisado no motor 5 (defeito no rolamento) é modelado pelas Equações 16 e 17.

$$f_0 = 0,4 n \cdot f_{rm} \quad (16)$$

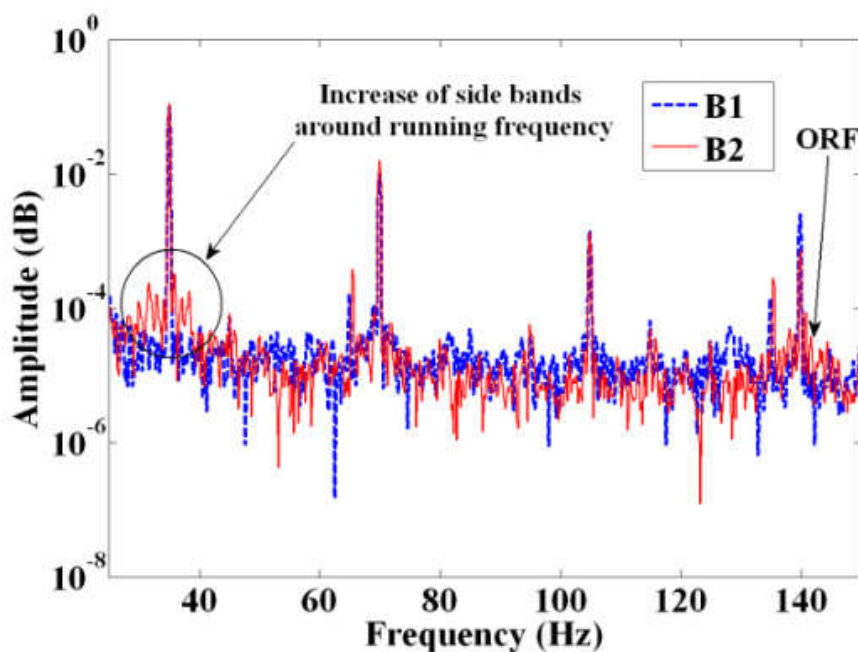
$$f_1 = 0,6 n \cdot f_{rm} \quad (17)$$

Sendo:

- f_0 : frequência inferior
- f_1 : frequência superior
- n número de bolas do rolamento
- f_{rm} : frequência mecânica do rotor

Singh et al (2014) destacam a similaridade entre os espectros de frequência de motores sem defeitos e motores com defeito no rolamento. A Figura 21 mostra que as amplitudes dos harmônicos de motores com defeito no rolamento são maiores do que as amplitudes dos harmônicos de um motor sem defeitos. Com isso, pode-se detectar problemas de rolamento.

Figura 21 - Espectro da corrente de um motor sem problemas (B1) e de um com problemas de rolamento (B2)



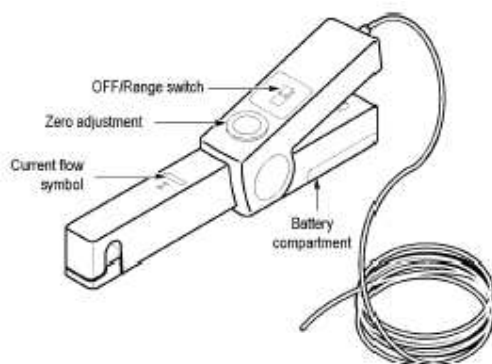
Fonte: Singh, A. Kumar e N. Kumar (2014).

2.5 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

2.5.1 Sonda de Corrente

Para fazer a análise da corrente, será usada a sonda A622 da marca Tektronix. Essa sonda quando conectada à um osciloscópio realiza a leitura de sinais de correntes alternada e contínua com seu pico em até 100 A.

Figura 22 - Sonda Tektronix



Fonte: TEKTRONIX. A622 100 Amp AC/DC Current Probe Instructions.

Fez-se a conexão da sonda ao osciloscópio e sua configuração: Escala de 10 mV/A, e é realizado o ajuste de canal do osciloscópio para melhorar a forma do sinal. Então, conecta-se a sonda ao circuito estudado, neste caso nos motores, para a obtenção dos dados.

2.5.2 Osciloscópio

O osciloscópio utilizado neste trabalho foi disponibilizado pela UTFPR, através do SEMAP. O fabricante é a Tektronix, série TDS1000B, largura de banda de 40 MHz 500 MS/s.

A função de amostragem utilizada neste trabalho obtém 2500 pontos de um sinal, e os grava um *pendrive* USB na forma de planilha eletrônica. O sinal amostrado é discreto no domínio do tempo, e pode ser processado por programas adequados.

A largura de banda indica a faixa de frequências na qual o osciloscópio pode medições com exatidão.

A taxa de amostragem (500 MS/s) define a velocidade em que o sinal é amostrado. É medido em mega amostras por segundo, para se diferenciar da largura de banda.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 DESCRIÇÃO DOS MOTORES

Os motores utilizados neste estudo foram fabricados e doados exclusivamente para a UTFPR pela Weg equipamentos elétricos S/A. São cinco motores idênticos e do mesmo lote de fabricação, com e sem falhas. Na Figura 23 são apresentadas algumas características dos motores utilizados.

Figura 23 - Catálogo WEG

Linha do produto	: W22 IR2 Trifásico	Código do produto :	11368627
Carcaça	: 80	Tempo de rotor bloqueado	: 14s (frio) 8s (quente)
Potência	: 0.75 kW (1 HP-cv)	Elevação de temperatura	: 80 K
Número de polos	: 4	Regime de serviço	: S1
Frequência	: 60 Hz	Temperatura ambiente	: -20°C a +40°C
Tensão nominal	: 220/380 V	Altitude	: 1000 m
Corrente nominal	: 3.02/1.75 A	Grau de proteção	: IP55
Corrente de partida	: 19.9/11.5 A	Método de refrigeração	: IC411 - TFVE
Ip/In	: 6.6	Forma construtiva	: B3D
Corrente a vazio	: 2.10/1.22 A	Sentido de rotação ¹	: Ambos
Rotação nominal	: 1730 rpm	Nível de ruído ²	: 48.0 dB(A)
Escorregamento	: 3.89 %	Método de partida	: Partida direta
Conjugado nominal	: 4.14 Nm	Massa aproximada ³	: 16.3 kg
Conjugado de partida	: 240 %		
Conjugado máximo	: 280 %		
Classe de isolamento	: F		
Fator de serviço	: 1.15		
Momento de inércia (J)	: 0.0032 kgm ²		
Categoria	: N		
Potência	50%	75%	100%
Rendimento (%)	77.5	80.0	80.5
Cos Φ	0.57	0.71	0.81
		Esforços na fundação	
		Tração máxima	: 291 N
		Compressão máxima	: 450 N

Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

Os motores são do modelo W22 IR2 trifásico, bobinas isoladas para operar em 220 V ou 380 V (Δ/Y) à 60 Hz. Eles possuem um fator de serviço de 1,15 ou seja, podem operar com uma sobrecarga de 15%. A corrente de partida, para estes motores, é 6,6 vezes maior do que a corrente nominal.

Para ter maior exatidão, aferiu-se a resistência de cada bobina pelo método indireto utilizando uma fonte de corrente contínua, os resultados obtidos constam na Tabela 1.

Tabela 1 – Resistência elétrica dos enrolamentos.

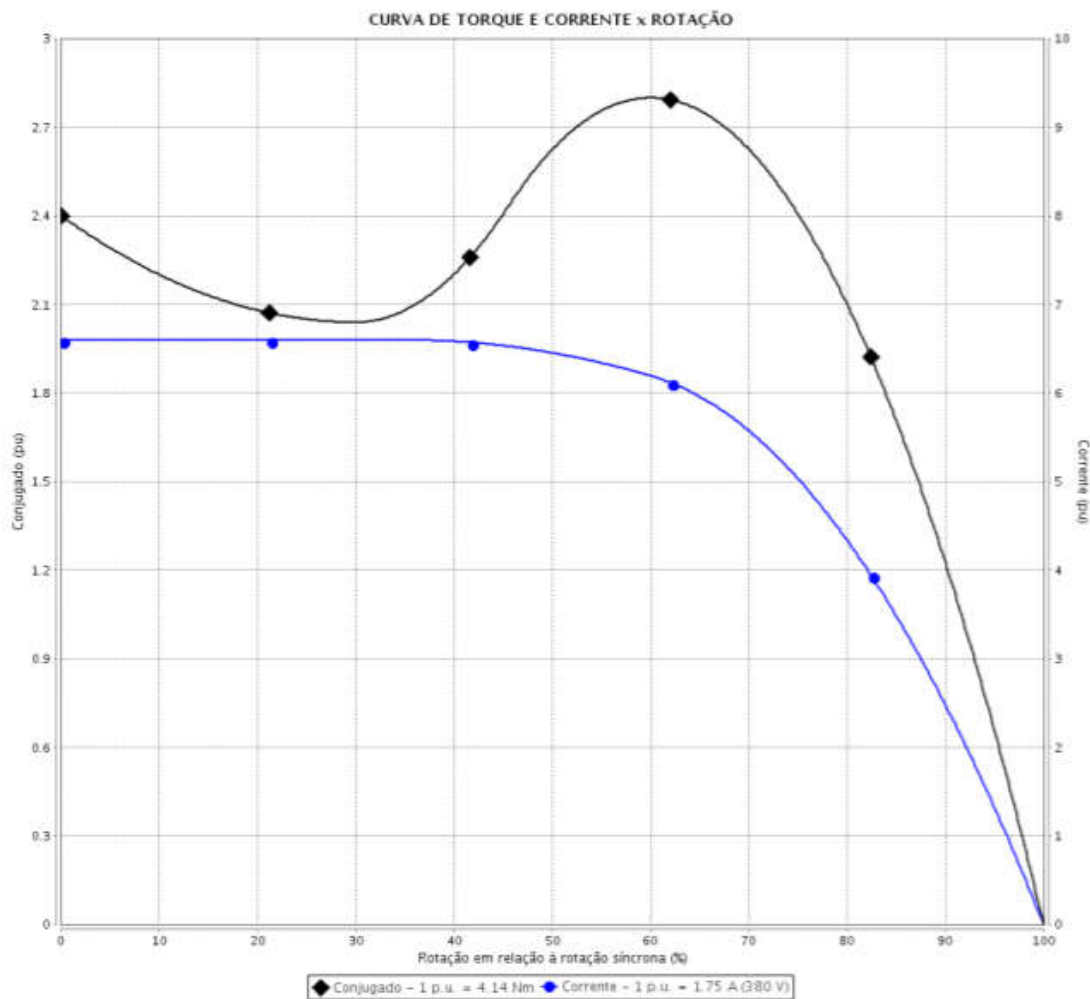
Motor	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Sem defeitos	10,06 Ω	10,00 Ω	9,98 Ω
Defeito no enrolamento	9,69 Ω	9,71 Ω	9,37 Ω
Defeito na barra do rotor	9,49 Ω	9,46 Ω	9,45 Ω

Fonte: Autoria própria (2019).

Como esperado, no motor com defeito no enrolamento há uma diferença maior no valor de resistência das fases.

Os motores possuem as curvas características conforme Figura 24.

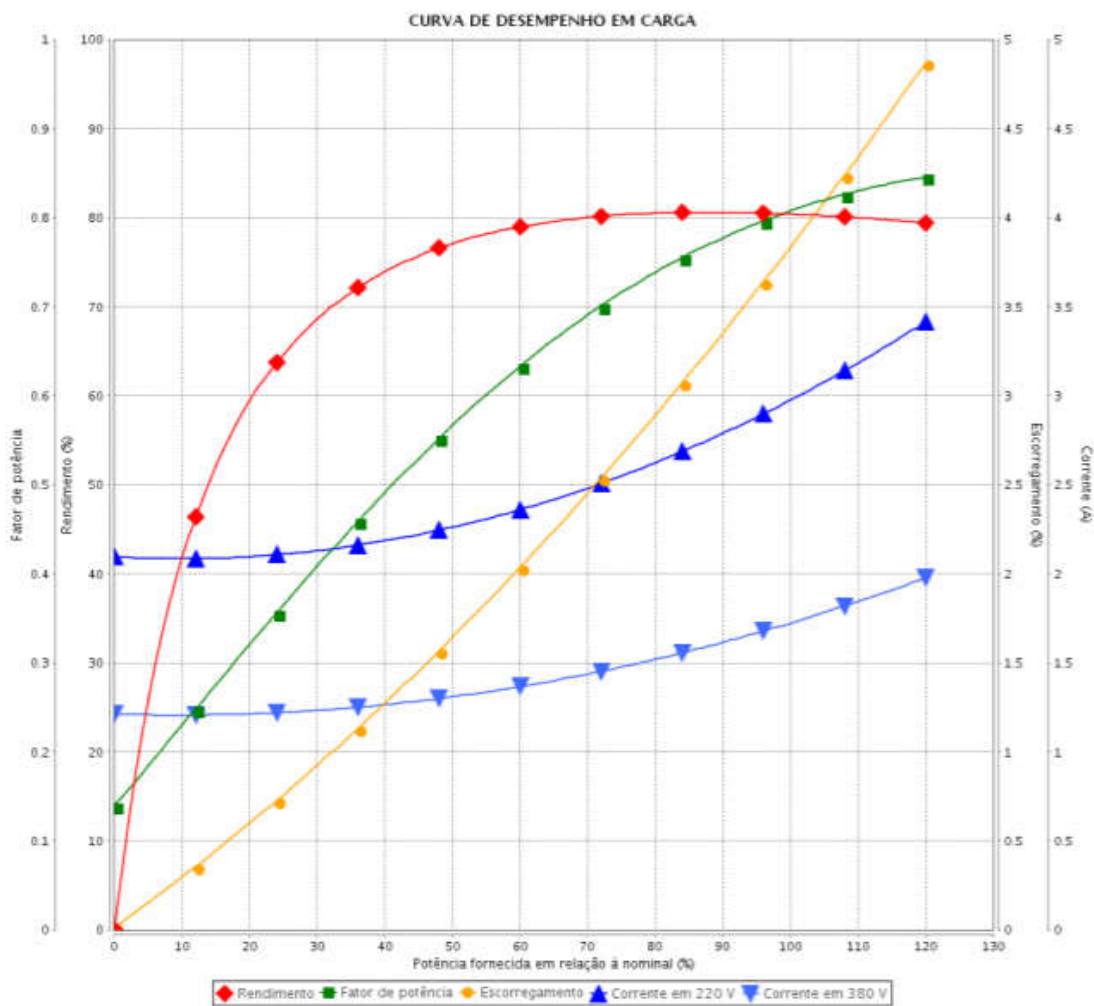
Figura 24 - Curva de torque e corrente x rotação



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

A curva em azul representa o módulo da corrente elétrica (por unidade) em função da rotação (percentual da nominal). Nota-se que a corrente de partida do motor, quando a rotação está entre 0% e 40%, é elevada e tem valor aproximado de 6,5 p.u. O módulo da corrente diminui com o aumento da velocidade de rotação do motor e atinge 1 p.u. próximo à velocidade nominal de operação. A curva em preto representa o conjugado (por unidade) desenvolvido pelo motor em função da rotação (percentual da nominal).

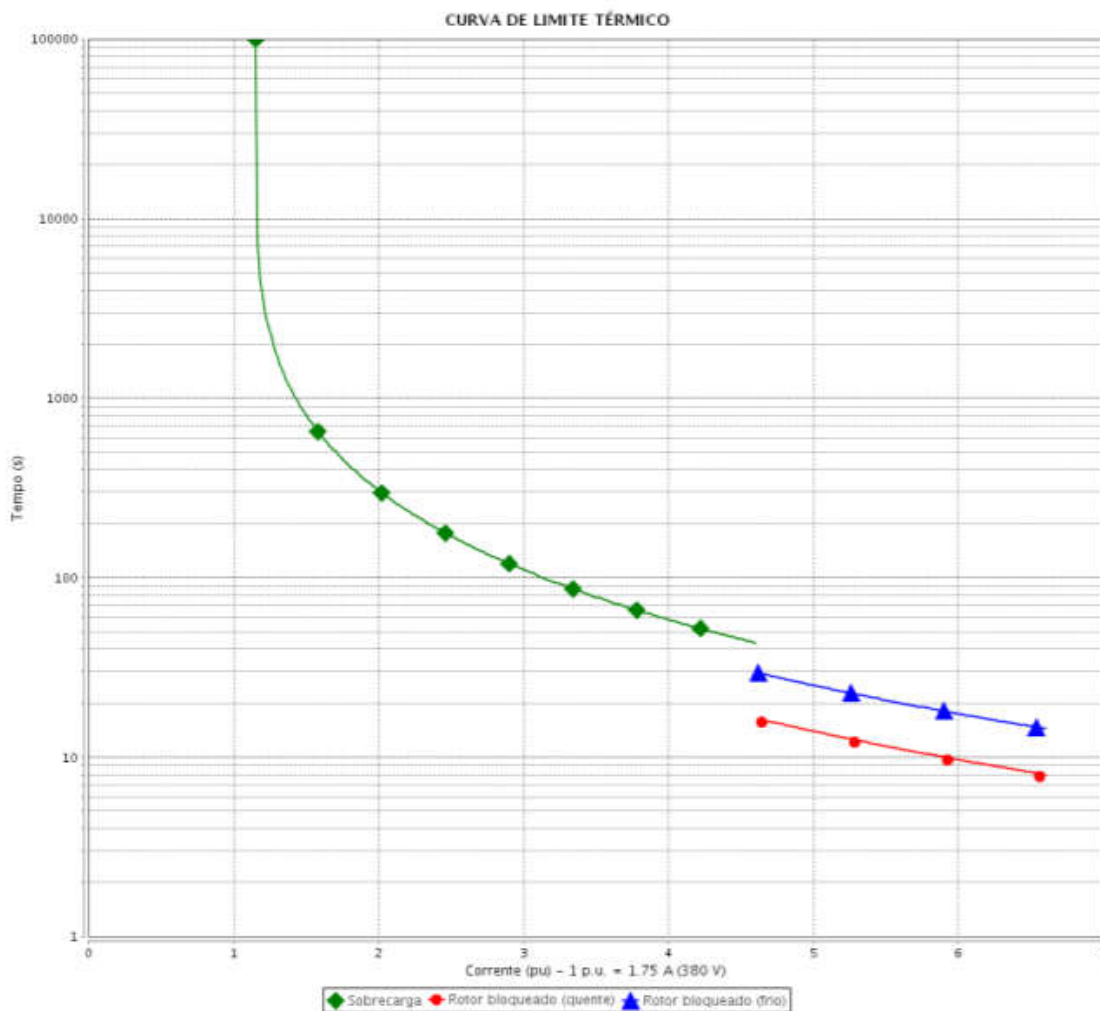
Figura 25 - Curva de desempenho em carga



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

A Figura 25 apresenta 5 curvas. A vermelha mostra o rendimento do motor com relação à potência fornecida. A verde o comportamento do Fator de Potência versus a potência fornecida. A amarela, o escorregamento do motor contra a potência fornecida e as duas azuis (claro e escuro) as correntes em 380 e 220 V, respectivamente, contra a potência fornecida.

Figura 26 - Curva de limite térmico



Fonte: Catálogo Weg W-22 (2018).

A curva mostra o tempo limite de operação do motor de acordo com a razão de sobrecarga que o motor está operando. Essa curva é importante para ajustar e dimensionar os relés de proteção do motor. Os relés devem estar configurados com curvas que passam aproximadamente 10% abaixo da curva de capacidade térmica nominal, idealmente.

A curva verde mostra a operação do motor em sobrecarga. Nota-se que não há limite de tempo de operação para valores abaixo da condição de sobrecarga, pois o motor operará sob condições nominais. A curva vermelha mostra a condição de rotor bloqueado para o motor quente, situação na qual o tempo máximo que o motor suporta, sem sofrer danos aos enrolamentos, é de 8 segundos. A curva azul mostra a condição de rotor bloqueado para o motor frio, onde tempo máximo que o motor suporta, sem sofrer danos é de 14 segundos.

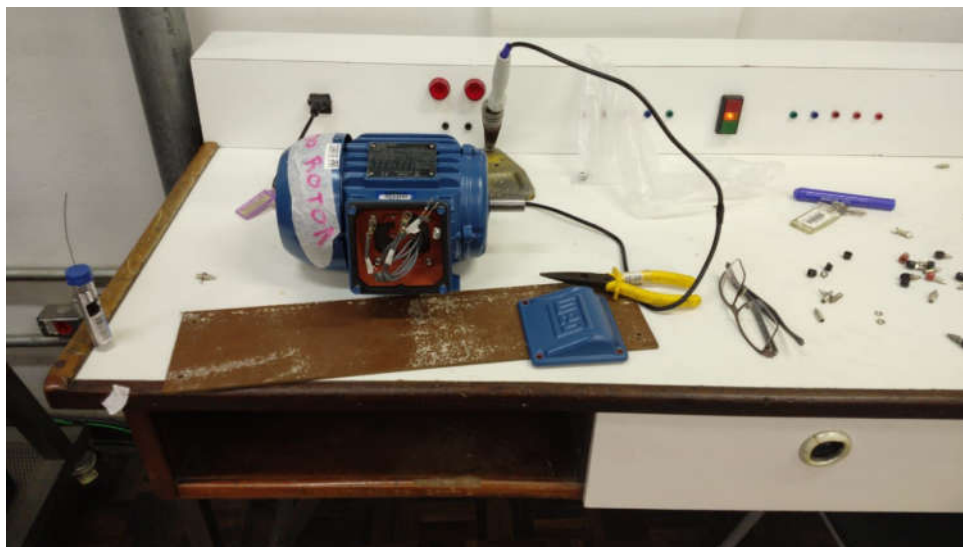
3.2 ADAPTAÇÕES DOS MOTORES E BANCADA EXPERIMENTAL

3.2.1 Adaptação dos motores

Inicialmente os motores estavam sem os conectores adequados para que fossem energizados.

Terminais banana-banana do tipo fêmea foram soldados às terminações das bobinas. Placas de acrílico foram manufaturadas para permitir fácil acesso aos terminais das bobinas e garantir uma conexão segura e estável.

Figura 27 - Soldagem dos terminais



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 28 - Resultado do preparo dos motores



Fonte: Autoria própria (2019).

3.2.2 Adaptação do módulo experimental

Após realizada a adaptação dos motores, foi desenvolvido o módulo experimental (Figura 29), composta por um dos motores participantes do trabalho, atuando como máquina primária, e outro motor, atuando como máquina secundária. Os motores foram fixados à uma placa de compensado e os eixos acoplados por meio de um acoplador, feito em liga de alumínio.

Figura 29 - Módulo Experimental



Fonte: Autoria própria (2019).

Por fim, chegando à bancada completa dos experimentos (Figura 30).

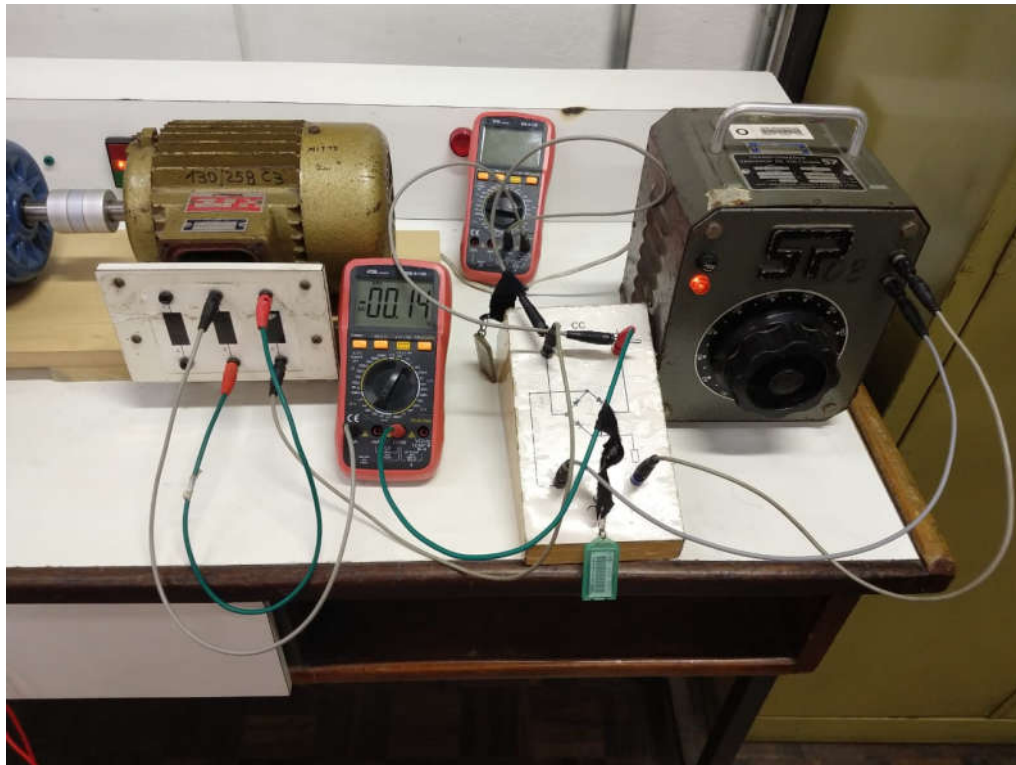
Figura 30 - Bancada dos experimentos

Fonte: Autoria própria (2019).

3.2.3 Máquina secundária e freio magnético

Quanto mais próxima a plena carga opera a MIT, melhor é aplicação da FFT na análise da assinatura de corrente. Devido a limitações das instalações da universidade e o escopo deste trabalho, simulamos uma situação mais próxima à plena carga o possível, onde a corrente do motor é próxima à nominal (3,02 A em delta). Como a máquina secundária a vazio não oferecia carga suficiente para chegar à plena carga, aplicamos corrente contínua em duas bobinas da máquina, utilizando um variac monofásico e uma ponte retificadora, de forma a formar um eletroímã em duas das fases do estator e oferecer maior carga, em uma configuração apresentada na (Figura 31). Apesar de a máquina secundária utilizada não ter sido projetada para dissipar toda a potência da máquina primária, apresentando elevações de temperatura durante os experimentos, tomaram-se medidas para evitar danos à máquina secundária, medidas como intervalar os experimentos, deixar a máquina secundária resfriar deixando rodar livremente e curto tempo de aplicação do freio magnético.

Figura 31 - Freio magnético



Fonte: Autoria própria (2019).

A máquina secundária possui os parâmetros conforme Figura 32.

Figura 32 - Dados de placa máquina secundária



Fonte: Autoria própria (2019).

Motor modelo 80 trifásico, bobinas isoladas para operar em 220 V ou 380 V (Δ/Y) à 60 Hz. Fator de serviço de 1,15 ou seja, pode operar com uma sobrecarga de 15%. A corrente de

partida, para este motor, é 6,8 vezes maior do que a corrente nominal.

3.3 FERRAMENTA PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Para analisar os dados amostrados pelo osciloscópio, foi necessário desenvolver e implementar um código no matlab que tem a função de gerar os gráficos com as assinaturas do espectro de corrente de cada um dos motores estudados (Apêndice A).

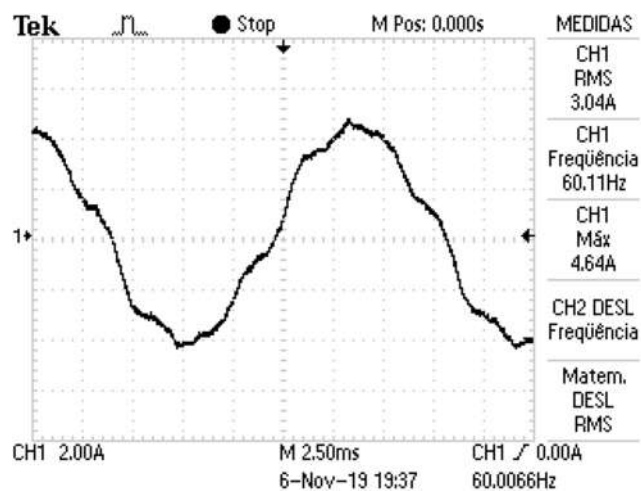
4 RESULTADOS

Para analisar os resultados para cada tipo de falha diferente foram feitos dois ensaios: motor em carga nominal e motor a vazio. Estes resultados serão comparados com o motor de referência que não possui defeitos.

4.1 MOTOR SEM DEFEITOS

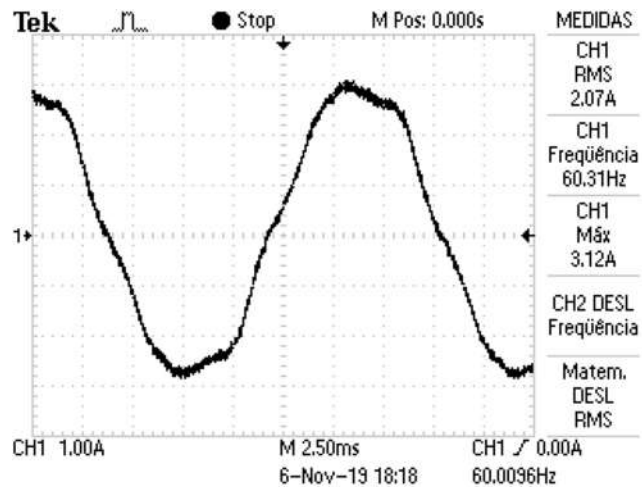
Um dos motores sem defeitos fornecido pela WEG foi ensaiado em duas situações, com carga e sem carga. A Figura 33 mostra a forma de onda no domínio do tempo para o ensaio com carga. A Figura 34 mostra a forma de onda no domínio do tempo para o ensaio a vazio.

Figura 33 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga. Motor sem defeitos, fase 2



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 34 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio a vazio. Motor sem defeitos, fase 2



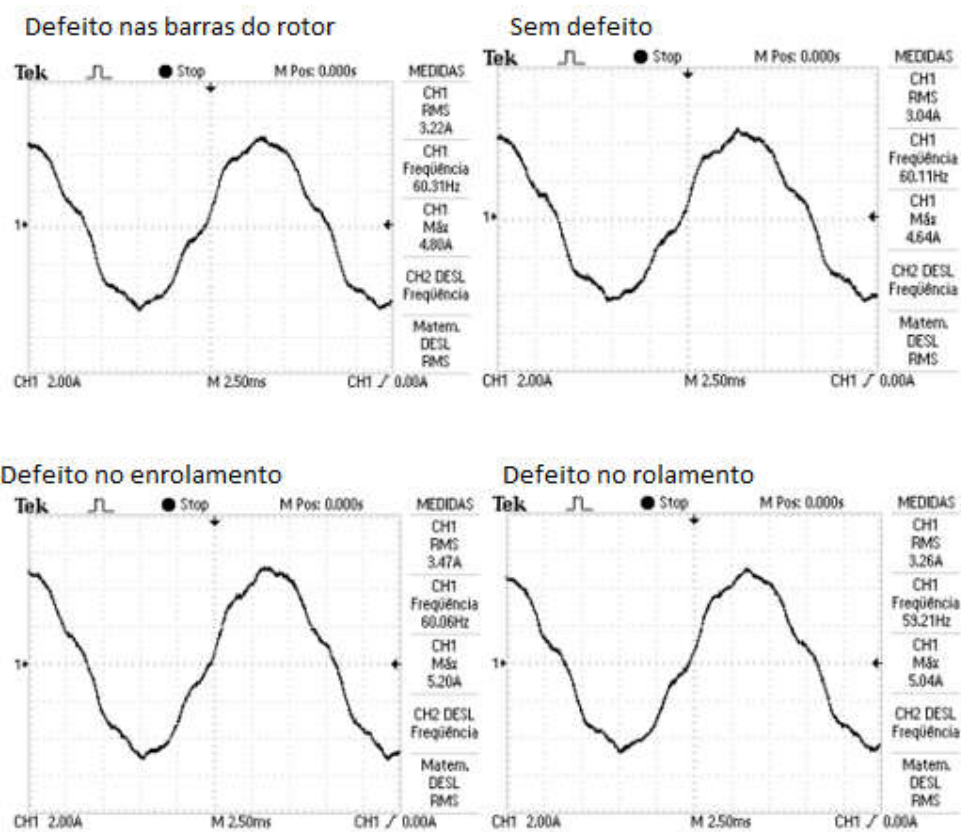
Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se que a forma de onda para o motor sem defeitos é não linear, e apresenta pequenas distorções devido à aspectos construtivos e perdas internas.

A Figura 35 mostra as formas de onda dos 3 motores defeituosos e o motor sem defeitos para o ensaio com carga, lado a lado.

Figura 35 - Painel com as formas de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga. Todos os motores, fase

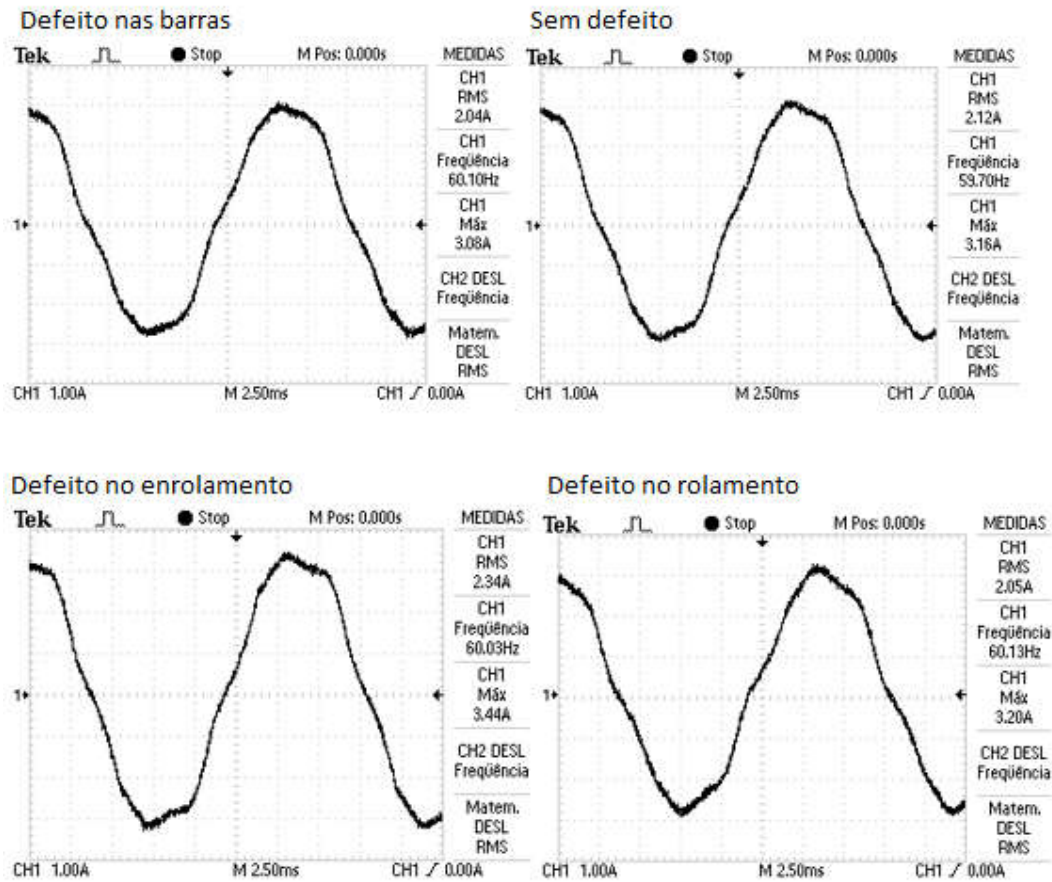
2



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 36 mostra as formas de onda dos 3 motores defeituosos e o motor sem defeitos para o ensaio a vazio, lado a lado.

Figura 36 - Paineis com as formas de onda no domínio do tempo. Ensaio a vazio. Todos os motores, fase 2



Fonte: Autoria própria (2019).

Comparando a forma de do motor sem defeitos no domínio do tempo com os demais motores defeituosos, para as duas configurações de carga, não é possível identificar os defeitos presentes nos motores. Por isso, há a necessidade de avaliar os motores individualmente no domínio da frequência.

4.2 MOTOR COM DEFEITO NO ENROLAMENTO

Para os valores de constantes considerados relevantes para a detecção do defeito no enrolamento, calculou-se as frequências de ocorrência de bandas laterais conforme Equação 18.

$$f_{st} = f_g \left[\frac{n(1-s)}{p} \pm k \right] \quad (18)$$

Sendo:

f_{st} é a frequência da banda lateral característica do defeito de enrolamento;

fg é a frequência da rede elétrica de alimentação do motor;

s é o escorregamento do motor;

p é o número de pares de polos;

k e n são parâmetros da modelagem do defeito;

A partir da equação, obteve-se a Tabela 2.

Tabela 2 – Frequências das bandas laterais, defeito no enrolamento.

	k=1	
	n=3	n=5
f_{ccbd} (Hz)	146,5	204,165
f_{ccbe} (Hz)	26,5	84,165

Fonte: Autoria própria (2019).

Sendo:

f_{ccbd} é a frequência da banda lateral direita de curto-circuito;

f_{ccbe} é a frequência da banda lateral esquerda de curto-circuito;

k e n são parâmetros do modelo de defeito de curto-circuito;

As frequências de ocorrência de bandas laterais foram calculadas para os valores de constantes considerados relevantes para a detecção do defeito no enrolamento em motores de 2 e 4 polos.

A Tabela 3 mostra as grandezas medidas para o ensaio realizado com carga nominal.

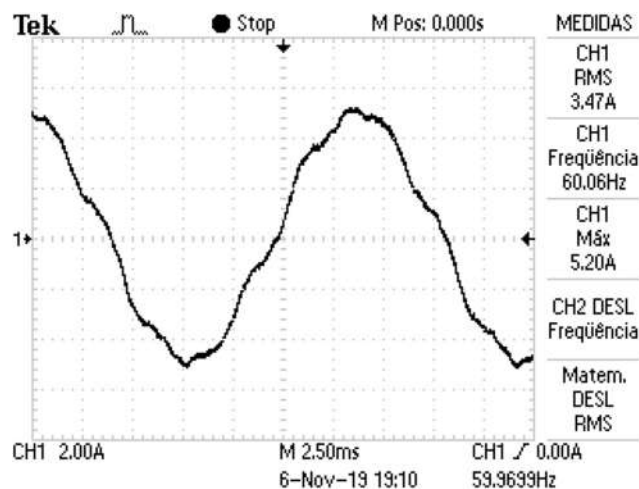
Tabela 3 – Grandezas medidas no ensaio com carga, defeito no enrolamento.

Defeito no rolamento	
Rotação (RPM)	1751
Ifase (A)	3,47
Vfase (V)	220

Fonte: Autoria própria (2019).

—A Figura 37 mostra o sinal amostrado pelo osciloscópio no ensaio com carga.

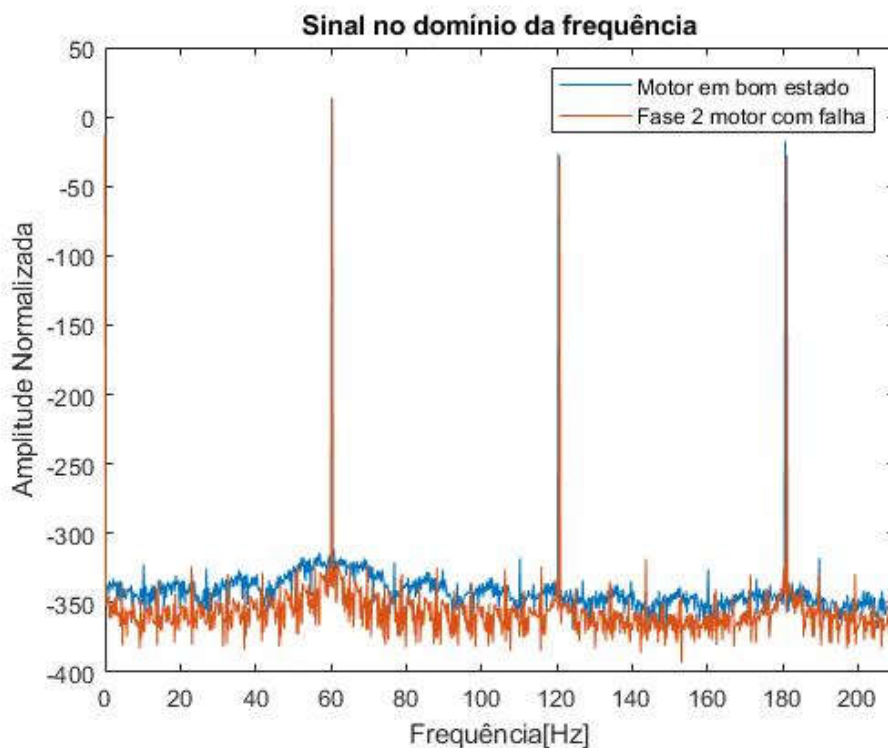
Figura 37 – Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga. Motor com defeito no enrolamento, fase 2



Fonte: Autoria própria (2019).

O resultado da análise da fase 2 pelo programa elaborado no Matlab do ensaio com carga é mostrado na Figura 38.

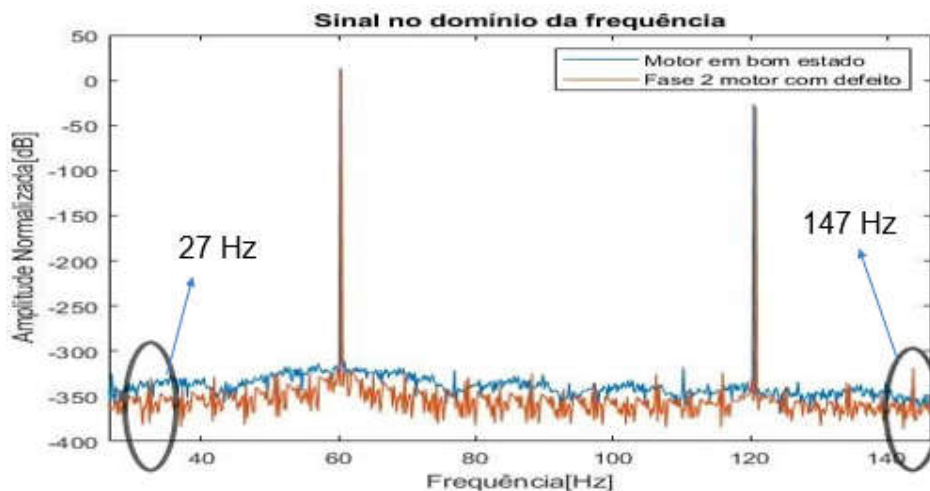
Figura 38 - Espectro de frequência para o defeito no enrolamento. Ensaio com carga, fase 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

Destacou-se as prováveis frequências de ocorrência de bandas laterais características ao defeito no enrolamento. A Figura 39 mostra os resultados para a fase 2 no ensaio com carga.

Figura 39 - Espectro de frequência ampliado para o defeito de enrolamento. Ensaio com carga, fase 2.

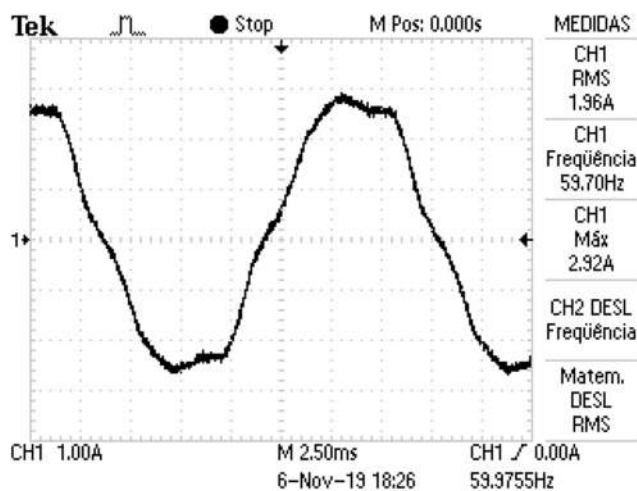


Fonte: Autoria própria (2019).

As frequências de 27 Hz e 147 Hz apresentam picos de frequência, porém não se pode concluir que a presença dessas bandas laterais indica o defeito no enrolamento, visto que as amplitudes desses picos são menores ou iguais aos demais picos de frequência, presente em todo o espectro analisado.

A Figura 40 mostra o sinal amostrado pelo osciloscópio para o ensaio à vazio:

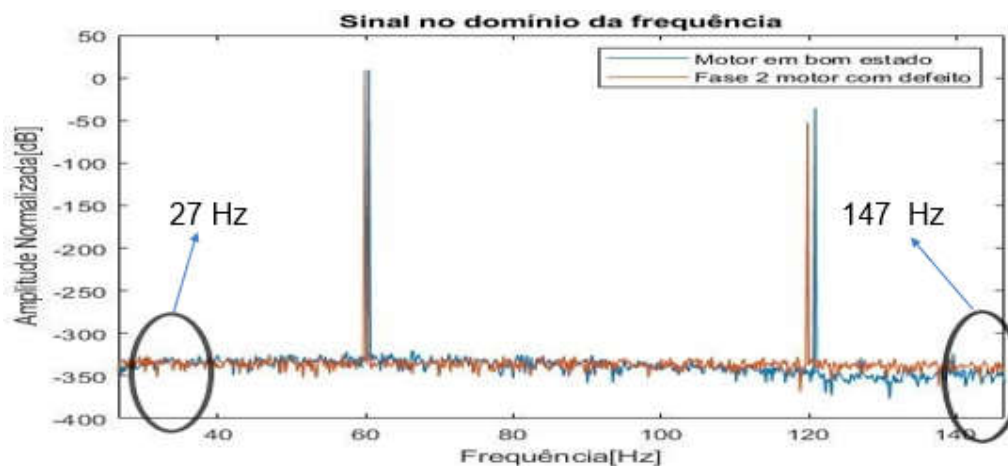
Figura 40- Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio a vazio, fase 2 do motor com defeito no enrolamento.



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 41 mostra o resultado da análise da fase 2 para o ensaio a vazio:

Figura 41 - Espectro de frequência ampliado para o defeito de enrolamento. Ensaio a vazio, fase 2



Fonte: Autoria própria (2019).

As frequências de 27 Hz e 147 Hz não apresentam picos de frequência relevantes. Não se pode concluir que há defeito no enrolamento. Há pequenos picos de amplitude em todo o espectro analisado.

4.3 MOTOR COM DEFEITO NAS BARRAS DO ROTOR

Substituindo as variáveis na equação:

$$f_{brd} = f_g \left[\frac{k(1-s)}{p} \pm s \right] \quad (19)$$

Sendo:

f_{brd} é a frequência de barra quebrada direita;

f_{bre} é a frequência de barra quebrada esquerda;

K é parâmetro da modelagem do defeito de curto circuito;

p é o número de pares de polos do motor;

s é o escorregamento do motor;

obtem-se as prováveis frequências das bandas laterais para o defeito de barras quebradas, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Frequências do defeito de barras quebradas

	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
f_{brd} (Hz)	31	60	89	118	146
f_{bre} (Hz)	26	55	84	113	142

Fonte: Autoria própria (2019).

A Tabela 5 mostra as grandezas medidas durante o ensaio realizado com carga nominal:

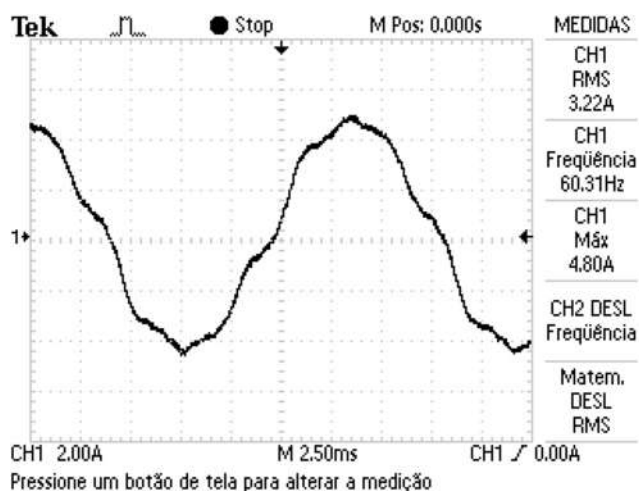
Tabela 5 – Grandezas medidas no ensaio com carga, barras quebradas.

Defeito no rolamento	
Rotação (RPM)	1754
Ifase (A)	3,22
Vfase (V)	220

Fonte: Autoria própria (2019).

—A Figura 42 mostra o sinal amostrado pelo osciloscópio no ensaio com carga.

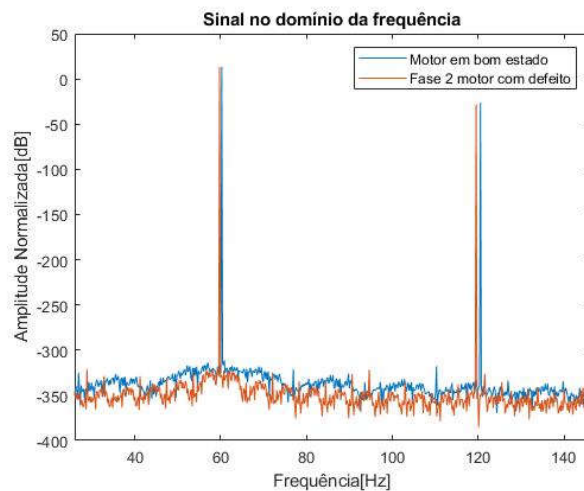
Figura 42 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga, fase 2 do motor com defeito nas barras do rotor



Fonte: Autoria própria (2019).

O resultado da análise da fase 2 pelo programa elaborado no Matlab do ensaio com carga é mostrado na Figura 43.

Figura 43 - Espectro de frequência para o defeito nas barras do rotor. Ensaio com carga, fase 2

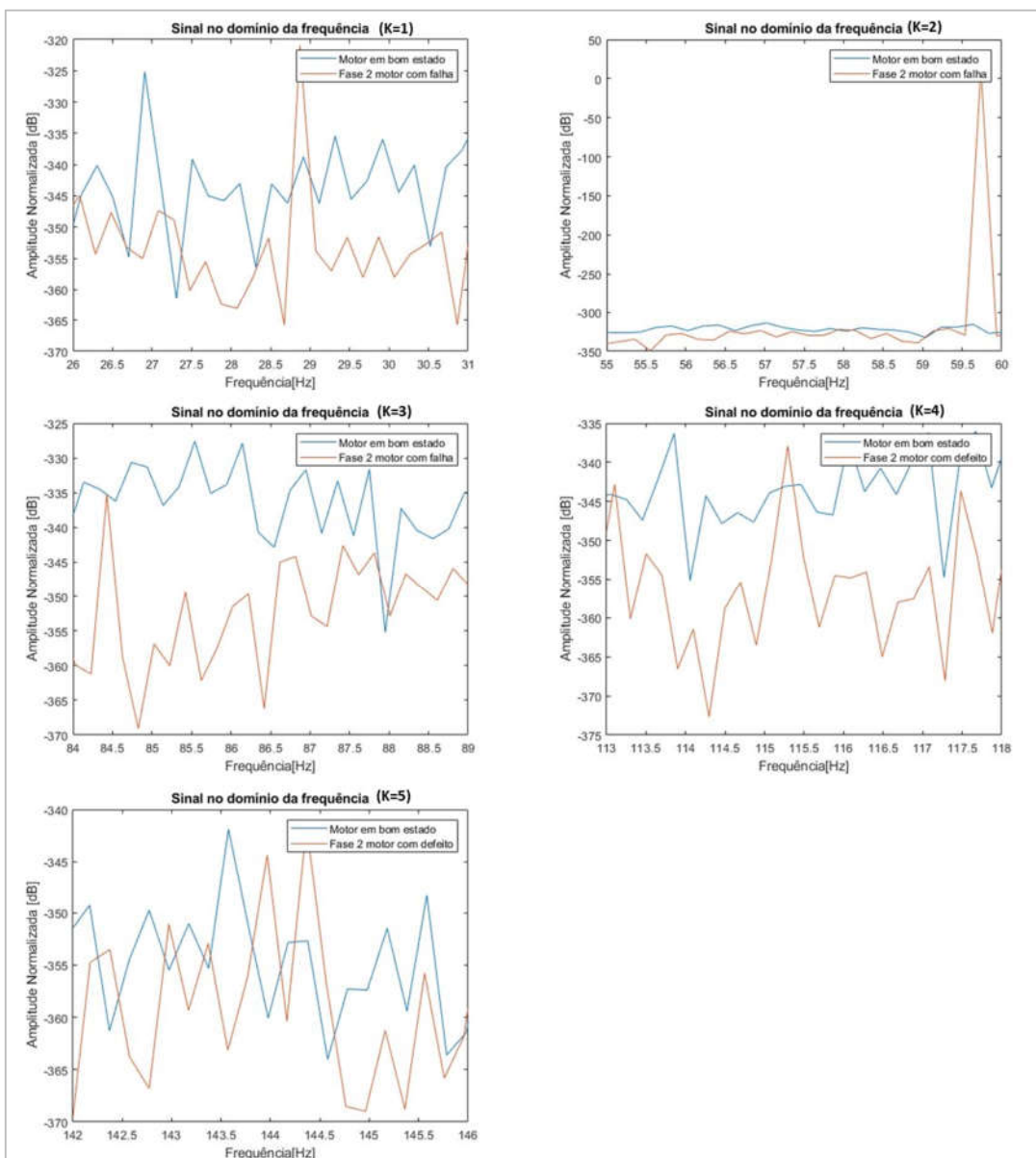


Fonte: Autoria própria (2019).

Destacou-se as prováveis frequências de ocorrência de bandas laterais características ao defeito nas barras do rotor. A Figura 44 mostra os resultados para a fase 2 no ensaio com carga.

Figura 44 - Espectro de frequência ampliado para o motor com defeito nas barras. Ensaio com carga, fase

2

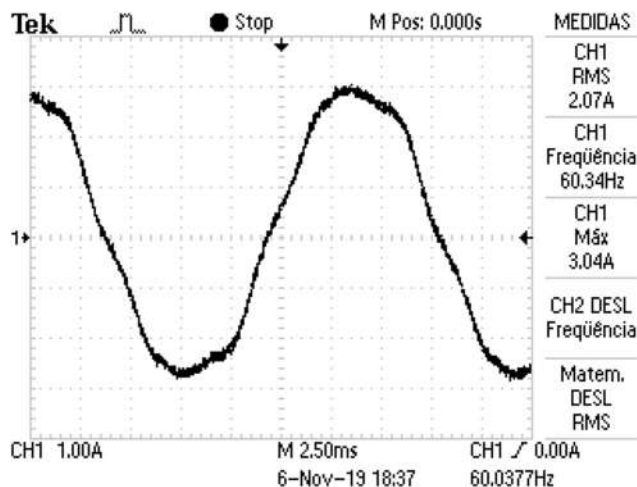


Fonte: Autoria própria (2019).

Neste defeito, deve-se analisar os espectros de frequência para os cinco valores do parâmetro K. Os resultados para o ensaio de carga são divergentes entre si. Para alguns valores de K, há picos de amplitude consideráveis, enquanto os outros sequer apresentam componentes na frequência especificada. Há vários picos de frequência em todo o espectro de corrente deste ensaio, todos irrelevantes para o diagnóstico do defeito em questão.

A Figura 45 mostra o sinal amostrado pelo osciloscópio no ensaio a vazio.

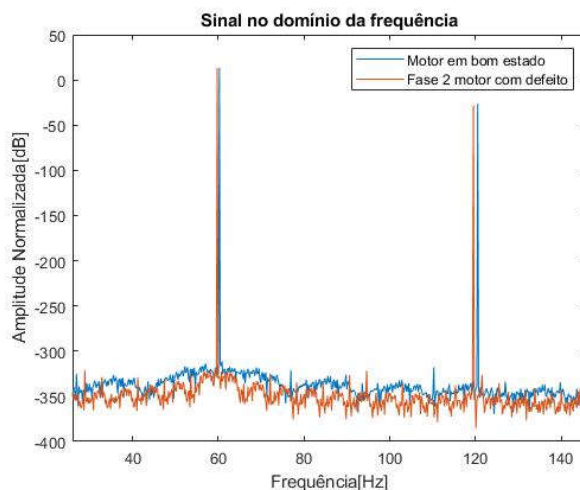
Figura 45 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga, fase 2 do motor com defeito nas barras do rotor



Fonte: Autoria própria (2019).

O resultado da análise da fase 2 pelo programa elaborado no Matlab do ensaio a vazio é mostrado na Figura 46.

Figura 46 – Espectro de frequência para o defeito nas barras do rotor. Ensaio a vazio, fase 2

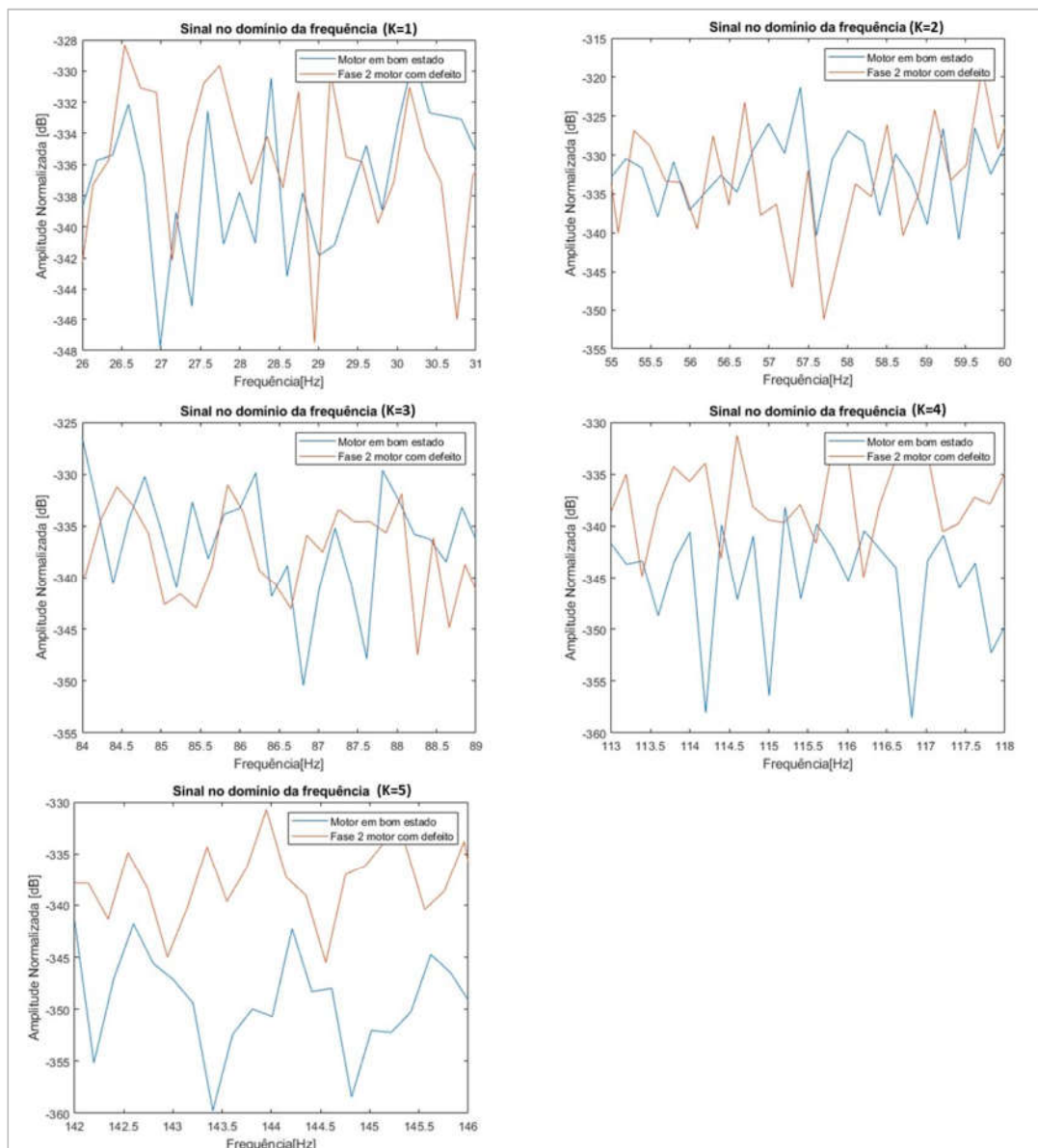


Fonte: Autoria própria (2019).

Destacou-se as prováveis frequências de ocorrência de bandas laterais características ao defeito nas barras do rotor. A Figura 47 mostra os resultados para a fase 2 no ensaio a vazio.

Figura 47 - Espectro de frequência ampliado para o motor com defeito nas barras. Ensaio com carga, fase

2



Fonte: Autoria Própria (2019).

Novamente deve-se analisar os espectros de frequência para os cinco valores do parâmetro K. Os resultados para o ensaio a vazio são inconclusivos. Não há picos de amplitude relevantes nas frequências esperadas. Há vários picos de frequência em todo o espectro de corrente deste ensaio, todos irrelevantes para o diagnóstico do defeito em questão.

4.4 MOTOR COM DEFEITO NO ROLAMENTO

As frequências prováveis das bandas laterais para defeito no rolamento são dadas pelas Equações 20 e 21.

$$f_0 = 0,4 n \cdot f_{rm} \quad (20)$$

$$f_1 = 0,6 n \cdot f_{rm} \quad (21)$$

Sendo:

- f_0 : frequência inferior
- f_1 : frequência superior
- n número de bolas do rolamento
- f_{rm} : frequência mecânica do rotor

A partir da equação, obteve-se a Tabela 6.

Tabela 6 – Frequências das bandas laterais para o defeito de rolamento.

	f_0 (Hz)	f_1 (Hz)
6 esferas	70	105
8 esferas	94	140
12 esferas	140	210

Fonte: Autoria Própria (2019).

A Tabela 7 mostra as grandezas medidas durante a realização do ensaio com carga nominal.

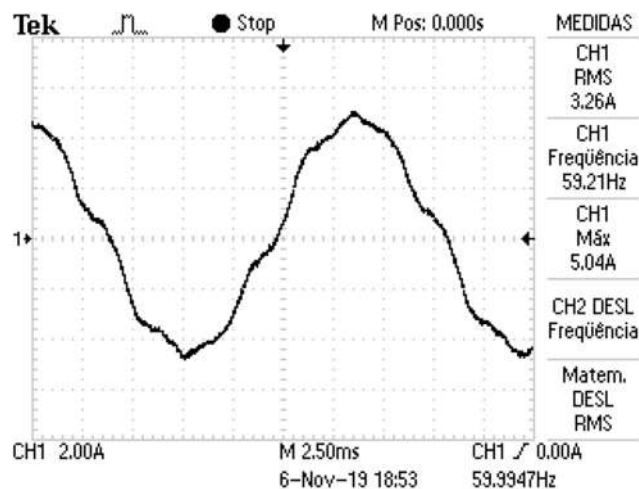
Tabela 7 – Grandezas medidas no ensaio com carga, defeito no rolamento.

Defeito no rolamento	
Rotação (RPM)	1753
$I_{f\grave{a}se}$ (A)	3,26
$V_{f\grave{a}se}$ (V)	220

Fonte: Autoria Própria (2019).

A Figura 48 mostra o sinal amostrado pelo osciloscópio para o ensaio com carga:

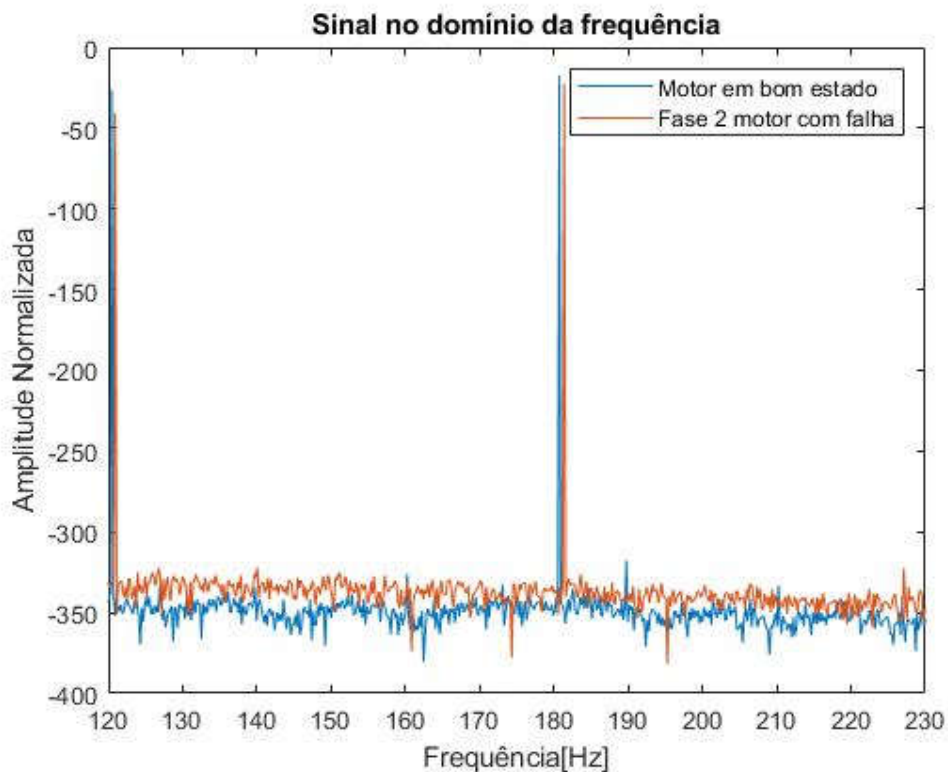
Figura 48 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio com carga, fase 2 do motor com defeito no rolamento.



Fonte: Autoria Própria (2019).

O resultado da análise da fase 2 do ensaio com carga é mostrado na Figura 49.

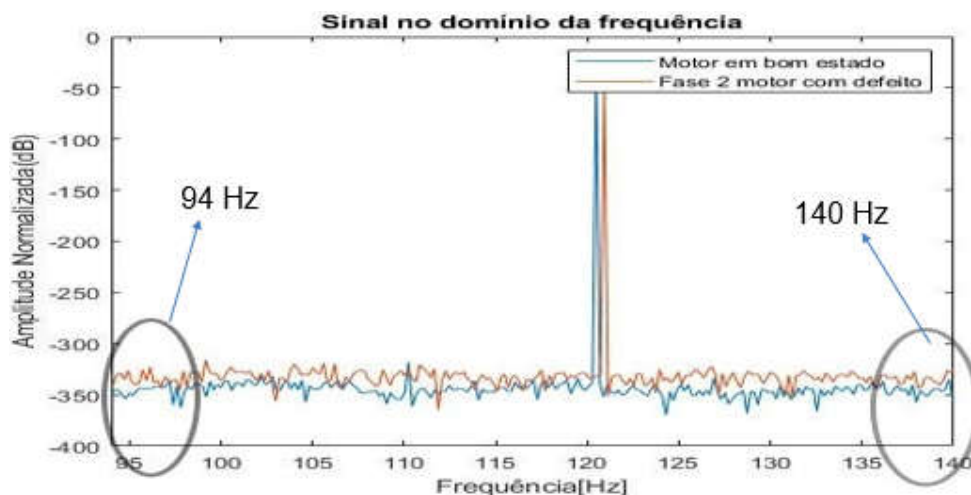
Figura 49 - Espectro de frequência para o defeito no rolamento. Ensaio com carga, fase 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando a frequência de bandas laterais para rolamentos com 8 esferas no ensaio com carga, tem-se os resultados obtidos na Figura 500.

Figura 50 - Espectro de frequência ampliado para o defeito no enrolamento. Ensaio com carga, fase 2.

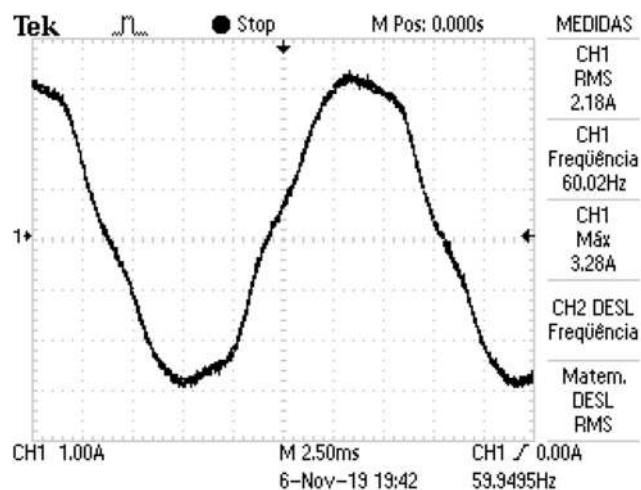


Fonte: Autoria própria (2019).

As frequências de 94 Hz e 140 Hz apresentam picos de frequência, porém não se pode concluir que a presença dessas bandas laterais indica o defeito no rolamento, visto que as amplitudes desses picos são menores ou iguais aos demais picos de frequência, presente em todo o espectro analisado.

A Figura 51 mostra o sinal amostrado pelo osciloscópio para o ensaio a vazio, fase 2 do motor com defeito no rolamento.

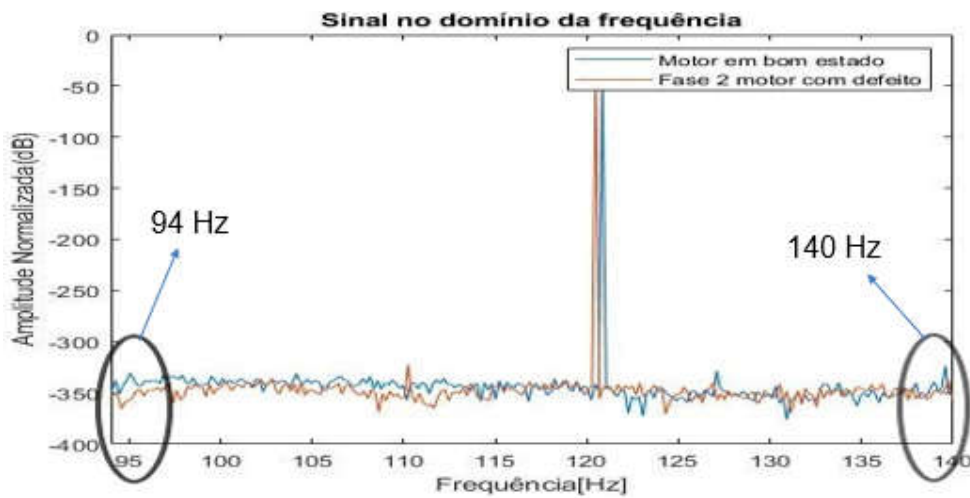
Figura 51 - Forma de onda no domínio do tempo. Ensaio a vazio, fase 2 do motor com defeito no rolamento.



Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando a frequência de bandas laterais para rolamentos com 8 esferas no ensaio a vazio, tem-se a Figura 52.

Figura 52 -Espectro de frequência ampliado para o defeito no enrolamento. Ensaio a vazio, fase 2.



Fonte: Autoria própria (2019).

As frequências de 94 Hz e 140 Hz não apresentam picos de frequência relevantes. Não se pode concluir que há defeito no rolamento. Há pequenos picos de amplitude em todo o espectro analisado.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso propôs a utilização de uma metodologia para detectar defeitos em motores de indução trifásico pela técnica de análise da assinatura de corrente. A detecção de defeitos precocemente permite que o planejamento da equipe de manutenção seja otimizado, programando as ações de reparo e ordens de serviço de maneira que não ocorram paradas não programadas. Possíveis danos patrimoniais substanciais também são evitados, visto que o defeito pode ser corrigido antes que se torne uma falha e incapacite o equipamento de realizar as suas funções especificadas.

A montagem da bancada experimental foi construída de forma artesanal. O alinhamento dos eixos da máquina primária e do motor de carga foi feito da melhor forma possível sem a utilização de técnicas aplicadas na indústria.

O freio magnético utilizado para simular a carga no eixo dos motores era suficiente para simular uma situação próxima a plena carga. Os valores de torque e potência elétrica calculados com os dados coletados chegam próximos aos valores de placa do motor, evidenciando a efetividade do método utilizado.

O defeito de enrolamento (curto circuito entre espiras da mesma bobina), defeito de barras quebradas do rotor e defeito no rolamento foram estudadas pela bibliografia de autores relevantes ao contexto, e as frequências prováveis de ocorrência de bandas laterais foram calculadas.

Cada motor, cada um com seu defeito específico, foi ensaiado individualmente em duas configurações distintas, em um primeiro ensaio, à vazio (sem carga) e em outro ensaio com carga (próxima à plena carga). As formas de onda foram capturadas e analisadas, com o auxílio do *software Matlab*, nos domínios do tempo e da frequência.

Para o defeito de enrolamento, cujo números de espiras foi reduzido propositalmente durante a sua fabricação, os resultados da fase analisada do ensaio com carga apresentaram todas as bandas laterais próximas à frequência esperada de ocorrência. O ensaio à vazio não apresentou bandas laterais evidentes para nenhuma das fases.

Para o defeito nas barras do rotor não foi possível identificar as bandas laterais de frequência esperada em cada um dos intervalos calculados. No ensaio à vazio, os sinais apresentam divergência na presença das bandas laterais, o que comprova a recomendação de utilizar o método de análise espectral em motores operando em condições de carga próxima à nominal. Não se pode afirmar que o motor apresenta defeitos nas barras do rotor analisando somente o espectro de frequência em questão.

Para o motor com defeito no rolamento a análise espectral não foi conclusiva. A análise do ensaio com carga apresentou apenas algumas das bandas laterais esperadas, enquanto o ensaio à vazio não apresentou qualquer banda lateral esperada. Conforme esperado, o defeito de rolamento é o mais difícil de ser detectado pela técnica de análise espectral da corrente do estator. O equacionamento utilizado para o defeito de rolamento neste trabalho foi baseado em modos de falha de rolamento diferentes do presente no motor ensaiado.

Desta forma, fica evidente que a detecção de falhas em motores de indução trifásicos pela técnica de análise de assinatura de corrente pode ser um tanto quanto complicada de ser realizada. Apesar do trabalho ter sido realizado com motores idênticos e que tinham defeitos inseridos de forma proposital, durante a fabricação, a detecção destes defeitos através do método da assinatura de corrente não foi conclusiva. Embora a análise bibliográfica indique as frequências das prováveis ocorrências de bandas laterais, os resultados foram inconclusivos. Além disso, ficou evidente que estas assinaturas são extremamente influenciadas pela carga a qual os motores em análise estão submetidos. Uma possível explicação é que os ensaios podem não ter sido realizados de forma ideal para este tipo de análise. No próximo parágrafo serão apresentados, também, algumas melhorias que podem tornar este método mais conclusivo.

Como trabalho futuro, pode-se propor:

- Amostrar diferentes períodos para se obter todas as informações dos sinais que, talvez, estejam sendo suprimidos quando um só período é amostrado.
- Escolha de outro método para se aplicar e controlar a carga dos motores sob teste;
- Utilizar um osciloscópio com maior largura de banda para que um maior número de pontos do sinal de corrente seja amostrado, para melhorar a visualização das bandas laterais nas frequências calculadas;
- Estudo das diferenças das assinaturas em cada uma das três fases para o mesmo motor;
- Ensaio dos motores com maior amplitude de carga aplicado ao seu eixo;
- Emprego de técnicas de tratamento do sinal analisado, como filtros de frequência, para melhor evidenciar as assinaturas dos defeitos;
- Emprego de outras técnicas de detecção de falhas em motores de indução trifásicos como: análise de vibração, assinatura da corrente de fuga, assinatura térmica etc.

REFERÊNCIAS

ALEIXO, Alison Santos *et al.* **Ensaio a vazio e de rotor bloqueado de um motor de indução com e sem tratamento HVOF**. 2014. 11 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São José dos Campos, 2014.

AUGUSTO JÚNIOR, Norberto; AMORIM FILHO, Teodoro M. **Motores Trifásicos de Indução**. [Notas de aula]. São Paulo: Faculdade de Engenharia de São Paulo, 2007.

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 *et al.* Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n. 12, p. 4109-4126, dez. 2008.

BONNETT, Austin. Root Cause Methodology for Induction Motors: A step-by-step Guide to Examining Failure. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 18, n. 6, p. 50-62, dec 2012.

BUCH JUNIOR, Antonio Carlos; GRUNEWALDER, Marcos. **Desenvolvimento de um concentrador de dados via software elipse scada para ensaio de desempenho em usina termoeletrica** – estudo de caso. 2013. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Comercial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CASTELLI, Marcelo; FOSSATTI, Juan Pablo; TERRA, Jose Ignacio. Fault Diagnosis of Induction Motors Based on FFT. **Fourier Transform - Signal Processing**, Montevideo, v. 11, n. 11, p.157-182, 11 abr. 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/fourier-transform-signal-processing/fault-diagnosis-of-induction-motors-based-on-fft>. Acesso em: 25 jun. 2019.

COOLEY, James W.; TUKEY, John W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. **Mathematicsof Computation**, v. 19, n. 90, p.297-302, abr. 1965.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt>>. Acesso em: 24 jun. 2019.

ESPINOSA, Antonio Garcia *et al.* Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, v. 55, n. 2, p.633-643, fev. 2008.

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

HAYKIN, Simon; VEEN, Barry Van.; **Sinais e Sistemas**. 1 ed. Rio De Janeiro: Bookman, 2005.

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**, v. 39, n. 5, p. 1272-1279, set/out. 2003.

KAR, Chinmaya; MOHANTY, A. R. Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. **Mechanical Systems And Signal Processing**, v. 20, n. 1, p.158-187, jan. 2006.

KORDE, Aditya. On-line condition monitoring of motors using electrical signature analysis. **Recent Advances in Condition-based Plant Maintenance**. Mumbai, mai. 2002. Disponível em: http://www.powersight.com/FILES/APPLICATION_NOTES/Online%20Condition%20Monitoring%20of%20Motors.pdf. Acesso em: 11 nov. 2019.

LATHI, BhagawandasPannalal. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2 ed. São Paulo: Bookman, 2007.

LEANDRO, Erik *et al.* Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors. **Induction Motors - Modelling and Control**, 14 nov. 2012.

MABROUK, Abd Elhamid; ZOUZOU, Salah. Diagnosis of rotor faults in three-phase induction motors under time-varying loads. **IEEE 10th International Symposium On Diagnostics For Electrical Machines, Power Electronics And Drives (sdemped)**, Guarda, set. 2015.

MILJKOVIĆ, Dubravko. **Brief review of motor current signature analysis**. Zagreb, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304094187_Brief_Review_of_Motor_Current_Signature_Analysis/references. Acesso em: 11 nov. 2019.

OVIEDO, Silvia; QUIROGA, Javid; BORRÁS, Carlos. Motor Current Signature Analysis and Negative Sequence Current Based Stator Winding Short Fault Detection in an Induction Motor. **Dyna**, v. 78, n. 170, p. 214-220, dez. 2011. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/c0f3/6e3db075440487f68740666046efec433576.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2019.

ROSA, Wener Eugenio; SILVA, Antonio Manoel Batista. **Detecção de falhas em motores elétricos via análise de corrente e fluxo magnético**. Entec. Uberaba, 2011.

SINGH, Sukhjeet; KUMAR, Amit; KUMAR, Navin. Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems. **Procedia Materials Science**, Rupnagar, v. 6, p.171-177, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/82788399.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2019.

SINGHAL, Akshat; KHANDEKAR, Meera A. Bearing fault detection in induction motor using motor current signature analysis. **International Journal Of Advanced Research In Electrical, Electronics And Instrumentation Engineering**, Pune, v. 2, n. 7, p.3258-3264, jul. 2013.

STOPA, Marcelo Martins; CARDOSO FILHO, Braz de Jesus. Load Torque Signature

Analysis: An alternative to MCSA to detect faults in motor driven loads. **IEEE Energy Conversion Congress And Exposition (ECCE)**, p.1-8, set. 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.

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.

TEIXEIRA, Lorena Marques. **Análise computacional do motor de indução trifásico: Regime transitório e permanente**. 2009. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

THOMSON, William Torbat *et al.* Failure identification of offshore induction motor systems using on-condition monitoring. **Reliability Engineering**, v. 9, n. 1, p.49-64, jan. 1984.

TURK, Neelam. Fault Diagnosis of Induction Motor using MCSA. **International Journal Of Electrical And Computer Engineering**. India, p. 13-18. 2016. Disponível em: https://www.ripublication.com/irph/ijec16/ijecv8n1_03.pdf. Acesso em: 20 jun. 2019.

WEG. **Folha de dados W-22 IR2 Trifásico**, 2019.

WEG. **Catálogo de motores elétricos trifásicos**, 2019.

YAZIDI, A *et al.* Flux signature analysis: An alternative method for the fault diagnosis of induction machines. **IEEE Russia Power Tech**, St. Petersburg, jun. 2005.

YE, Zhongming; WU, Bin; SADEGHIAN, Alizera. Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, v. 50, n. 6, p.1217-1228, dez. 2003.

Tektronix. **A622 100 Amp AC/DC Current Probe Instructions**. Fonte: Tektronix: Disponível em: <<https://download.tek.com/manual/A622-Current-Probe-Instructions-070888305.pdf>> Acesso em 01 nov. 2019

APÊNDICES

APÊNDICE A – PROJETO DA FERRAMENTA

Para poder melhor analisar os dados coletados na bancada de testes utilizando o osciloscópio, foi necessário o desenvolvimento de um pequeno programa no MATLAB para gerar o gráfico de corrente (eixo y) pelo tempo (eixo x) e, também, a FFT que, como já explicado anteriormente, será utilizada para encontrar os defeitos dos motores.

Antes de começar a programação de fato desse código, foi necessário definir qual seriam os passos que o programa deveria tomar para chegar no resultado, que é a FFT de cada fase de cada motor. Inicialmente o programa necessita ser capaz de puxar uma lista criada no Excel e separar os dados desta lista em variáveis para serem utilizadas para as contas. Para isso, foram geradas as seguintes linhas de código:

```
[data,H]=xlsread('Fase1');

eixox=data(:,2);
eixoy=data(:,1);

mrep=200;

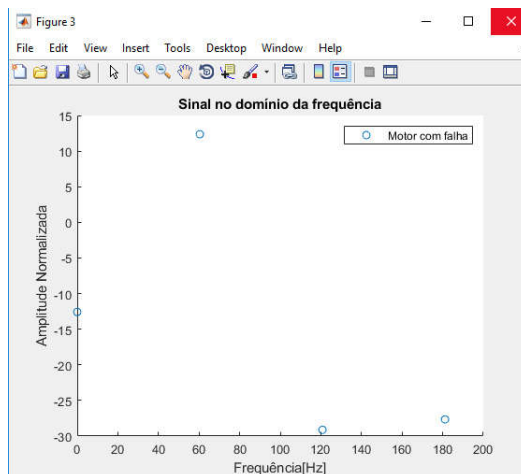
Corrente=repmat(eixox1,mrep,1);
tempo=xtrplt(eixoy1,mrep);
```

Neste trecho do código, é executada a leitura do documento do Excel “Fase 1” usando a função “*xlsread*” e salvar as variáveis deste documento em dois vetores: data e H. O vetor H será ignorado para fins deste estudo e no vetor data ficarão duas linhas diferentes de dados, na linha 1 poderão ser encontrado os tempos em que a amostra foi tirada e na linha 2, os valores da sua amplitude, que no caso são os valores medidos de corrente. O código “*eixox=data(:,2);*” acessa, na matriz data a sua segunda linha e cria um vetor “eixox” com esses dados, o mesmo acontece para a linha 1 de data, que é salva no vetor “eixoy”. Em cada programa, necessita-se que sejam lidas as três fases do motor em falha e uma das fases do motor bom, para comparação, todos esses dados são armazenados.

Também foi necessário a repetição do sinal salvo pelo osciloscópio, isso deu-se ao fato de ter-se muitos poucos pontos, como pode ser visto na figura 53, apenas com o disponibilizado pela medição o que causava uma dificuldade para interpretação dos dados. Essa repetição do sinal é feita pelas funções *mrep*, para o sinal de corrente, e *xtrplt*, para o sinal de tempo. Na

figura pode se ver que no espaço de frequências entre 0Hz e 200Hz foram medidos apenas 4 pontos e que o resto seria extrapolado pelo MATLAB o que gerava resultados inconclusivos para o propósito deste trabalho.

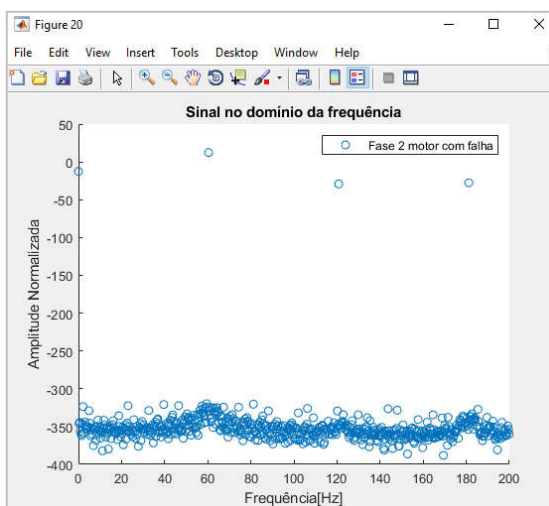
Figura 53 - Repetição do sinal



Fonte: Autoria própria (2019).

Para resolver este problema, repetiu-se o sinal de corrente de acordo com a variável $mrep$, que no caso recebeu o valor de 200. Isso criou um vetor com 200 vezes o mesmo sinal medido pelo osciloscópio, o que gerou novos pontos para interpretação, o resultado pode ser visto na figura seguinte.

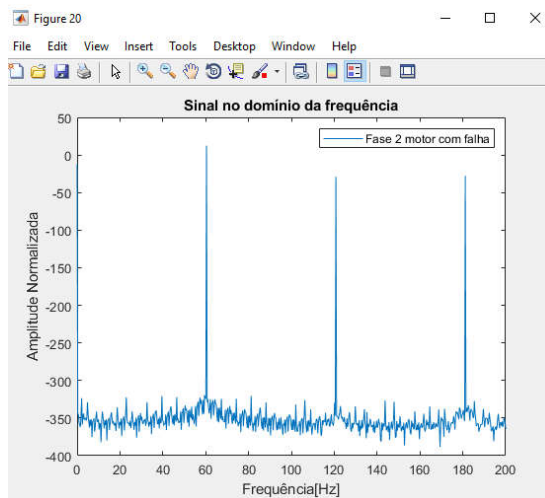
Figura 54 - Novos pontos



Fonte: Autoria própria (2019).

Isso permitiu a comparação dos sinais do motor com defeito com os do motor em bom estado. Resolvendo isso, passou-se a mostrar o gráfico em curvas, em vez de pontos, como pode ser visto na figura 55.

Figura 55 - Gráfico em curvas



Fonte: Autoria própria (2019).

Passou-se, então, para o próximo passo, a normalização da frequência, com o seguinte código:

```
N=mrep*length(data);
passo=tempo(2)-tempo(1);
Fe=1/passo;
f=Fe/N*(0:(N-1));
```

Dando continuidade ao programa, cria-se um vetor DATA que receberá a FFT da corrente, levando em consideração o tamanho total N do vetor data, o código para essa ação pode ser visto em seguida.

```
DATA=(2/N*fft(Corrente));
```

Por fim, serão gerados quatro gráficos com a função do MATLAB “plot”. Nestes gráficos, serão utilizadas as frequências normalizadas e a amplitude será convertida para dB por meio da função “mag2db”.

```
figure(1)
plot(fBom2, mag2db(abs(DATABom2)), f, mag2db(abs(DATA)))
xlim([40 80])
legend('Motor em bom estado', 'Fase 1 motor com falha')
xlabel('Frequência[Hz]');
ylabel('Amplitude Normalizada');
```

```

title('Sinal no domínio da frequência');

figure(2)
plot(fBom2, mag2db(abs(DATA_Bom2)), f2, mag2db(abs(DATA2)))
xlim([40 80])
legend('Motor em bom estado', 'Fase 2 motor com falha')
xlabel('Frequência[Hz]');
ylabel('Amplitude Normalizada');
title('Sinal no domínio da frequência');

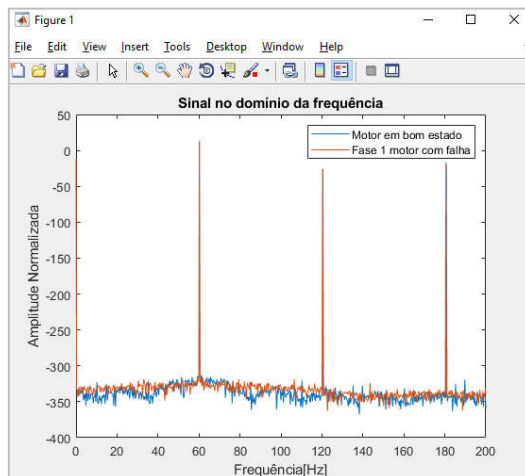
figure(3)
plot(fBom2, mag2db(abs(DATA_Bom2)), f3, mag2db(abs(DATA3)))
xlim([40 80])
legend('Motor em bom estado', 'Fase 3 motor com falha')
xlabel('Frequência[Hz]');
ylabel('Amplitude Normalizada');
title('Sinal no domínio da frequência');

figure(4)
plot(fBom2, mag2db(abs(DATA_Bom2)), f, mag2db(abs(DATA)), f2, mag2db(abs(DA
TA2)), f3, mag2db(abs(DATA3)))
xlim([40 80])
legend('Motor em bom estado', 'Fase 1 motor com falha', 'Fase 2 motor com
falha', 'Fase 3 motor com falha')
xlabel('Frequência[Hz]');
ylabel('Amplitude Normalizada');
title('Sinal no domínio da frequência');

```

No código acima, a função “*figure*” irá forçar o MATLAB a separar os gráficos gerados, “*plot*” irá gerar o gráfico propriamente dito, “*xlabel*” e “*ylabel*” darão nomes para os eixos x e y do gráfico, respectivamente, “*legend*” irá criar uma legenda no gráfico, “*xlim*” servirá para determinar qual a área do gráfico será mostrada e a função “*title*” irá dar um título para o gráfico da figura à ele designada. Na figura 56, pode-se ver um exemplo do gráfico gerado pelo programa.

Figura 56 - Gráfico gerado



Fonte: Autoria própria (2019).

APÊNDICE B – TRATAMENTO DE DADOS

Quando o osciloscópio salva uma forma de onda, é gerada uma planilha .CSV que vem com informações sobre esta onda salva e em seguida os valores de tempo e amplitude, que no caso do estudo será a corrente dos motores. Para propósito do programa MATLAB gerado, essas informações sobre as ondas serão desconsideradas e apagadas da planilha. A imagem 37 exemplifica o arquivo bruto gerado pelo osciloscópio. Na figura 57, tudo acima de “*Firmware Version*” (linha 18) será apagado.

Figura 57 - Planilha exemplo

	A	B	C	D	E	F	G
1	Record Length,2.500000e+03,,	-0.012500000000,	-4.00000,				
2	Sample Interval,1.000000e-05,,	-0.012490000000,	-4.08000,				
3	Trigger Point,1.250000000000e+03,,	-0.012480000000,	-4.08000,				
4	,,, -0.012470000000,	-4.08000,					
5	,,, -0.012460000000,	-4.00000,					
6	,,, -0.012450000000,	-4.08000,					
7	Source,CH1,,	-0.012440000000,	-4.08000,				
8	Vertical Units,A,,	-0.012430000000,	-4.00000,				
9	Vertical Scale,2.000000e+00,,	-0.012420000000,	-4.08000,				
10	Vertical Offset,4.800000e-01,,	-0.012410000000,	-3.92000,				
11	Horizontal Units,s,,	-0.012400000000,	-4.00000,				
12	Horizontal Scale,2.500000e-03,,	-0.012390000000,	-3.92000,				
13	Pt Fmt,Y,,	-0.012380000000,	-4.00000,				
14	Yzero,0.000000e+00,,	-0.012370000000,	-4.00000,				
15	Probe Atten,1.000000e+02,,	-0.012360000000,	-4.00000,				
16	Model Number,TDS1001B,,	-0.012350000000,	-3.92000,				
17	Serial Number,C105484,,	-0.012340000000,	-3.84000,				
18	Firmware Version,FV:v22.13,,	-0.012330000000,	-3.92000,				
19	,,, -0.012320000000,	-4.00000,					
20	,,, -0.012310000000,	-3.92000,					
21	,,, -0.012300000000,	-3.92000,					
22	,,, -0.012290000000,	-4.00000,					
23	,,, -0.012280000000,	-3.84000,					

Fonte: Autoria própria (2019).

Outro problema encontrado foi que os vetores de tempo e amplitude da onda estavam salvos em apenas uma coluna do Excel. Foi necessário, então, separar esses valores em duas colunas diferentes para que o MATLAB pudesse entender esses valores.

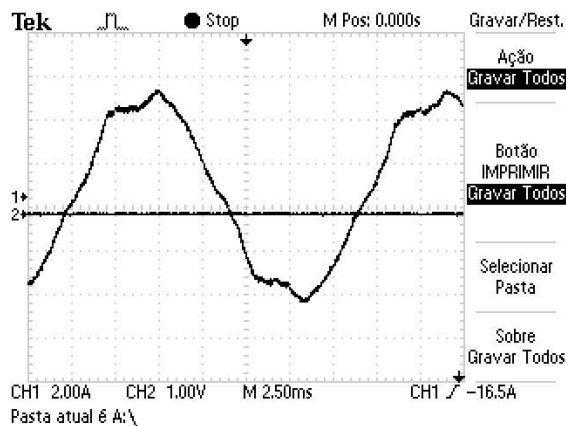
Figura 58 - Dados utilizados

	A	B	C	D
19	...-00.012320000000, -4.00000,			
20	...-00.012310000000, -3.92000,			
21	...-00.012300000000, -3.92000,			
22	...-00.012290000000, -4.00000,			
23	...-00.012280000000, -3.84000,			
24	...-00.012270000000, -4.00000,			
25	...-00.012260000000, -3.92000,			
26	...-00.012250000000, -3.92000,			
27	...-00.012240000000, -3.84000,			
28	...-00.012230000000, -3.92000,			
29	...-00.012220000000, -3.92000,			
30	...-00.012210000000, -3.92000,			
31	...-00.012200000000, -3.84000,			
32	...-00.012190000000, -3.92000,			
33	...-00.012180000000, -3.84000,			
34	...-00.012170000000, -3.84000,			
35	...-00.012160000000, -3.92000,			
36	...-00.012150000000, -3.76000,			
37	...-00.012140000000, -3.76000,			
38	...-00.012130000000, -3.68000,			

Fonte: Autoria própria (2019).

Em seguida foi necessário separar na tabela, os valores referentes a um único período de onda para que não se tenha problemas quando gerada a FFT, para isso, analisou-se a imagem gerada pelo próprio osciloscópio e escolheu-se os melhores pontos para serem mantidos, em geral a regra foi de deletar todos os valores antes do primeiro 0 encontrado e também aqueles depois do segundo 0 encontrado na tabela.

Figura 59 - Sinal capturado



Fonte: Autoria própria (2019)

Por fim, para que o MATLAB possa ler o arquivo, salvou-se essa nova versão dos dados

na extensão .XLSX na mesma pasta onde está localizado o arquivo .m para que o programa pudesse importar os dados.

APÊNDICE C – ÁREA DA PLOTAGEM

A área de plotagem foi definida individualmente para cada um dos três motores com defeitos, variando de acordo com as frequências onde devem aparecer os erros no gráfico das transformadas rápidas de Fourier.

Para o motor com curto-circuito no enrolamento, serão mostrados os valores de frequência de 0 Hz até 210 Hz, desta forma será possível visualizar todas as faixas onde poderão ser encontrados erros na FFT. Já para o motor com as barras quebradas, serão apresentados os valores na FFT entre 0Hz e 85Hz, esse trecho do gráfico já é o suficiente para visualizar os valores calculados para os 5 diferentes valores de K utilizados. Por fim, no motor com defeito no rolamento, a faixa de frequência apresentada foi definida entre 120Hz e 230Hz.